

FABRÍCIO FERREIRA LIMA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TOLERÂNCIA
DIMENSIONAL NOS VALORES DE ENERGIA
ABSORVIDA DURANTE O ENSAIO DE IMPACTO
MINI CHARPY**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2019

FABRÍCIO FERREIRA LIMA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TOLERÂNCIA DIMENSIONAL NOS
VALORES DE ENERGIA ABSORVIDA DURANTE O ENSAIO DE
IMPACTO MINI CHARPY**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da
Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para
a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia
Mecânica**.

Área de concentração: Usinagem não convencional e
ensaios de impacto.

Orientador: Prof. Dr. Luciano José Arantes

**UBERLÂNDIA - MG
2019**

FABRÍCIO FERREIRA LIMA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TOLERÂNCIA DIMENSIONAL NOS VALORES DE ENERGIA ABSORVIDA DURANTE O ENSAIO DE IMPACTO MINI CHARPY

Trabalho de conclusão de curso APROVADO
pela Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.
Área de concentração: Análise e gestão de
dados

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano José Arantes – FEMEC – UFU – Orientador

Profª. Dra. Rosenda Valdes Arencibia – FEMEC – UFU- Membro

Prof. Msc. Rafael Ariza Gonçalves – FEMEC – UFU - Membro

Uberlândia, 12 de abril de 2019

AGRADECIMENTOS

Presto aqui meus agradecimentos...

A Deus por estar sempre ao meu lado, sempre me ajudando e me capacitando.

Aos meus pais, pelo incentivo e apoio nessa caminhada.

À Universidade Federal de Uberlândia, em especial à Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de trabalhar e aprender com excelentes profissionais.

Ao orientador, Luciano José Arantes, pela paciência e atenção prestada nesse período.

Ao Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, LTAD, pela concessão da infraestrutura utilizada nesse trabalho.

Aos técnico e engenheiros do LTAD, pelo suporte e atenção.

À banca examinadora, pela disponibilidade e paciência.

RESUMO

O processo não convencional de usinagem por Descargas Elétricas tem se difundido cada vez mais na indústria. Além da capacidade de fabricação de peças de geometrias complexas, esse tipo de usinagem é indicada para o corte de materiais muito duros, que não são facilmente trabalhados por métodos convencionais de usinagem. A ausência da força de corte e a rápida dissipação do calor gerado são grandes vantagens presentes nesse processo, que possibilita a confecção de um produto final de alta qualidade e sem alterações microestruturais. A Eletroerosão é altamente indicada na fabricação de corpos de prova charpy, em especial, mini charpy. Com isso, se faz necessário o esclarecimento de algumas questões. Esse trabalho tem como objetivo investigar a influência da tolerância dimensional na altura, largura e diâmetro do raio admitida no projeto dos corpos de prova na quantidade de energia absorvida durante o ensaio charpy. A dimensão base dos corpos de prova são de 1,5 mm de altura por 1,5 mm de largura, com $\pm 0,01$ mm de tolerância. Foram ensaiados diversos corpos de prova do material (aço API P110), que foram usinadas por eletroerosão a fio e tinham suas dimensões variando dentro da tolerância permitida. No final, a ANOVA (Análise de Variância) foi utilizada para garantir a veracidade e confiabilidade dos resultados. Os resultados apresentaram que, pela análise de variância, existe influência estatisticamente significativa da tolerância dimensional no resultado do ensaio de impacto mini charpy para alguns casos.

ABSTRACT

Electrical Discharge Machining is a non-conventional manufacturing process that has been widespread in the worldwide industry. In addition to the complex geometry parts workability, this machining process is indicated to the cutting materials of high hardness, which are not easily machined by other methods. The absence of shear force and the fast heat dissipation are two of the main characteristics of this process, which is capable of producing a high quality final product. EDM is highly recommended to the manufacture of Charpy test specimens, particularly for mini-size Charpy. However, some issues need to be clarified. This work investigates the influence of dimensional tolerance allowed in the project on the energy absorbed by the specimens during the mini-size Charpy test. The specimens base dimension is 1.5 mm x 1.5 mm with ± 1 mm tolerance. Several samples of the P110 material were tested, which were machined by wire-EDM and had their dimensions ranging within the tolerance allowed. Subsequently, a statistical treatment was performed to guarantee the reliability of the results. Finally, this work shows by Variance Analysis that there is a dimensional tolerance influenced on the result of the mini-size charpy impact test in some cases.

Keywords: Electrical discharge machining, Mini-size charpy, Dimensional tolerance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de usinagem por eletroerosão a fio (TARNG, MA e CHUNG, 1995).....	13
Figura 2 - (A) Máquina de ensaio do impacto e (B) corpo de prova do tipo Charpy (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).	14
Figura 3 - Bancada experimental de ensaio Mini Chapy do LTAD-UFU.....	15
Figura 4 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 1.	17
Figura 5 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 2.	17
Figura 6 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 3.	18
Figura 7 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 4.	18
Figura 8 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 5.	19
Figura 9 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 6.	19
Figura 10 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 7.	20
Figura 11 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 8.	20
Figura 12 - Máquina GF AgieCharmilles FW 2U instalada no LTAD e utilizada para a confecção dos corpos de prova do mini charpy.....	21
Figura 13 - Termômetro indicando a temperatura da sala de ensaio.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dimensionais do corpo de prova base.	16
Tabela 2 - Distribuição de valores dos fatores de controle para cada teste.	16
Tabela 3 - Características técnicas da Máquina GF AgieCharmilles FW 2U.	21
Tabela 4 - Corpos de prova do Teste 1 selecionados e suas respectivas dimensões.	22
Tabela 5 - Corpos de prova do Teste 2 selecionados e suas respectivas dimensões.	22
Tabela 6 - Corpos de prova do Teste 3 selecionados e suas respectivas dimensões.	23
Tabela 7 - Corpos de prova do Teste 4 selecionados e suas respectivas dimensões.	23
Tabela 8 - Corpos de prova do Teste 5 selecionados e suas respectivas dimensões.	24
Tabela 9 - Corpos de prova do Teste 6 selecionados e suas respectivas dimensões.	24
Tabela 10 - Corpo de prova do Teste 7 selecionadas e suas respectivas dimensões.	25
Tabela 11 - Corpos de prova do Teste 8 selecionados e suas respectivas dimensões.	25
Tabela 12 – Corpos de prova escolhidos para o ensaio de impacto mini Charpy.	26
Tabela 13 - Corpos de prova após o ensaio.	27
Tabela 14 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 1.	28
Tabela 15 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 2.	28
Tabela 16 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 3.	28
Tabela 17 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 4.	29
Tabela 18 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 5.	29
Tabela 19 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 6.	29
Tabela 20 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 7.	30
Tabela 21 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 8.	30
Tabela 22 - Resultados obtidos pela ANOVA 1.....	32
Tabela 23 - Resultados obtidos pela ANOVA 2.....	32
Tabela 24 - Resultados obtidos pela ANOVA 3.....	33
Tabela 25 - Resultados obtidos pela ANOVA 4.....	33
Tabela 26 - Resultados obtidos pela ANOVA 5.....	33
Tabela 27 - Resultados obtidos pela ANOVA 6.....	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. ELETROEROSÃO	12
2.1.1 ELETROEROSÃO A FIO	12
2.2 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY	13
2.2. MINI CHARPY.....	14
3 METODOLOGIA	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5 CONCLUSÕES	35
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
ANEXO A - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO INTERFERÔMETRO	38

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A escolha do material é uma etapa essencial no desenvolvimento de um projeto de engenharia. Para que ela ocorra de forma correta é indispensável a análise de diversos fatores, entre eles o ambiente de trabalho, o custo de fabricação, as propriedades mecânicas requeridas, etc. Em alguns casos, a propriedade mecânica mais examinada é a resistência ao impacto, que nos diz respeito ao comportamento de um determinado material sob ação de cargas dinâmicas. Para estimar essa característica de um material emprega-se o ensaio de impacto Charpy.

O ensaio de impacto Charpy consiste em aplicar uma força instantânea no corpo de prova através de um pêndulo, causando a fratura desse material, ou seja, é um ensaio destrutivo. Calculando a diferença de energia entre o momento imediatamente antes do impacto e o momento imediatamente após o impacto, obtém-se a quantidade de energia absorvida pelo corpo de teste. Essa energia indica o quanto um determinado material é tenaz, ou seja, quanta energia ele suporta até atingir a falha (fratura).

O ensaio Charpy permite definir se o material do corpo de prova é indicado para determinada aplicação de maneira segura e eficiente, sendo assim muito útil no meio das indústrias automobilísticas, aeronáuticas, do petróleo e gás, entre outras. O ensaio de impacto mini Charpy é a versão miniatural do ensaio de impacto Charpy, com corpos de prova e carga de impacto menores. É importante salientar que os corpos de prova para esse ensaio são fabricados a partir do processo de eletroerosão por corte a fio (WEDM).

A eletroerosão por corte a fio é um processo de usinagem não convencional que é bastante usual em indústrias automotivas, eletrônicas, etc. Essa técnica consiste na remoção de material de uma peça a partir de descargas elétricas, não havendo contato mecânico entre a peça a ser usinada e a ferramenta de corte (fio), ou seja, não há forças de corte. A região onde se faz o corte está sempre em contato com o fluido dielétrico, que forma o canal de descarga. Esse procedimento é indicado para usinagem de materiais excessivamente duros, peças que apresentam geometrias complexas. A eletroerosão por corte a fio proporciona um bom acabamento superficial na região de corte e um processo sem rebarbas.

Assim como em todo processo de fabricação, a confecção dos corpos de prova para o ensaio de impacto mini Charpy permite uma tolerância dimensional. A partir disso, surgem numerosas dúvidas a respeito dos resultados desse ensaio em relação à variação das dimensões do corpo de prova (dentro da tolerância). Portanto, o objetivo desse trabalho é responder algumas perguntas nesse âmbito, tais como:

- A variação das dimensões (dentro da tolerância) do corpo de prova influenciam os resultados do ensaio?
- A variação das dimensões (dentro da tolerância) do corpo de prova influenciam os resultados dos ensaio de uma forma mais contundente do que o próprio erro da máquina?

Nesse contexto, essa pesquisa visa dar continuidade ao avanço da tecnologia no processo de eletroerosão por corte a fio.

Com o objetivo de abordar o problema de maneira didática, o presente trabalho foi dividido em capítulos. No Capítulo 2, é apresentada uma revisão da literatura, abordando com mais profundidade temas como o processo de eletroerosão por corte a fio, o ensaio de impacto (mini) Charpy, entre outros. No Capítulo 3, é apresentado de forma detalhada todo o procedimento experimental, mostrando desde o corte dos corpos de prova, até a realização do ensaio de impacto. No Capítulo 4, são apresentados os resultados do ensaio. Através do uso de algumas ferramentas estatísticas, esses dados foram tratados e posteriormente discutidos. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo e as considerações finais, além de indicações para futuros trabalhos relacionados a esse assunto. No Capítulo 6 são apresentadas todas as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada uma revisão bibliográfica sobre definições, especificações e esclarecimentos associados ao projeto.

2.1 Eletroerosão

A eletroerosão é um processo de fabricação para materiais que possuem como característica a condutividade elétrica. O processo ocorre pela conversão da energia elétrica, através de descargas elétricas entre o eletrodo e a peça, em energia térmica. O mecanismo de descarga elétrica ocorre em um fluido, onde estão imersos o eletrodo e o material a ser usinado. As descargas elétricas ocorrem quando a distância entre eletrodo e peça atinge uma medida suficiente para romper as propriedades resistivas do fluido, e permitir que a faíscas elétricas deixem o eletrodo carregado e atinjam a peça.

O processo de eletroerosão possui grande aplicação na usinagem de peças com geometria complexa e alta dureza, principalmente quando a ferramenta a ser usinada já se encontra temperada e revenida. A ausência de contato entre peça e ferramenta evita o aparecimento de forças de usinagem na superfície e vibrações durante o processo. Por consequência, o método se torna menos dispendioso, já que a precisão dos componentes fabricados é maior e os dispositivos de fixação menos robustos (Ho e Newman, 2003).

Para que a eletroerosão aconteça é indispensável a presença de um fluido dielétrico, o qual fornece isolamento contra descargas elétricas prematuras, resfria a área isolada, além de remover os resíduos.

2.1.1 Eletroerosão a Fio

A eletroerosão por corte a fio é um processo de usinagem não convencional bastante usual em indústrias automotivas, eletrônicas, etc. Essa técnica consiste na remoção de material de uma peça a partir de descargas elétricas, não havendo contato mecânico entre a peça a ser usinada e a ferramenta de corte (fio), ou seja, não há forças de corte. A região onde se faz o corte está sempre em contato com o fluido dielétrico, que forma o canal de descarga. Esse

procedimento é indicado para usinagem de materiais excessivamente duros e peças que apresentam geometrias complexas (Yoshida, 2002). A eletroerosão por corte a fio proporciona um bom acabamento superficial na região de corte e um processo sem rebarbas. A Figura 1 exemplifica o funcionamento dessa ferramenta.

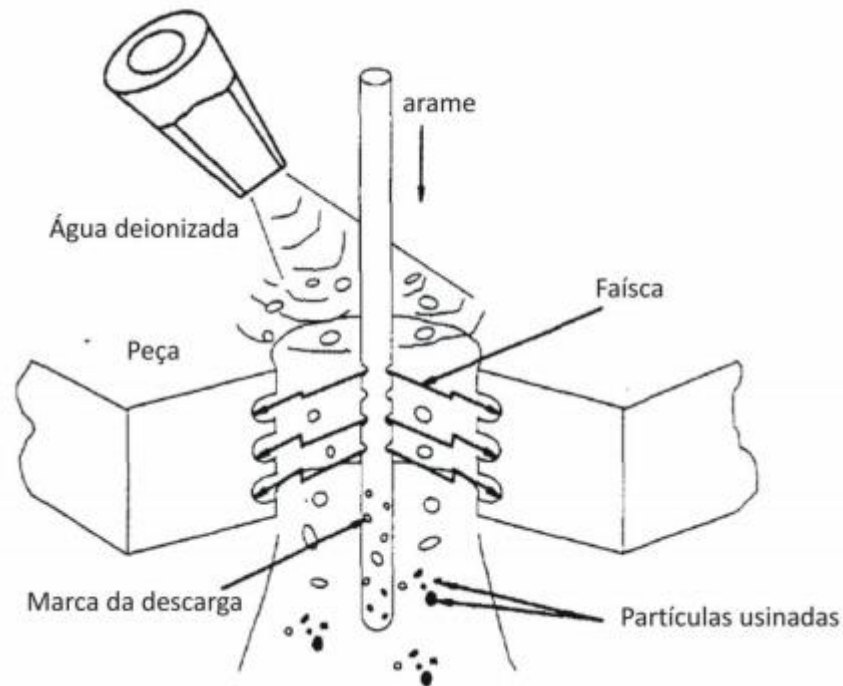


Figura 1 - Esquema de usinagem por eletroerosão a fio (TARNG, MA e CHUNG, 1995).

A eletroerosão a fio é extremamente indicada para a fabricação dos corpos de prova para ensaio mini Charpy, visto que ela garante a tolerância dimensional exigida em projeto (0,01 mm).

2.2 Ensaio de impacto Charpy

A determinação das características e propriedades mecânicas de um material metálico é obtida por meio de vários ensaios mecânicos. Estes, são realizados por meio de aplicação de uma das formas de energia em um material (SOUZA, 1982).

O ensaio de impacto Charpy é um dos métodos para determinar a resistência dos materiais quando submetido a uma certa carga de impacto. Esse método tem como finalidade medir a quantidade de energia absorvida pelo material durante a fratura e é essencial para garantir a segurança e confiabilidade do mesmo. O ensaio é realizado por um pêndulo de

impacto, o qual é liberado de uma altura pré-definida e causa a ruptura do corpo de prova, que é inicialmente fixado em um suporte, na base da máquina. A diferença entre a altura de elevação do martelo após o impacto e a altura inicial do pêndulo, dá a medida da energia absorvida pelo corpo de prova. O ensaio Charpy é muito utilizado no setor automobilístico, de aeronaves e em peças específicas utilizadas na indústria.

O ensaio de impacto Charpy possibilita o uso de corpos de prova reduzidos, tornando esse método econômico, já que menos material é utilizado na fabricação dos corpos de prova. A Figura 2 evidencia o equipamento usado no processo do ensaio de impacto Charpy (A) e a posição horizontal em que o corpo de prova é posicionado durante este ensaio.

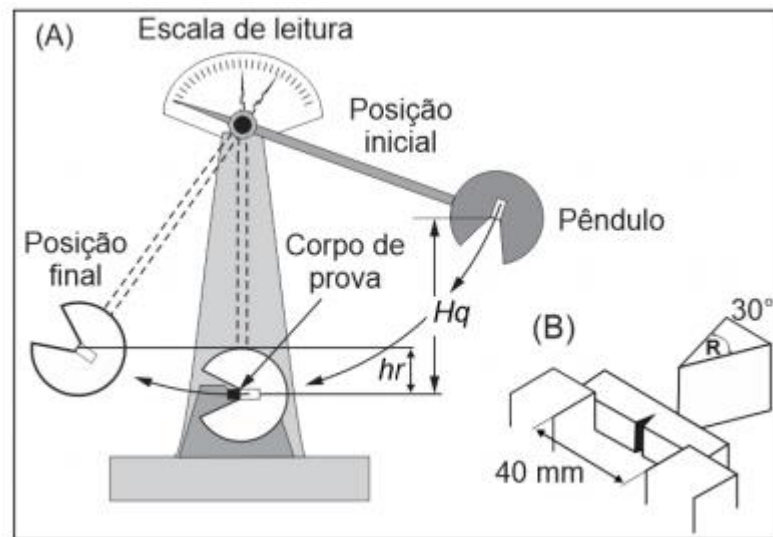


Figura 2 - (A) Máquina de ensaio do impacto e (B) corpo de prova do tipo Charpy (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

2.2.2 Mini Charpy

O uso de mini testes tem sido frequentemente estudado na literatura (LUCAS, 1983). E com o ensaio de impacto Charpy não tem sido diferente. A miniaturização deste teste permite o uso de uma gama ainda maior de materiais como corpo de prova, visto que serão destruídas pequenas quantidades do material.

A Figura 3 apresenta a máquina de ensaio de impacto mini Charpy utilizada nesse trabalho. Esse equipamento foi projetado e montado pelos engenheiros do LTAD (Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste), localizado na Universidade Federal de Uberlândia. No ANEXO A é apresentado o documento que certifica a calibração desse instrumento de medição.

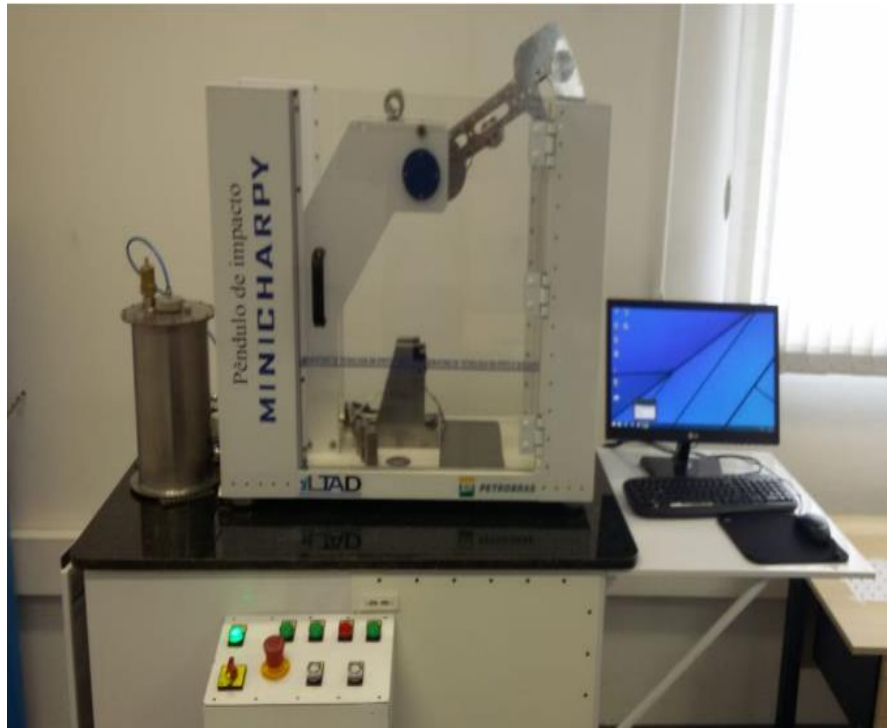


Figura 3 - Bancada experimental de ensaio Mini Chapy do LTAD-UFU.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Para estudar a influência da variação dimensional dos corpos de prova que são utilizados no ensaio de impacto mini Charpy tomou-se como base um corpo de prova de aço P110, que possui em sua composição elementos como o Manganês, Cromo, Carbono, Silício, entre outros. As características do corpo de prova base são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dimensionais do corpo de prova base.

Altura [mm]	Largura [mm]	Raio de entalhe [mm]
1,50	1,50	0,08

É importante ressaltar que o comprimento do corpo de prova é 22 mm, porém este não é um fator de controle nesse trabalho. A tolerância dimensional para esse corpo de prova é de $\pm 0,01$ mm. Variando as dimensões do corpo de prova base de acordo com a tolerância dimensional, foram criadas oito diferentes peças, as quais são chamados de Testes. A Tabela 2 apresenta cada um desses testes e respectivas dimensões dos corpos de prova.

Tabela 2 - Distribuição de valores dos fatores de controle para cada teste.

Teste	Fator de controle		
	Altura [mm]	Largura [mm]	Raio de entalhe [mm]
1	1,49	1,49	0,07
2	1,51	1,49	0,07
3	1,49	1,51	0,07
4	1,51	1,51	0,07
5	1,49	1,49	0,09
6	1,51	1,49	0,09
7	1,49	1,51	0,09
8	1,51	1,51	0,09

As Figuras 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 mostram o desenho técnico dos testes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, respectivamente. É importante frisar que as cotas presentes nas imagens estão em mm.

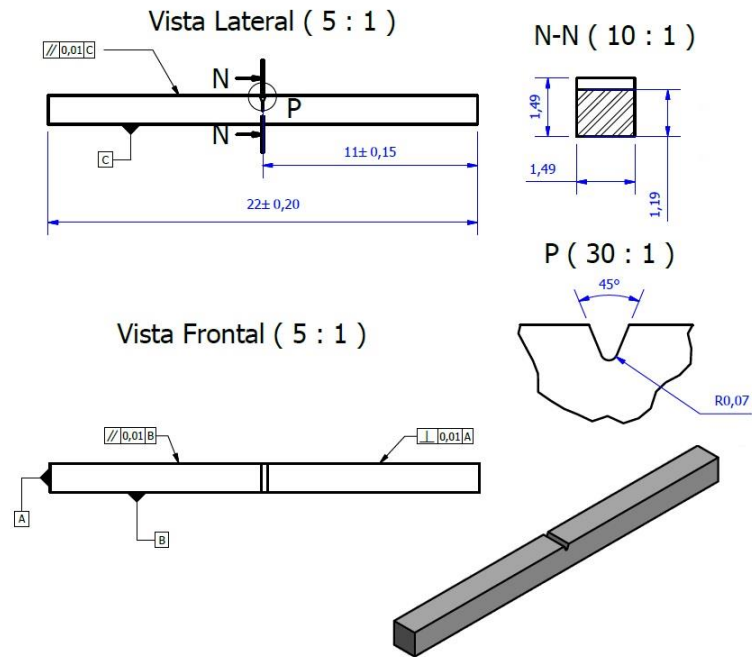


Figura 4 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 1.

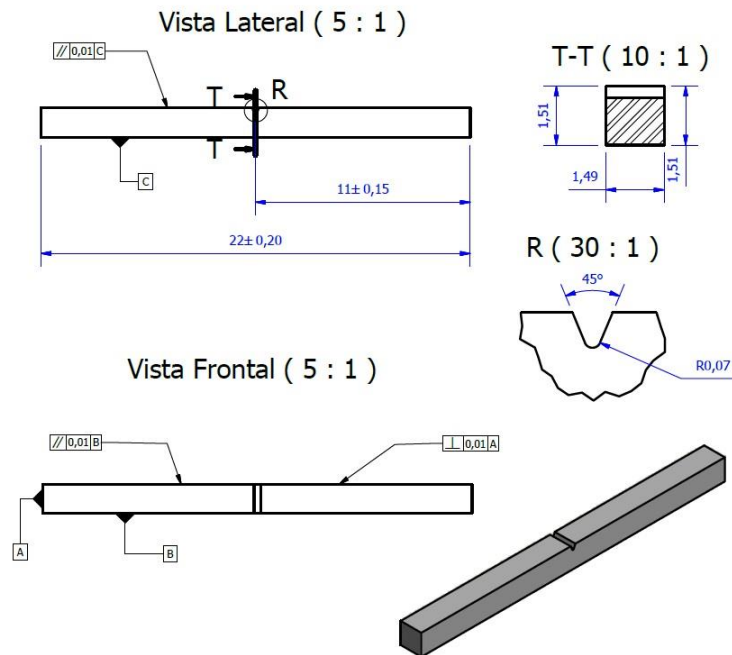


Figura 5 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 2.

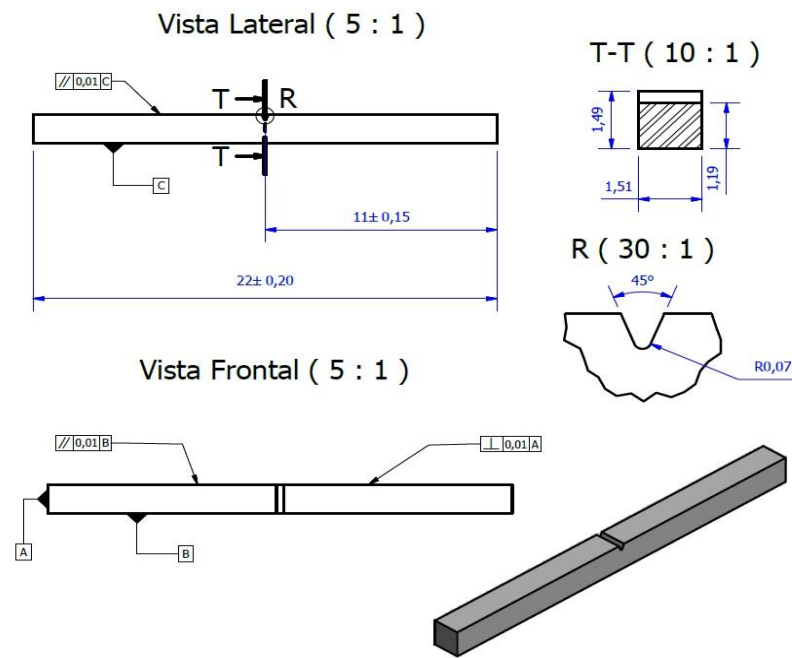


Figura 6 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 3.

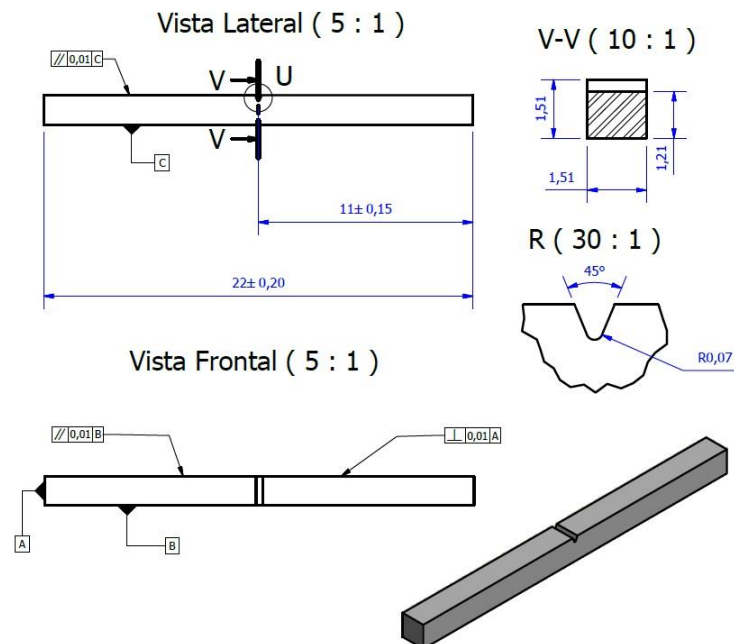


Figura 7 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 4.

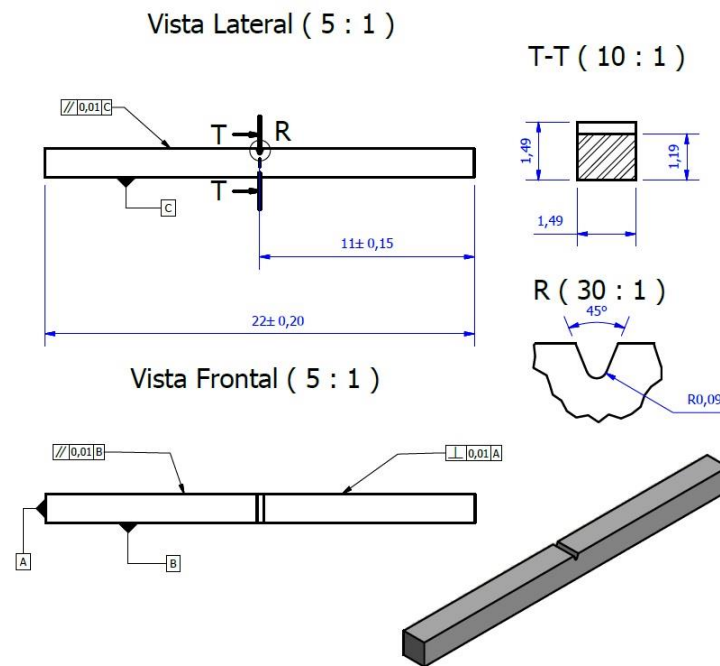


Figura 8 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 5.

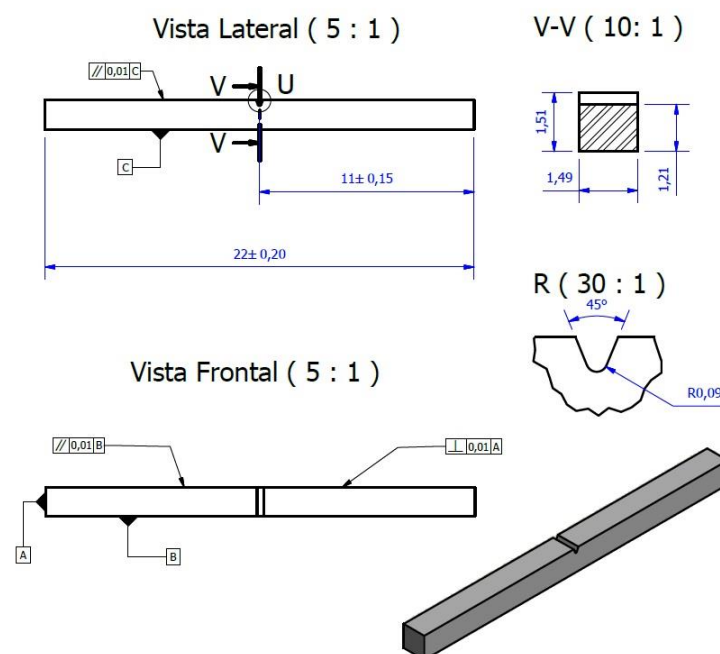


Figura 9 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 6.

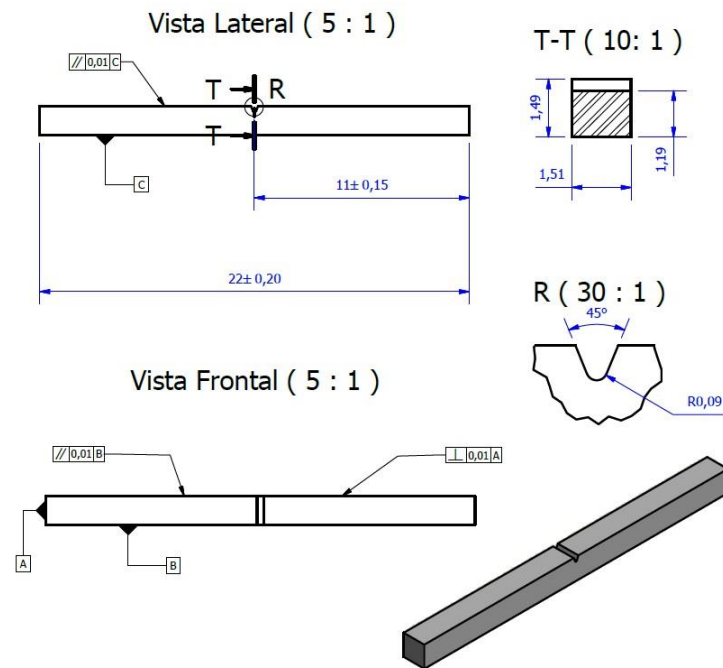


Figura 10 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 7.

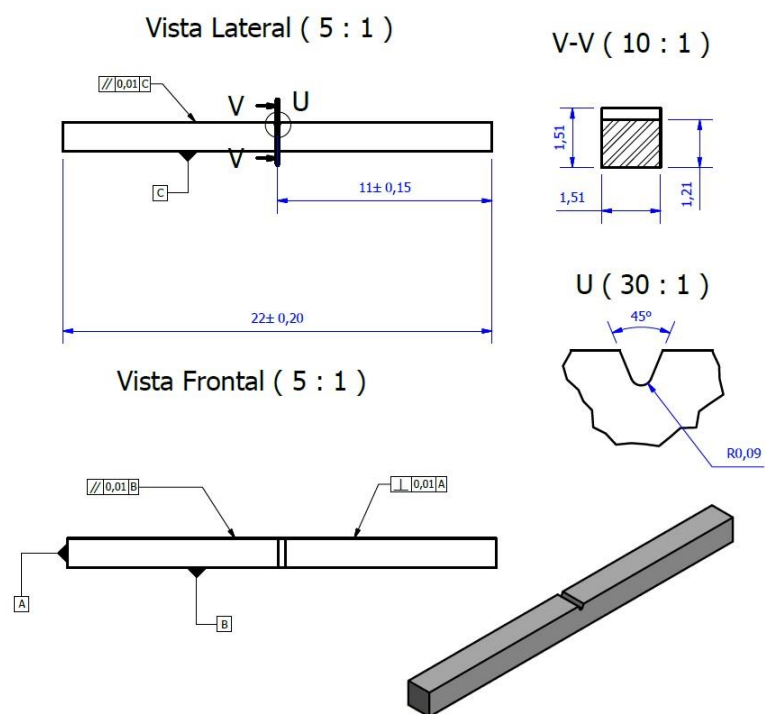


Figura 11 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no teste 8.

Para a confecção dos corpos de prova foi usada a máquina FW 2U-AGIE CHARMILLES, instalada no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) e representada na Figura 12.



Figura 12 - Máquina GF AgieCharmilles FW 2U instalada no LTAD e utilizada para a confecção dos corpos de prova do mini charpy.

A Tabela 3 apresenta as características técnicas dessa máquina.

Tabela 3 - Características técnicas da Máquina GF AgieCharmilles FW 2U.

Características Técnicas	
Curso dos eixos X/Y/Z [mm]	500 x 400 x 250
Cursos dos eixos U/V [mm]	±18
Diâmetro do fio de molibdênio [mm]	0,12 a 0,20
Dimensão máxima da peça [mm]	800 x 500 x 300
Massa máxima da peça sobre a mesa [kg]	600
Dimensões da mesa [mm]	800 x 500
Dimensões da bandeja de trabalho [mm]	1200 x 740 x 250
Dimensões da máquina [mm]	1715 x 1790 x 2050
Dimensões do gabinete [mm]	685 x 935 x 1865
Capacidade do tanque dielétrico [l]	50
Velocidade de corte [mm ² /min]	190
Rugosidade (Ra) [μm]	≤ 1,0
Resolução dos eixos [mm]	0,001
Capacidade do tambor enrolador [m]	400
Massa total [kg]	2680

Para o corte dos corpos de prova desse trabalho foi utilizado um fio de molibdênio de 0,12 mm. Após o corte de dezenas de peças para todos os testes, o passo seguinte consistiu na medição e catalogação de todos os corpos de prova. A medição foi feita por meio de um micrômetro da Mitutoyo com a resolução de 0,001 mm. É importante ressaltar que para cada corpo de prova, foram tomadas cinco medidas de cada dimensão, considerando-se finalmente a média dessas medidas. A temperatura de medição foi controlada em 20°C.

Após catalogadas, foram escolhidas cinco corpos de prova de cada teste, os quais apresentavam as dimensões mais próximas das desejadas. A Tabela 4 apresenta os corpos de prova do Teste 1 escolhidos e suas respectivas dimensões.

Tabela 4 - Corpos de prova do Teste 1 selecionados e suas respectivas dimensões.

Corpo de prova	Altura		Largura		Raio de entalhe	
	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]
1.3	1,4914	0,00251	1,4918	0,00228	0,0703	0,00030
1.7	1,4904	0,00416	1,4910	0,00224	0,0707	0,00024
1.10	1,4932	0,00363	1,4910	0,00235	0,0704	0,00031
1.12	1,4918	0,00286	1,4882	0,00110	0,0694	0,00018
1.15	1,4876	0,00378	1,4912	0,00192	0,0698	0,00024

A Tabela 5 apresenta os corpos de prova do Teste 2 escolhidos e suas respectivas dimensões.

Tabela 5 - Corpos de prova do Teste 2 selecionados e suas respectivas dimensões.

Corpo de prova	Altura		Largura		Raio de entalhe	
	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]
2.10	1,5106	0,00270	1,4886	0,00378	0,0704	0,00018
2.11	1,5090	0,00255	1,4876	0,00261	0,0693	0,00028
2.14	1,5096	0,00182	1,4876	0,00167	0,0700	0,00015
2.22	1,5104	0,00251	1,4880	0,00187	0,0702	0,00022
2.26	1,5104	0,00207	1,4880	0,00235	0,0699	0,00024

A Tabela 6 apresenta os corpos de prova do Teste 3 escolhidos e suas respectivas dimensões.

Tabela 6 - Corpos de prova do Teste 3 selecionados e suas respectivas dimensões.

Corpo de prova	Altura		Largura		Raio de entalhe	
	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]
3.1	1,4890	0,00316	1,5110	0,00212	0,0692	0,00021
3.4	1,4904	0,00114	1,5118	0,00239	0,0695	0,00020
3.5	1,4910	0,00300	1,5112	0,00228	0,0708	0,00030
3.10	1,4906	0,00182	1,5120	0,00274	0,0701	0,00029
3.25	1,4892	0,00148	1,5120	0,00418	0,0694	0,00020

A Tabela 7 apresenta os corpos de prova do Teste 4 escolhidos e suas respectivas dimensões.

Tabela 7 - Corpos de prova do Teste 4 selecionados e suas respectivas dimensões.

Corpo de prova	Altura		Largura		Raio de entalhe	
	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]
4.1	1,5108	0,00164	1,5128	0,00084	0,0708	0,00011
4.6	1,5108	0,00084	1,5102	0,00084	0,0704	0,00021
4.8	1,5086	0,00167	1,5082	0,00259	0,0705	0,00034
4.30	1,5124	0,00207	1,5086	0,00055	0,0691	0,00028
4.32	1,5116	0,00089	1,5096	0,00305	0,0696	0,00024

A Tabela 8 apresenta os corpos de prova do Teste 5 escolhidos e suas respectivas dimensões.

Tabela 8 - Corpos de prova do Teste 5 selecionados e suas respectivas dimensões.

Corpo de prova	Altura		Largura		Raio de entalhe	
	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]
5.3	1,4918	0,00130	1,4924	0,00167	0,0904	0,00021
5.4	1,4926	0,00055	1,4896	0,00152	0,0900	0,00025
5.11	1,4920	0,00224	1,4910	0,00122	0,0895	0,00014
5.20	1,4922	0,00217	1,4924	0,00055	0,0892	0,00030
5.21	1,4918	0,00130	1,4910	0,00141	0,0896	0,00032

A Tabela 9 apresenta os corpos de prova do Teste 6 escolhidos e suas respectivas dimensões.

Tabela 9 - Corpos de prova do Teste 6 selecionados e suas respectivas dimensões.

Corpo de prova	Altura		Largura		Raio de entalhe	
	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]
6.19	1,5098	0,00130	1,4914	0,00134	0,0908	0,00031
6.21	1,5120	0,00316	1,4908	0,00130	0,0902	0,00027
6.27	1,5126	0,00055	1,4906	0,00089	0,0894	0,00038
6.28	1,5100	0,00100	1,4918	0,00205	0,0904	0,00030
6.30	1,5122	0,00130	1,4888	0,00286	0,0892	0,00024

A Tabela 10 apresenta os corpos de prova do Teste 7 escolhidos e suas respectivas dimensões.

Tabela 10 - Corpo de prova do Teste 7 selecionadas e suas respectivas dimensões.

Corpo de prova	Altura		Largura		Raio de entalhe	
	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]
7.4	1,4898	0,00239	1,5116	0,00152	0,0911	0,00041
7.7	1,4914	0,00089	1,5104	0,00089	0,0908	0,00017
7.9	1,4924	0,00152	1,5124	0,00114	0,0894	0,00022
7.14	1,4902	0,00045	1,5116	0,00167	0,0895	0,00031
7.21	1,4926	0,00114	1,5100	0,00141	0,0905	0,00019



































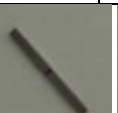





A Tabela 11 apresenta os corpos de prova do Teste 8 escolhidos e suas respectivas dimensões.

Tabela 11 - Corpos de prova do Teste 8 selecionados e suas respectivas dimensões.

Corpo de prova	Altura		Largura		Raio de entalhe	
	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]
8.8	1,5110	0,00255	1,5094	0,00152	0,0893	0,00031
8.9	1,5114	0,00207	1,5114	0,00134	0,0892	0,00019
8.14	1,5118	0,00179	1,5108	0,00130	0,0900	0,00032
8.17	1,5108	0,00148	1,5104	0,00207	0,0896	0,00024
8.18	1,5112	0,00192	1,5100	0,00071	0,0906	0,00043

A Tabela 12 apresenta os corpos de prova escolhidos.

Tabela 12 – Corpos de prova escolhidos para o ensaio de impacto mini Charpy.

Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
							
3	11	1	8	3	19	4	17
							
7	14	25	6	21	28	14	8
							
10	22	4	1	11	21	7	18
							
15	26	10	32	20	30	21	9
							
12	10	5	30	4	27	9	14

Com a seleção dos corpos de prova terminada, deu-se início aos ensaios. É importante frisar que a sala onde ocorreu os ensaios esteve por todo o tempo controlada termicamente. Os ensaios foram realizados em uma temperatura próxima a de 20°C como mostra a Figura 13.





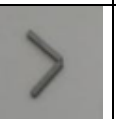
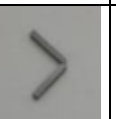
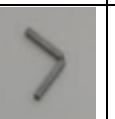
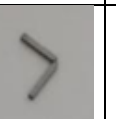
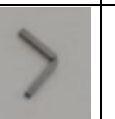
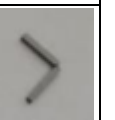


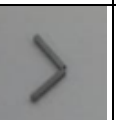
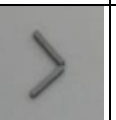
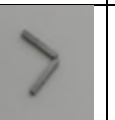
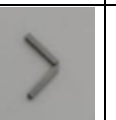
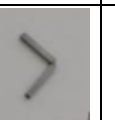
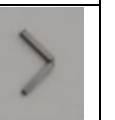


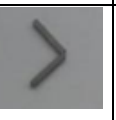
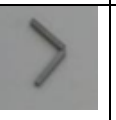
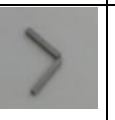
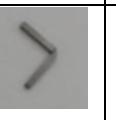
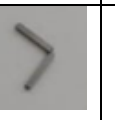
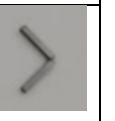










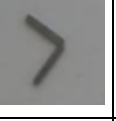
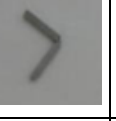
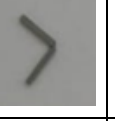

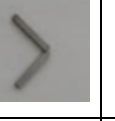

Figura 13 - Termômetro indicando a temperatura da sala de ensaio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante os ensaios, a energia utilizada para causar cada fratura nos corpos de prova foram catalogadas. A Tabela 13 apresenta as amostras já fraturadas, após o ensaio.

Tabela 13 - Corpos de prova após o ensaio.

Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
							
3	11	1	8	3	19	4	17
							
7	14	25	6	21	28	14	8
							
10	22	4	1	11	21	7	18
							
15	26	10	32	20	30	21	9
							
12	10	5	30	4	27	9	14

As Tabelas 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21, apresentam os dados e resultados dos testes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, respectivamente.

Tabela 14 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 1.

Amostra	Ângulo [°]	Vel. Impacto [m/s]	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
3	120,006	3,015529	0,901174	0,787669
7	120,008	3,016196	0,894122	0,785930
10	120,006	3,016532	0,872269	0,764877
15	119,995	3,016272	0,887602	0,781352
12	119,994	3,016218	0,948837	0,845084
Média	120,002	3,016149	0,900800	0,792982
Desvio padrão	0,0067	0,0003718	0,0288980	0,0304865

Tabela 15 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 2.

Amostra	Ângulo [°]	Vel. Impacto [m/s]	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
11	120,0110	3,016875	0,877147	0,771807
14	120,015	3,017067	0,925171	0,821328
22	120,013	3,017422	0,925504	0,821575
26	120,018	3,017185	0,904698	0,800529
10	120,019	3,017378	0,902277	0,798824
Média	120,015	3,017185	0,906959	0,802812
Desvio padrão	0,0033	0,0002255	0,0199460	0,0204775

Tabela 16 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 3.

Amostra	Ângulo [°]	Vel. Impacto [m/s]	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
1	120,018	3,017259	0,919074	0,816975
25	120,019	3,017582	0,916273	0,814026
4	120,004	3,016953	0,924657	0,823284
10	120,004	3,016909	0,921773	0,820552
5	120,017	3,017489	0,905147	0,801939
Média	120,012	3,017238	0,917384	0,815355
Desvio padrão	0,0077	0,0003046	0,0075165	0,0082803

Tabela 17 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 4.

Amostra	Ângulo [°]	Vel. Impacto [m/s]	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
8	120,012	3,017110	0,901528	0,800069
6	120,019	3,017767	0,901539	0,801868
1	120,01	3,017154	0,916445	0,816151
32	120,019	3,017886	0,909293	0,809267
30	120,013	3,017251	0,949072	0,850018
Média	120,015	3,017433	0,915575	0,815474
Desvio padrão	0,0041	0,0003647	0,0197268	0,0203390

Tabela 18 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 5.

Amostra	Ângulo [°]	Vel. Impacto [m/s]	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
3	120,007	3,017241	0,882833	0,782558
21	120,020	3,017692	0,901789	0,802317
11	120,019	3,017551	0,904789	0,804864
20	120,020	3,017744	0,878304	0,777762
4	120,020	3,017881	0,933928	0,835911
Média	120,017	3,017621	0,900328	0,800682
Desvio padrão	0,0057	0,0002434	0,0220347	0,0229948

Tabela 19 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 6.

Amostra	Ângulo [°]	Vel. Impacto [m/s]	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
19	120,015	3,017990	0,925132	0,829366
28	120,019	3,018085	0,919822	0,823658
21	120,019	3,018130	0,903564	0,806737
30	120,019	3,018489	0,887859	0,790872
27	120,020	3,018227	0,914244	0,817355
Média	120,018	3,018184	0,910124	0,813597
Desvio padrão	0,0019	0,0001905	0,0147904	0,0152273

Tabela 20 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 7.

Amostra	Ângulo [°]	Vel. Impacto [m/s]	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
4	120,019	3,018238	0,901076	0,803563
14	120,014	3,017824	0,898347	0,801198
7	120,019	3,018533	0,883882	0,787283
21	120,015	3,018265	0,882757	0,785343
9	120,015	3,019105	0,875617	0,783935
Média	120,016	3,018393	0,888335	0,792264
Desvio padrão	0,0024	0,0004718	0,0109002	0,0093483

Tabela 21 - Dados obtidos dos ensaios dos corpos de prova do teste 8.

Amostra	Ângulo [°]	Vel. Impacto [m/s]	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
17	120,015	3,018461	0,907950	0,812711
8	120,000	3,017708	0,971251	0,877612
18	120,016	3,018784	0,916643	0,824131
9	120,011	3,018089	0,919612	0,825777
14	120,017	3,018385	0,941025	0,846872
Média	120,012	3,018285	0,931296	0,837420
Desvio padrão	0,0070	0,0004066	0,0254328	0,0256292

A Energia AMT foi estimada de acordo com a norma ISO 14556 (ISO, 2015) com a Equação 1:

$$KV = m \cdot g \cdot L \cdot (\cos\beta - \cos\alpha) - E_L \quad (1)$$

Onde, m representa a massa do pêndulo, g é a aceleração gravitacional, L é a distância entre o centro de rotação e o centro de massa do pêndulo, α e β representam os ângulos nas posições inicial e final do pendulo e E_L representa as perdas de energia, que incluem as perdas devido ao atrito nos mancais do pêndulo e à resistência do ar. Neste experimento,

desconsiderou-se as perdas de energia devido à resistência do ar. As perdas devido ao atrito dos mancais do pêndulo E_L foi calculada como mostrado na Equação 2:

$$E_L = \int_{-\alpha}^{\beta} M_a \partial \varphi \quad (2)$$

Onde, M_a é o torque de atrito em função do ângulo φ (resultado da soma dos ângulos α e β).

A Energia AMCR representa a diferença de energia imediatamente antes e imediatamente depois do impacto do pêndulo no corpo de prova. As equações utilizadas para seu cálculo, foram desenvolvidas pela equipe do LTAD, mas, por questão de sigilo, ainda não podem ser divulgadas.

Para o tratamento desses dados foi usada a Análise de Variância (ANOVA). A ANOVA basicamente compara a variabilidade dos dados dentro de grupos com a variabilidade dos dados entre os grupos. Seus resultados apresentam um intervalo de confiança de 95%.

Para a análise da influência da variação da altura e da largura dos corpos de prova foi usada a ANOVA fator duplo com repetições. Para fazer essa análise, foi fixado o raio de entalhe e variadas a altura e a largura dos corpos de prova. Desse modo, a princípio, foram duas ANOVAs. Na primeira (ANOVA 1), foi fixado o raio de entalhe em 0,07 mm e variaram-se a altura e a largura (Testes 1, 2, 3 e 4). Na segunda (ANOVA 2), foi fixado o raio de entalhe em 0,09 mm e variaram-se a altura e a largura (Testes 5, 6, 7 e 8). É importante destacar que, para a análise dos resultados, foi utilizada a energia AMT.

Nas tabelas abaixo, SQ representa a soma dos quadrados, que mede a variação total dos dados. MQ é a média dos quadrados, que é a razão entre a soma dos quadrados e os graus de liberdade, gl . A estatística F é encontrada na tabela de distribuição F de Fisher-Snedecor.

A Tabela 22 apresenta os resultados da ANOVA 1.

Tabela 22 - Resultados obtidos pela ANOVA 1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Altura	2,36444E-05	1	2,36444E-05	0,056343	0,81538	4,493998
Largura	0,0007938	1	0,0007938	1,891557	0,18797	4,493998
Interações	7,93613E-05	1	7,93613E-05	0,189111	0,66946	4,493998
Dentro dos grupos	0,006714468	16	0,000419654			
Total	0,007611274	19				

Na ANOVA 1 nenhum valor-P foi inferior a 0,05, ou seja, menor que o nível de significância estabelecido. Isso significa que, quando fixamos o raio de entalhe em 0,07 mm e variamos as demais dimensões, nenhum fator de controle exerce influência sobre o resultado do ensaio.

A Tabela 23 apresenta os resultados da ANOVA 2.

Tabela 23 - Resultados obtidos pela ANOVA 2.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Altura	0,003478994	1	0,003478994	9,467074	0,00722	4,493998
Largura	0,000105322	1	0,000105322	0,286604	0,59976	4,493998
Interações	0,00137488	1	0,00137488	3,741337	0,07096	4,493998
Dentro dos grupos	0,005879738	16	0,000367484			
Total	0,010838934	19				

Na ANOVA 2, observe que o valor-P relacionado à altura foi inferior a 0,05. Isso significa que, quando fixamos o raio de entalhe em 0,09 mm e variamos as demais dimensões, apenas a altura exerce influência sobre o resultado do ensaio.

Para a análise da influência da variação do raio de entalhe foi usada a ANOVA fator único. Nesse caso, foi fixado a altura e a largura, e variado o raio de entalhe (0,07mm e 0,09 mm). Assim, tivemos quatro diferentes ANOVAs: Na ANOVA 3, a altura e a largura foram fixadas em 1,49 mm. Na ANOVA 4, altura e largura foram fixadas em 1,51 e 1,49 mm,

respectivamente. Na ANOVA 5, altura e largura foram fixadas em 1,49 e 1,51 mm, respectivamente. Por fim, na ANOVA 6, altura e largura foram fixadas em 1,51mm.

As tabelas 24, 25, 26 e 27, apresentam os resultados da ANOVA 3, ANOVA 4, ANOVA 5 e ANOVA 6, respectivamente.

Tabela 24 - Resultados obtidos pela ANOVA 3.

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,57E-07	1	5,57E-07	0,000844	0,977533	5,317655
Dentro dos grupos	0,005283	8	0,00066			
Total	0,005283	9				

Tabela 25 - Resultados obtidos pela ANOVA 4.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,50399E-05	1	2,5E-05	0,081219	0,782891	5,317655
Dentro dos grupos	0,002466412	8	0,000308			
Total	0,002491452	9				

Tabela 26 - Resultados obtidos pela ANOVA 5.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00211	1	0,00211	24,06657	0,001185	5,317655
Dentro dos grupos	0,000701	8	8,77E-05			
Total	0,002811	9				

Tabela 27 - Resultados obtidos pela ANOVA 6.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000618	1	0,000618	1,192802	0,30656	5,317655
Dentro dos grupos	0,004144	8	0,000518			
Total	0,004762	9				

Observa-se que apenas o valor-p da ANOVA 5 foi inferior a 0,05. Isso significa que a variação do raio de entalhe só exerce influência sobre o resultado do ensaio quando a altura e a largura medem 1,49 e 1,51 mm, respectivamente.

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES

Com a análise de variância foi possível identificar quais fatores dimensionais e quando eles exercem influência no resultado do ensaio mini Charpy. Ao longo desse trabalho foi mostrado que fixando o raio de entalhe em 0,07 mm e variando a altura e a largura, não se observou alguma influência no resultado final. Porém, ao fazer o mesmo experimento, mas agora com o raio de entalhe fixado em 0,09 mm, observou-se que o resultado da ANOVA indicou influência nos resultados em função da altura.

Por fim, a variação do raio de entalhe só influenciou o resultado do experimento quando a altura e a largura foram fixados em 1,49 e 1,51 mm, respectivamente. Para as demais dimensões de altura e largura não observou-se alguma influência.

Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar o porquê de apenas algumas combinações causarem a influência nos resultados dos testes.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANTES, L. J. **Avaliação do Desempenho de Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Descargas Elétricas**. 2001. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG.

ARANTES, L. J. **Evaluation of the influence of the recast layer on the energy absorbed during mini Charpy impact test**. 2019

CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. LTC, 2002

COSTA M. V. **Análise da Tenacidade de uma junta soldada de um aço resistente à abrasão da série 450 HB**, 2014.

DUARTE A. S. **Metodologia básica para a produção de materiais de referência para a calibração indireta de máquinas pendulares de impacto Charpy**, 2006

FREIRE, J.M. **Materiais de construção mecânica: Tecnologia mecânica**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1989.

GARCIA A, SPIM J. A, SANTOS C. A. **Ensaio dos Materiais**. V.2. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HO, K.H; NEWMAN, S.T. **State of the art electrical discharge machining (EDM)**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 p. 1287–1300. 2003.

HORATH, L. **Fundamentals of Materials Science for Technologists: Properties, Testing, and Laboratory Exercises**. N. J: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1995.

KOBAYASHI, T., KIM, H. J. and MORITA, S. **Progress and Development in the Instrumented Charpy Impact Test, Mat.** – Wiss. U. Werkstofftech 32, p. 525-531, 2001.

LIMA, E.F. **Rugosidade e Integridade Superficial do Aço Rápido ABNT M2 Após Usinagem por Descargas Elétricas.** 1997. Dissertação de mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 97 pgs.

LUCAS, G. E. **The Development of Small Specimen Mechanical Test Techniques. Journal of Nuclear Materials,** 117, p. 327-339, 1983.

PENCZKOSKI, Diego Paulo. **Current variation influences on Electrical Discharge Machining of AISI 304 Stainless Steel using electrolytic copper electrode.** 2015. 42. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2015.

SOUZA, Sérgio A; **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos.** 5.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982.

TARNG, Y. S.; MA, S.C.; CHUNG, L. K. **Determination of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining.** Int. J. mach. Tools Manufact. Vol. 35. No. 12 p. 1693-1701. 1995.

YOSHIDA, S. **A influência dos processos de eletroerosão no rendimento de ferramentas – Problemas e soluções.** Brasimet comércio e indústria S.A., São Paulo, 2002.

ANEXO A - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO INTERFERÔMETRO**Relatório de calibração do minicharpy.****Documento do Sistema da Qualidade**Página **38** de **4****1. IDENTIFICAÇÃO DA MÁQUINA:**

Minicharpy.

Fabricante: LTAD/UFU

Modelo: MCY-DE-000-01-B

2. RAI DO CUTELO: 2 mm**3. RESPONSÁVEL E ENDEREÇO DE INSTALAÇÃO:****Projeto e Montagem:** Eng. MSc. Fernando Buiatti Rodrigues**Calibração:** Profa Dra. Rosenda Valdés Arencibia

Eng. MSc. Fernando Buiatti Rodrigues

Coordenador: Prof. Sinésio Domingues Franco**Local de instalação:** Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica - Bloco 5F**4. DATA DA VERIFICAÇÃO:**

14 de setembro 2018

5. PADRÕES UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO

6. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

A calibração foi efetuada conforme especificado pelas normas:

- - ABNT NBR ISO 148-2 (ABNT, 2013) intitulada “Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. Parte 2: Verificação de máquinas de ensaio”.
- - ISO 14556, Steel – Charpy V-notch pendulum impact test – Instrumented test method; ISO, Geneva, Switzerland.

Também foram seguidas as recomendações das seguintes normas e documentos:

- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO NM ISO 1: Standard Reference Temperature for Industrial Length Measurement. Geneva: 2016.
- ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração, 2005, 31p
- ASTM E23-12c, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, item A1.6.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, BS EN ISO 148-1:2010. Metallic materials – Charpy pendulum impact test – Part 1: Test method. 2010.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, BS EN ISO 148-3:2008. Metallic materials – Charpy pendulum impact test – Part 3: Preparation and characterization of Charpy V-notch test pieces for indirect verification of pendulum impact machines. 2008.
- JCGM 100:2008. Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva Switzerland: Bureau International des Poids et Mesures; 2008.

7. RESULTADOS

7.1. VERIFICAÇÃO DIRETA

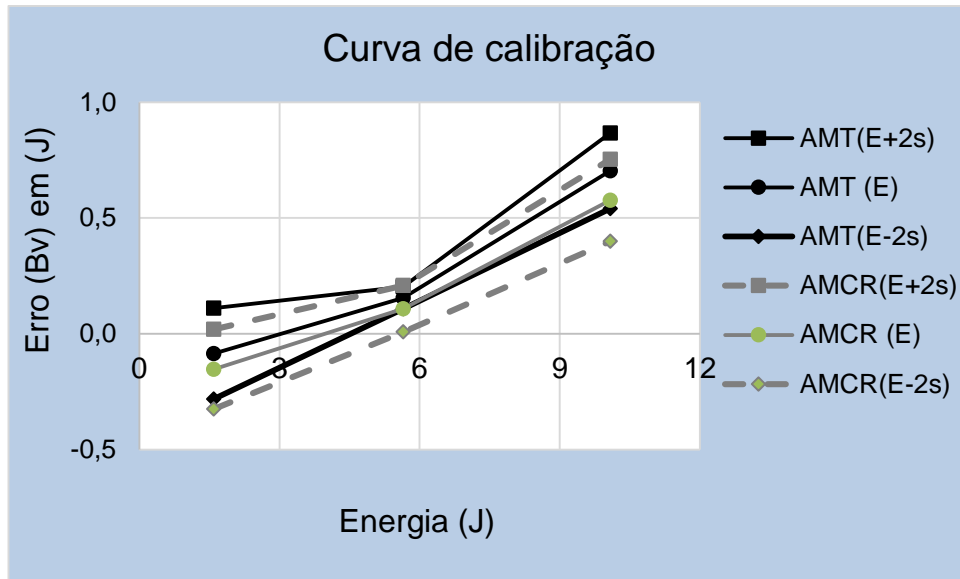


Figura 1: Curva de calibração

8. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t-Student com ν_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95 %.

9. **NOTA:** Temperatura ambiente de $21,0 \pm 1,0$ °C