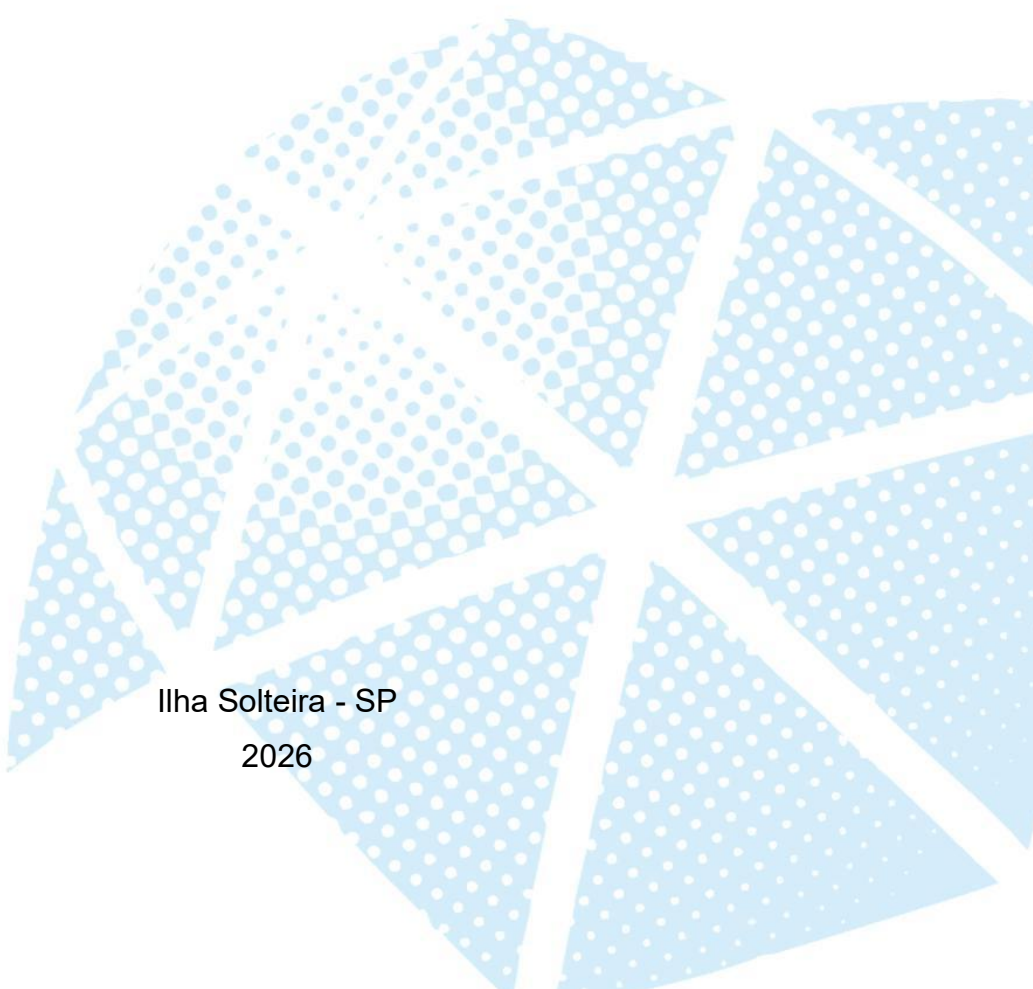


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

José Guilherme Leite César

**Calibração de termopares tipo T utilizados em experimento didático para
aferição de temperatura em corpos submersos**

Ilha Solteira - SP
2026



José Guilherme Leite César

**Calibração de termopares tipo T utilizados em experimento didático para
aferição de temperatura em corpos submersos**

TCC apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), "JÚLIO DE MESQUITA FILHO", Ilha Solteira, para obtenção do título de Grau acadêmico Bacharel em Engenharia mecânica.

Área de Concentração: Engenharia mecânica

Orientador(a): Prof. Dr. Eloy Esteves Gasparin

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C421c César, José Guilherme Leite.
Calibração de termopares tipo T utilizados em experimento didático para
aferição de temperatura em corpos submersos / José Guilherme Leite César. --
Ilha Solteira: [s.n.], 2026
41 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2026

Orientador: Elóy Esteves Gasparin

Inclui bibliografia

1. Calibração de termopar. 2. Aferição de temperatura em corpos
submersos. 3. Regressão linear. 4. Método comparativo. 5. Termopar tipo T.

ANEXO 02
MODELO DE ATA DE DEFESA

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Calibração de Termopares tipo T utilizados em experimento didático para aferição de temperatura em corpos submersos

ALUNO: José Guilherme Leite César RA: 171052692

Orientador: Prof. Dr. Elóy Esteves Gasparin

Aprovado (X) – Reprovado () pela Comissão Examinadora

Nota obtida: 5.0

Comissão Examinadora:

Prof. _____
Presidente (Orientador)  Documento assinado digitalmente
HENRIQUE MATOS CAMPOS
Data: 24/02/2026 18:10:04-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. _____
Me. Henrique Matos Campos  Documento assinado digitalmente
JOAO AUGUSTO DA COSTA TERILLI
Data: 25/02/2026 14:18:59-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. _____
Eng. João Augusto da Costa Terilli  Documento assinado digitalmente
JOSE GUILHERME LEITE CESAR
Data: 25/02/2026 12:24:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Assinatura do Aluno

Ilha Solteira (SP) 24 de fevereiro de 2026

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus pela oportunidade de ter apresentado este trabalho e pela minha saúde.

Quero agradecer minha família. Mãe, obrigado por tudo! Você me ensinou a ser forte e feliz, me ensinou que sempre podemos ser melhores. Pai, obrigado pelo suporte nas minhas decisões, só assim eu pude chegar aonde estou e consigo olhar para frente. Meu padrasto Renato, obrigado pelo apoio e orientação, foi fundamental para eu poder percorrer esta caminhada.

Vó Olinda, obrigado pelo carinho e dedicação. Vó Lourdes, obrigado pelo companheirismo e compreensão, vocês vão estar sempre no meu coração. Vô César, obrigado pela inspiração. Espero que você esteja orgulhoso, você sempre vai estar vivo em meus pensamentos.

Cristieli, obrigado pela companhia durante esses anos. Você fez parte, lado a lado, de cada dia dessa história.

Aos moradores e ex-moradores da república Casa da Mãe Joana, meus companheiros de sala João Augusto, Filipe, Mateus e Lucas, obrigado pela parceria. Seguiremos vencendo, irmãos! Sempre unidos.

Quero agradecer meus professores. Prof. Eloy, obrigado pelo seu empenho e profissionalismo. Prof. Leandro, Prof. Gasche e Prof. Silvia, obrigado pela disposição e orientação. Aos demais, obrigado pelos desafios e preparação. Unesp, obrigado pela formação.

Por fim, quero agradecer a Equipe Fênix Racing de Fórmula SAE e ao projeto Cursinho Diferencial de Ilha Solteira pela oportunidade de me desenvolver em ambientes fabulosos.

RESUMO

O trabalho apresenta a calibração de termopares tipo T utilizados em experimentos didáticos feitos em laboratório, para aferição de temperatura em corpos submersos. Neste trabalho o objetivo foi levantar a curva de calibração de 4 termopares tipo T. Essas curvas serão utilizadas nos materiais didáticos para aulas de laboratório. A bancada experimental do trabalho consistiu em um banho ultratermostatizado com temperatura regulada entre o intervalo de 28° a 40° para mergulhar 4 cilindros metálicos. Cada cilindro estava conectado em uma extremidade de um termopar. A outra extremidade estava posicionada dentro de uma garrafa térmica com gelo e pouca água, para que fosse admitida a temperatura de referência de 0°C. Para se conectar a extremidade da temperatura de referência com cada cilindro, foi adicionada ao circuito uma chave seletora. Para obter as medidas de ddp, foi conectado um multímetro ao circuito. O intervalo de temperatura analisado foi de 28°C a 40°C, com o intervalo de medidas de 1°C. Foram utilizados três cilindros de alumínio e um de cobre e foram realizados um total de 5 medições, sendo 5 em processo de aquecimento e 5 de resfriamento. Com a ferramenta da regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, foram levantadas 4 curvas de calibração com coeficientes de determinação (R^2) próximos de 1,0 e erros percentuais menores que 4,2%. Os resultados indicaram que os termopares apresentaram comportamentos similares as curvas de calibração obtidas pelo trabalho foram satisfatórias na representação do comportamento dos termopares.

Palavras-chave: Calibração de termopar; aferição de temperatura em corpos submersos; regressão linear; método comparativo; termopar tipo T.

ABSTRACT

The work presents the calibration of type T thermocouples used in didactic experiments carried out in the laboratory for measuring temperature in submerged bodies. In this study, the objective was to establish the calibration curve of four type T thermocouples. These curves will be used in teaching materials for laboratory classes. The experimental setup consisted of an ultra-thermostatic bath with temperature regulated between 28°C and 40°C, in which four metallic cylinders were immersed. Each cylinder was connected at one end to a thermocouple. The other end was placed inside a thermal bottle with ice and a small amount of water, so that the reference temperature of 0°C could be admitted. To connect the reference temperature end with each cylinder, a selector switch was added to the circuit. To obtain the voltage measurements, a multimeter was connected to the circuit. The analyzed temperature range was from 28°C to 40°C, with measurements taken at 1°C intervals. Three aluminum cylinders and one copper cylinder were used, and a total of five measurements were performed—five during heating and five during cooling. Using linear regression with the least squares method, four calibration curves were obtained with determination coefficients (R^2) close to 1.0 and percentage errors lower than 4.2%. The results indicated that the thermocouples showed similar behavior, and the calibration curves obtained in this work were satisfactory in representing the thermocouples' performance.

Keywords: Thermocouple calibration; temperature measurement in submerged bodies; linear regression; comparative method; type T thermocouple.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da influência da temperatura ($T_1 > T_2$) sobre a pressão exercida por um gás em recipientes conectados a tubos com líquido.....	1
Figura 2 – Diagrama esquemático representativo de um termopar tipo T.....	3
Figura 3 – Diagrama esquemático do experimento de calibração de termopares.....	9
Figura 4 – Fluxograma do trabalho.....	9
Figura 5 – Cilindros posicionados dentro do banho ultratermostatizado.....	10
Figura 6 – Instrumentos utilizados para execução do trabalho e coleta de dados.....	10
Figura 7 – Curva resultante do processo de calibração do corpo 1.....	18
Figura 8 – Curva resultante do processo de calibração do corpo 2.....	18
Figura 9 – Curva resultante do processo de calibração do corpo 3.....	19
Figura 10 – Curva resultante do processo de calibração do corpo 4.....	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos cilindros metálicos.....	7
Tabela 2 – Dados calculados do Corpo 1.....	15
Tabela 3 – Dados calculados do Corpo 2.....	16
Tabela 4 – Dados calculados do Corpo 3.....	16
Tabela 5 – Dados calculados do Corpo 4.....	17
Tabela 6 - Desvios padrão e valores RMS calculados.....	20
Tabela 7 – Temperatura média dos termopares.....	21
Tabela 8 – Erro percentual das temperaturas calculadas.....	22
Tabela A.1 - Dados de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 1.....	26
Tabela A.2 - Dados de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 1.....	26
Tabela A.3 - Dados de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 2.....	27
Tabela A.4 - Dados de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 2.....	27
Tabela A.5 - Dados de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 3.....	28
Tabela A.6 - Dados de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 3.....	28
Tabela A.7 - Dados de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 4.....	29
Tabela A.8 - Dados de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 4.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Cu	Cobre
Fe	Ferro
FEM	Força Eletromotriz
Ddp	Diferença de potencial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ISO/IEC	International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission
RMS	Root Mean Square (Valor Quadrático Médio)
SAE	Society of Automotive Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

x_i	Cada valor do conjunto
N	Número total de valores
$\sum x_i^2$	Soma dos quadrados dos valores
μ	Média populacional
σ	Desvio padrão populacional
RMS	Valor quadrático médio (Root Mean Square)
Y	Temperatura
X	Ddp
a	Intercepto da regressão linear (valor de Y quando $X = 0$)
b	Coeficiente angular da regressão (variação de Y por unidade de X)
c	Erro (diferença entre valor previsto e real)
$u_c(y)$	Incerteza combinada da variável y

SUMÁRIO

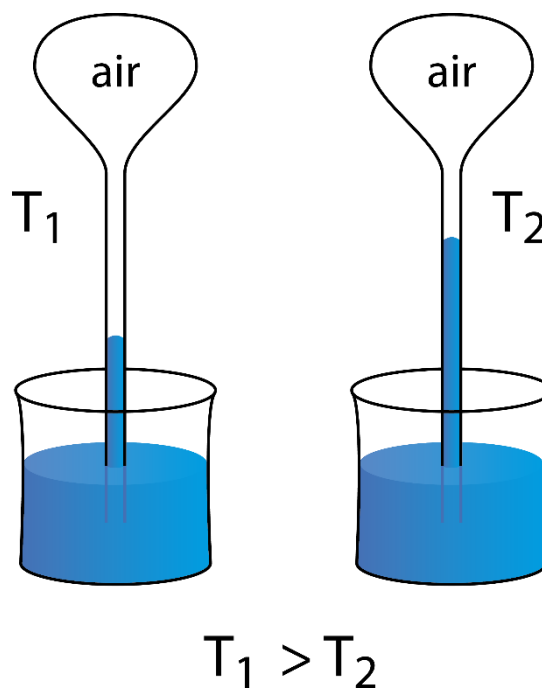
1.	INTRODUÇÃO	1
2.	METODOLOGIA	7
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
4.	CONCLUSÃO	24
5.	REFERÊNCIAS.....	25
6.	APÊNDICE.....	26

1. INTRODUÇÃO

A medição de temperatura é uma das práticas mais importantes em processos industriais e laboratoriais, sendo essencial para o controle de qualidade, segurança e eficiência de sistemas térmicos. Dentre os diversos instrumentos utilizados para esse fim, os termopares se destacam por sua simplicidade construtiva, ampla faixa de operação e custo relativamente baixo.

O termopar é um termômetro, porém não foi o primeiro tipo de termômetro inventado na história. As primeiras ideias de termômetros vieram no Séc. XVI, quando se criaram protótipos de instrumentos que mediam variações térmicas (termoscópios).

Figura 1 – Representação esquemática da influência da temperatura ($T_1 > T_2$) sobre a pressão exercida por um gás em recipientes conectados a tubos com líquido.



Fonte: Produção do próprio autor

O termoscópio conseguia identificar a diferença de temperatura entre corpos, porém não era possível quantificar, visto que naquela época ainda não existiam as escalas de temperatura. Só em 1612, o médico italiano Santorio conseguiu adaptar um termoscópio para que fosse possível quantificar a temperatura em corpos humanos.

Em 1714 surgiu o termômetro de mercúrio desenvolvido por Gabriel Fahrenheit, o mesmo cientista que desenvolveu a escala Fahrenheit.

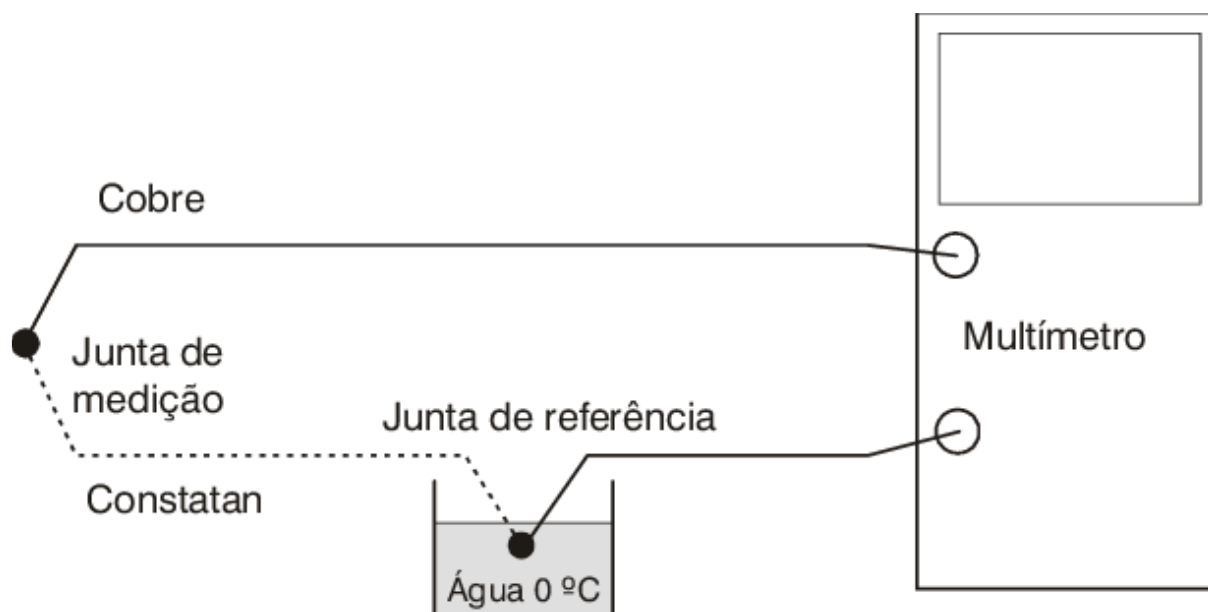
Já a escala Celsius foi proposta em 1742, utilizando como referências os pontos de congelamento e ebulição da água. Em contraste com a escala Fahrenheit, a escala Celsius é utilizada pela maioria dos países como escala padrão, exceto pelo Estados Unidos, Mianmar e Libéria.

Os termopares foram descobertos em 1821 pelo cientista Thomas Johann Seebeck. O físico descobriu que a junção de dois metais diferentes gera uma corrente elétrica quando submetida a uma diferença de temperatura. Utilizando um par de condutores metálicos de naturezas diferentes, ligando-os pelas suas extremidades e posicionando cada extremidade a uma fonte de calor diferente, o cientista conseguiu correlacionar a tensão gerada pelos metais com a diferença de temperatura. Para que fosse possível medir a temperatura de um determinado corpo com o termopar, é necessário que uma das extremidades fosse posicionada em um local com a temperatura conhecida. Essa extremidade é chamada junção de referência (Por exemplo, posicionar a junção de referência em um recipiente com água e gelo em equilíbrio para admitir a temperatura de referência seja 0°C). A outra extremidade, chamada junção de medição, é posicionada nos locais que se deseja medir a temperatura e, com isso, uma diferença de potencial (ddp) proporcional a diferença de temperatura entre as junções é observada. Esse efeito ficou conhecido como efeito Seebeck, nome dado em homenagem ao físico. (FERREIRA, 2005).

Os termopares se destacam entre os termômetros pela sua simplicidade e robustez, possuindo a vantagem de seu funcionamento não depender de uma alimentação elétrica externa. Os termopares podem ser confeccionados de diversos materiais metálicos, sendo que cada par metálico apresenta uma aplicação específica, atendendo a diferentes faixas de temperatura e resistindo a exposições de ambientes oxidantes e insalubres. Estes sensores são classificados por tipos padronizados, identificados por letras como K, J, T, E, N, R, S e B, onde cada letra classifica o par metálico que o termopar é constituído. (GARCIA, 2021).

Conforme a Marinha do Brasil (s.d.), os termopares tipo T, de cobre (Cu) e constantan (liga cobre e níquel), são recomendados a operar em temperaturas entre -270°C a 400°C, apresentando melhor desempenho e menor margem de erro. Também podem ser usados em atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo.

Figura 2 – Diagrama esquemático representativo de um termopar tipo T



Fonte: Produção do próprio autor

Para que seja possível associar a tensão Seeback ao valor de temperatura a ser medido, todo termopar deve possuir sua curva de calibração, o que consiste em uma equação que representa o comportamento da temperatura em função da tensão Seeback medida.

Apesar de sua robustez, o desempenho dos termopares pode ser comprometido por fatores como oxidação dos condutores, contaminação, interferência eletromagnética e falhas de instalação. Por essa razão, a calibração é essencial para garantir a confiabilidade dos dados lidos (FERREIRA, 2005).

Para realizar a calibração de um termopar e levantar sua curva de calibração, uma das maneiras é utilizar o método comparativo para executar o processo. Este método consiste na comparação direta do termopar em calibração com um termômetro de referência, ambos submetidos à mesma condição térmica em um meio termicamente estável (ROSA et al., 2021).

No método comparativo, o termopar a ser calibrado e o termômetro padrão (ou sensor de referência) são posicionados lado a lado em um bloco metálico ou banho térmico que garanta a homogeneidade da temperatura. A temperatura de interesse é mantida por um sistema de controle térmico. A leitura de tensão termoelétrica (em milivolts) é registrada e, por meio da correlação entre a temperatura do banho térmico e a tensão termoelétrica registrada pelo multímetro, levantou-se a curva de calibração

do termopar a ser calibrado. (LIMA et al., 2020). A calibração deve ser realizada em diversos pontos da faixa de operação do termopar, permitindo a construção de uma curva de calibração. É fundamental neste processo que o meio térmico utilizado se encontre em condições controladas para evitar erros sistemáticos durante a calibração.

O método comparativo também é recomendado por atender às diretrizes da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração, que regula a competência técnica de laboratórios de ensaio e calibração, sendo uma metodologia comumente empregada em laboratórios metrológicos. A principal limitação do método está relacionada à necessidade de um sensor padrão confiável e à estabilidade do ambiente térmico utilizado, o que pode demandar equipamentos especializados, como fornos de calibração ou banhos termostatizados de alta precisão (SOUZA et al., 2018).

Após a coleta dos dados, estes são correlacionados para obter as curvas de calibração dos termopares, podendo a correlação dos dados ser feita através do modelo de regressão linear e os coeficientes do modelo são calculados pelo método dos mínimos quadrados. Com isso, é possível levantar uma curva de calibração descrevendo-a por uma equação, na qual se ingressa a tensão Seeback e se obtém a temperatura da extremidade de medição.

A regressão linear é uma técnica usada para analisar a relação entre variáveis, permitindo estimar como uma variável dependente (Y) se comporta em função de uma ou mais variáveis independentes (X). No caso deste trabalho, o método utilizado foi uma regressão linear simples, sendo relacionada a variável dependente Temperatura do corpo em função da Diferença de potencial lida pelo multímetro.

Para determinar os coeficientes da equação, o método dos mínimos quadrados é a técnica para encontrar a melhor aproximação de uma função ou conjunto de dados, minimizando os erros quadráticos. Ele se baseia em conceitos de álgebra linear e projeções ortogonais, e é amplamente usado em regressão linear, ajuste de curvas e estatística, oferecendo uma abordagem sistemática para lidar com essas incertezas, permitindo a obtenção de modelos que descrevem com precisão o comportamento dos dados.

Para certificar de que a curva de calibração tem uma representação satisfatória do comportamento do termopar, foi feita uma análise estatística, a fim de calcular os

valores RMS de cada curva, bem como o desvio padrão. A teoria do valor RMS em estatística é utilizada para a análise de dados que variam em direções positivas e negativas. O RMS é uma medida estatística que fornece a média significativa de quantidades variáveis. O resultado é um valor não negativo que reflete a intensidade dos valores em causa. O RMS é preferido em muitos campos porque tem em conta tanto a magnitude como a direção dos valores, oferecendo uma imagem mais abrangente do que as médias simples. (MONTGOMERY et al., 2012)

Já o desvio padrão se destaca como uma medida de dispersão que quantifica a variabilidade dos dados em relação à média aritmética. Sua aplicação é fundamental para compreender a precisão de medições, a estabilidade de sistemas e a consistência de materiais e componentes. Essa medida permite identificar o grau de dispersão dos dados, sendo útil para avaliar a repetibilidade de experimentos e a qualidade de processos industriais. O desvio padrão é uma das estatísticas mais importantes para o controle de qualidade, pois permite monitorar a variabilidade de um processo ao longo do tempo. (MONTGOMERY et al., 2012)

Na prática da engenharia mecânica, o desvio padrão é aplicado em diversas situações, como na análise de resistência de materiais, no controle dimensional de peças, na avaliação de vibrações mecânicas e na calibração de instrumentos. A correta interpretação dessa medida estatística contribui para decisões técnicas mais seguras e embasadas, além de permitir a identificação de possíveis fontes de erro ou inconsistência nos dados coletados. (MONTGOMERY et al., 2012)

Utilizando essas ferramentas de análise, é possível compreender se a curva de calibração obtida pelo trabalho correlaciona de forma fiel a temperatura a ser medida dos corpos com a diferença de potencial gerada.

1.1. Objetivo

Este trabalho tem o propósito de levantar a curva de calibração de termopares tipo T que serão utilizados em experimentos didáticos para aferição de temperatura em corpos submersos.

1.2. Motivação

A ideia do trabalho se apoiou no fato de que os termopares sofrem desgaste com o uso e o desgaste interfere nas medidas. Os termopares calibrados neste trabalho são usados para realizar um experimento didático presente em uma disciplina

da graduação em engenharia mecânica, e o experimento consiste em medir a temperatura de corpos metálicos submersos em um banho com temperatura controlada. A utilização contínua dos termopares provoca oxidação e corrosão em seus fios, bem como vibrações e choques mecânicos podem influenciar na precisão e confiabilidade, alterando sua resposta.

Com isso, a calibração destes instrumentos deve ser feita para garantir a sua usabilidade.

2. METODOLOGIA

Na primeira etapa de execução do trabalho, foi montada a bancada experimental. A bancada experimental foi composta por:

- 1 banho ultratermostatizado ColdLab;
- 1 multímetro digital Minipa ET-2700;
- 1 chave seletora;
- 1 garrafa térmica com gelo e água;
- 4 termopares tipo T;
- 4 cilindros metálicos;

Utilizou-se a garrafa térmica contendo água com gelo para ter a função de estabelecer a temperatura de referência, adotada como 0°C, e posicionar a junção fria. Para coletar os dados de FEM, foi conectado em série ao circuito o multímetro digital Minipa ET-2700 e a chave seletora. A chave seletora possibilitou conectar mais de um termopar na mesma junção de referência. Os cilindros metálicos utilizados no experimento foram 3 cilindros de alumínio e 1 cilindro de cobre. A Tabela 1 apresenta as dimensões geométricas dos cilindros utilizados no trabalho.

Tabela 1 – Dimensões geométricas dos cilindros

Cilindro	Material	D (mm) $\pm 0,5$	L (mm) $\pm 0,5$
1	Alumínio	50,0	200,0
2	Alumínio	50,0	85,0
3	Alumínio	35,0	200,0
4	Cobre	50,0	200,0

Fonte: Produção do próprio autor

A montagem do circuito consistiu em conectar um termopar tipo T em cada cilindro e posicionar os 4 cilindros dentro do reservatório do banho ultratermostatizado. Em seguida, preencheu-se o reservatório com água até que os cilindros ficassem completamente submersos.

Para conectar os termopares, utilizou-se a chave seletora. A chave seletora possibilitou conectar as extremidades ligadas aos cilindros com a junção de referência, que foi posicionada dentro da garrafa térmica com gelo e água.

Para fechar o circuito, conectou-se o multímetro digital Minipa ET-2700 em série ao circuito. Assim, foi possível medir a tensão de Seeback produzida por cada termopar, alterando as conexões pela chave seletora.

Com o circuito montado, iniciou-se o processo de aquecimento e coleta de dados. Foi preparado o banho ultratermostatizado com água inicialmente a 28°C.

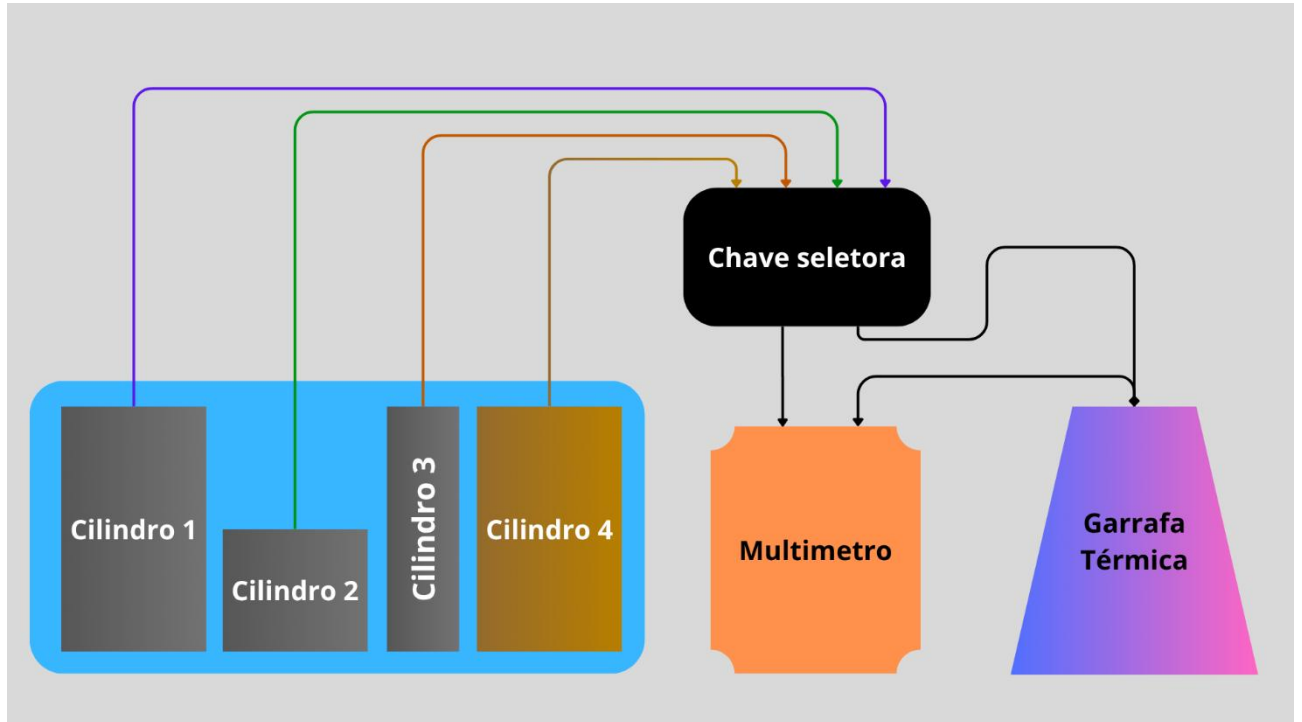
Para garantir o equilíbrio térmico entre os cilindros e a água, aguardou-se por volta de 2 minutos após o banho atingir a temperatura e, também, observou-se o comportamento da medida mostrada pelo multímetro. Quando a medida estabilizou em um valor, admitiu-se que o equilíbrio térmico com a água foi atingido e o valor de ddp foi anotado junto com a temperatura do banho. Em seguida a temperatura do banho foi aumentada em 1°C e repetiu-se o processo de aguardar e observar a ddp estabilizar para 29°C. Quando o equilíbrio térmico foi atingido, anotou-se os dados. O procedimento foi repetido sistematicamente em intervalos de 1 °C, até atingir 40 °C.

Após atingida a temperatura limite da análise, o processo de resfriamento foi iniciado. Começando dos 40°C, a temperatura do banho foi diminuída em 1°C e, quando atingiu-se a temperatura desejada, repetiu-se o processo do equilíbrio térmico e anotou-se os dados. Os intervalos de temperatura também foram de 1°C, até atingir a temperatura de 28°C. A amostra de temperatura determinada foi de 28°C a 40°C pelo fato de que o banho ultratermostatizado conseguiu atingir a temperatura máxima de aquecimento de 40°C.

Os procedimentos de aquecimento e resfriamento foram realizados 5 vezes, uma por dia, a fim de coletar dados suficientes para realizar uma análise estatística e viabilizar o experimento. A execução do procedimento completo levou cerca de 25 horas, sendo 5 horas para cada dia de execução. A Figura 4 ilustra os cilindros posicionados dentro do banho ultratermostatizado ColdLab.

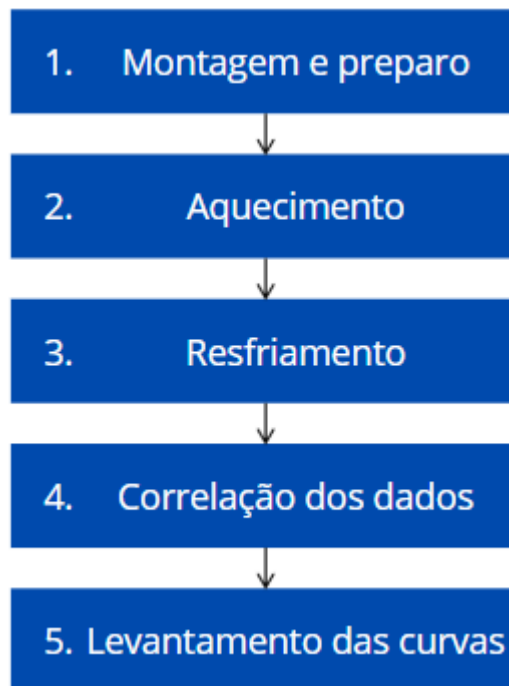
Na Figura 3 é possível observar um diagrama esquemático da montagem da bancada experimental.

Figura 3 – Diagrama esquemático do experimento de calibração de termopares



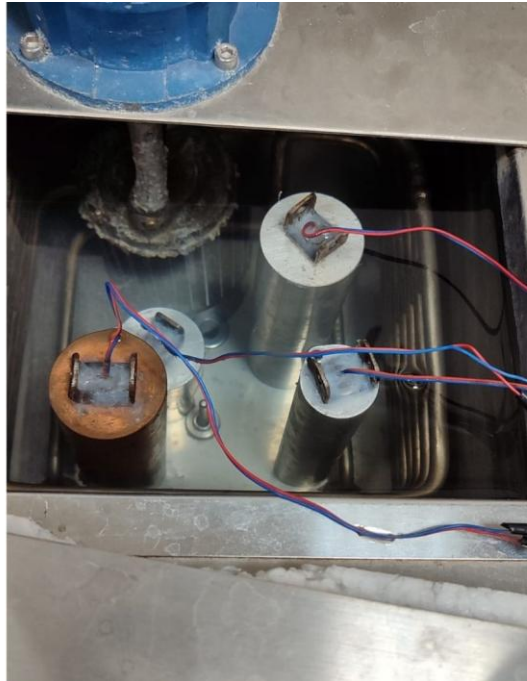
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 4 – Fluxograma do trabalho



Fonte: Produção do próprio autor

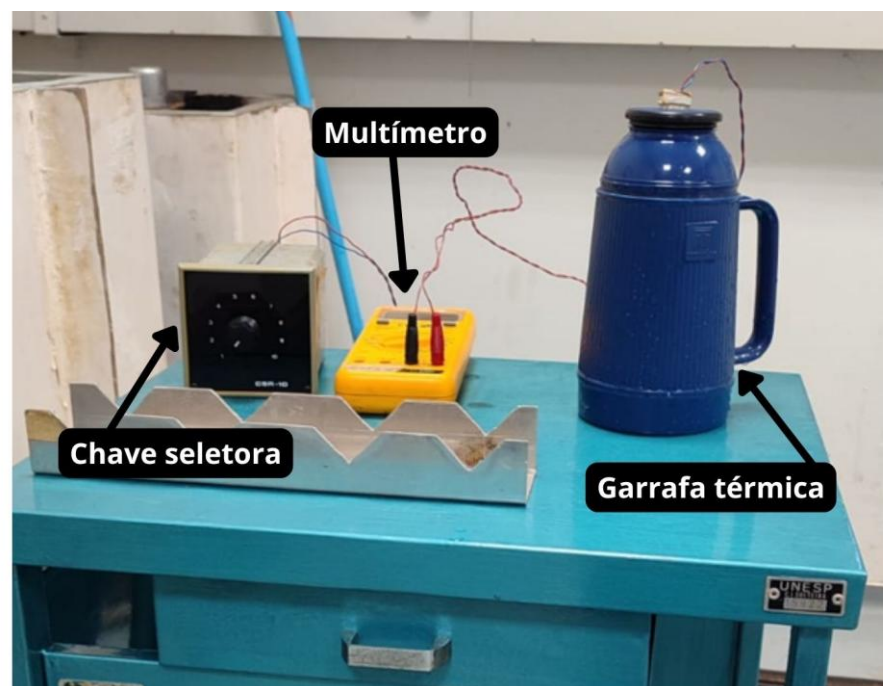
Figura 5 – Cilindros posicionados dentro do banho ultratermostático



Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 6 ilustra o multímetro, a chave seletora e a garrafa térmica utilizadas no trabalho.

Figura 6 – Instrumentos utilizados para execução do trabalho e coleta de dados



Fonte: Produção do próprio autor.

Com todos os dados coletados, foi utilizado o Excel para dispor os dados em tabelas e levantar as curvas de calibração de cada termopar analisado. Os cálculos das incertezas e desvios foram realizados também pelo Excel e, com as informações, foram levantados gráficos para obter a curva de calibração para cada termopar.

A relação foi modelada pela Equação (1).

$$Y = a + b.X + c \quad 1$$

onde:

- Y é a variável dependente, neste caso a temperatura do corpo,
- X é a variável independente, neste caso a diferença de potencial,
- a é o intercepto (valor de Y quando X=0),
- b é o coeficiente angular (indica quanto Y varia para cada unidade de X),
- c é o erro (diferença entre o valor previsto e o real).

2.1. MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O método dos mínimos quadrados, Equação (2) foi utilizado porque permite encontrar o melhor ajuste de um modelo matemático aos dados observados, minimizando os erros (resíduos) entre valores previstos e reais.

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \quad (2)$$

onde:

- y_i representa o valor observado (dados reais, medidos ou coletados).
- $f(x_i)$ representa o valor estimado ou previsto pelo modelo (função ajustada).
- $[y_i - f(x_i)]$ representa o resíduo ou erro para cada observação (diferença entre o valor observado e o valor previsto).
- $\sum_{i=1}^n$ representa a soma de todos os resíduos (ou dos quadrados dos resíduos) para as n observações.
- S representa a função objetivo (soma dos quadrados dos resíduos).

No caso da regressão linear simples, onde se busca ajustar uma reta, os coeficientes são determinados por meio da minimização da função, resultando em um sistema de equações conhecido como equações normais. A solução desse sistema fornece os parâmetros ótimos que melhor descrevem a tendência dos dados.

2.2.DETERMINAÇÃO DAS INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

Para se validar a curva de calibração dos termopares foi necessário realizar cálculos das incertezas que compõe os intervalos de dados.

A incerteza do tipo A é obtida por métodos estatísticos, sendo baseada na análise de observações repetidas da mesma grandeza sob condições controladas. A estimativa é feita por meio do cálculo do desvio padrão da média dos valores medidos, apresentados na Equação (3).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (3)$$

onde:

- s representa o desvio padrão,
- n representa a quantidade de observações,
- $\sum_{i=1}^n$ representa a soma de todos os termos, indo do primeiro até o enésimo elemento.
- x_i representa o valor individual de cada observação,
- μ representa a média populacional (valor médio de todos os x_i).
- $(x_i - \mu)$ representa o desvio de cada valor em relação à média,
- $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2$ representa a variância populacional,

Com o desvio padrão calculado, a incerteza tipo μ_a é calculada pela Equação (4).

$$\mu_a = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

onde:

- s representa o desvio padrão da amostra.
- n representa o número de observações da amostra.

Já a incerteza do tipo μ_b é estimada de acordo com especificações de fabricantes de instrumentos, certificados de calibração, literatura técnica ou experiência prévia. No caso deste experimento, a incerteza tipo B foi calculada analisando a resolução da medida de temperatura do banho ultratermostatizado e utilizando a Equação (5).

$$\mu_b = \frac{0,05}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

A incerteza combinada μ_c é uma representação da incerteza padrão total associada ao resultado da medição, associando os valores calculados das incertezas tipo A e tipo B pela Equação (6).

$$\mu_c = \sqrt{\mu_a^2 + \mu_b^2} \quad (6)$$

onde:

- μ_a representa a incerteza do tipo A.
- μ_b representa a incerteza do tipo B.

O valor RMS foi calculado utilizando a Equação (8)

O valor RMS, utilizou-se a Equação (8):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (8)$$

onde:

- RMS representa o Valor RMS (raiz da média dos quadrados).
- x_i^2 representa cada valor individual da série ou sinal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, estão dispostos em tabela os dados calculados dos experimentos. As tabelas 2 a 5 ilustram os valores calculados para os termopares 1 a 4 que estão conectados aos cilindros 1 a 4 respectivamente.

Tabela 2 – Valores médios de tensão do termopar 1 relacionados com a temperatura do banho.

Temperatura (°C) $\pm 0,1$	Ddp (mV) $\pm 0,01$
28,0	1,01
29,0	1,06
30,0	1,11
31,0	1,15
32,0	1,19
33,0	1,23
34,0	1,27
35,0	1,31
36,0	1,35
37,0	1,39
38,0	1,43
39,0	1,47
40,0	1,50

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 3 – Valores médios de tensão do termopar 2 relacionados com a temperatura do banho.

Temperatura (°C) $\pm 0,1$	Ddp (mV) $\pm 0,01$
28,0	1,01
29,0	1,06
30,0	1,11
31,0	1,15
32,0	1,19
33,0	1,23
34,0	1,27
35,0	1,31
36,0	1,35
37,0	1,39
38,0	1,43
39,0	1,47
40,0	1,50

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 4 – Valores médios de tensão do termopar 3 relacionados com a temperatura do banho.

Temperatura (°C) $\pm 0,1$	Ddp (mV) $\pm 0,01$
28,0	0,98
29,0	1,04
30,0	1,10
31,0	1,14
32,0	1,19
33,0	1,23
34,0	1,27
35,0	1,32
36,0	1,36
37,0	1,40
38,0	1,44
39,0	1,48
40,0	1,52

Fonte: Elaborado pelo Autor

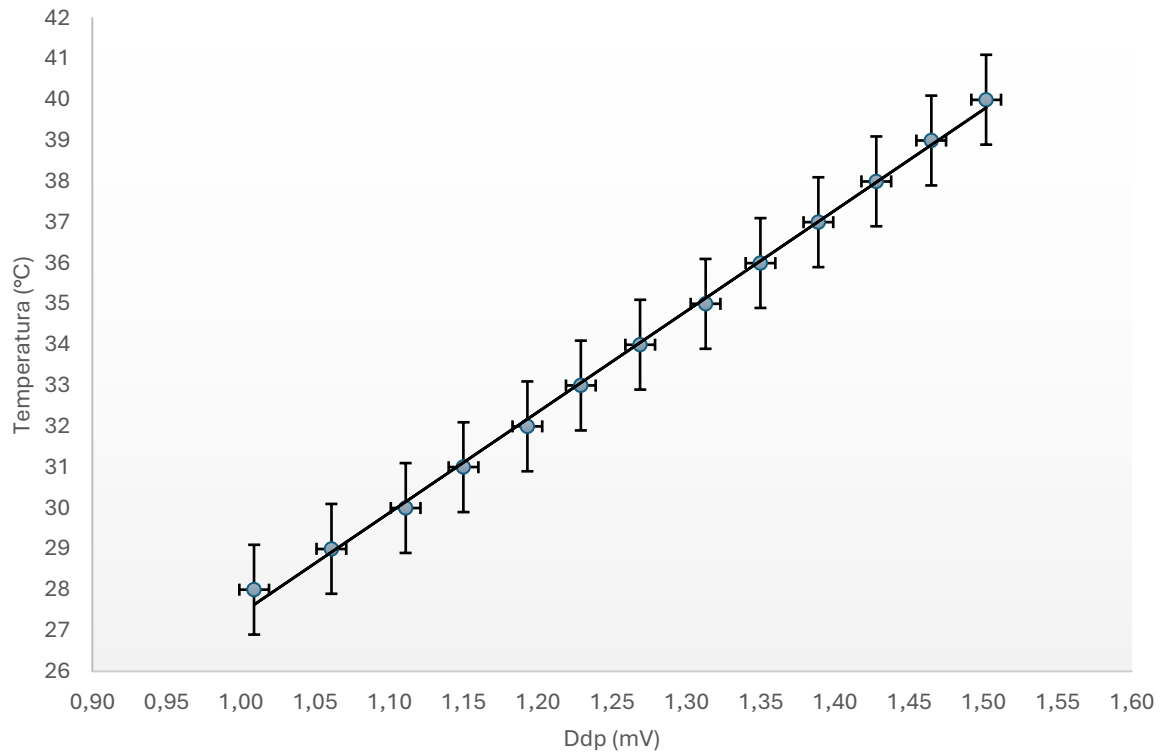
Tabela 5 – Valores médios de tensão do termopar 4 relacionados com a temperatura do banho.

Temperatura (°C) $\pm 0,1$	Ddp (mV) $\pm 0,01$
28,0	1,01
29,0	1,06
30,0	1,11
31,0	1,15
32,0	1,19
33,0	1,23
34,0	1,27
35,0	1,31
36,0	1,35
37,0	1,39
38,0	1,43
39,0	1,47
40,0	1,50

Fonte: Elaborado pelo Autor

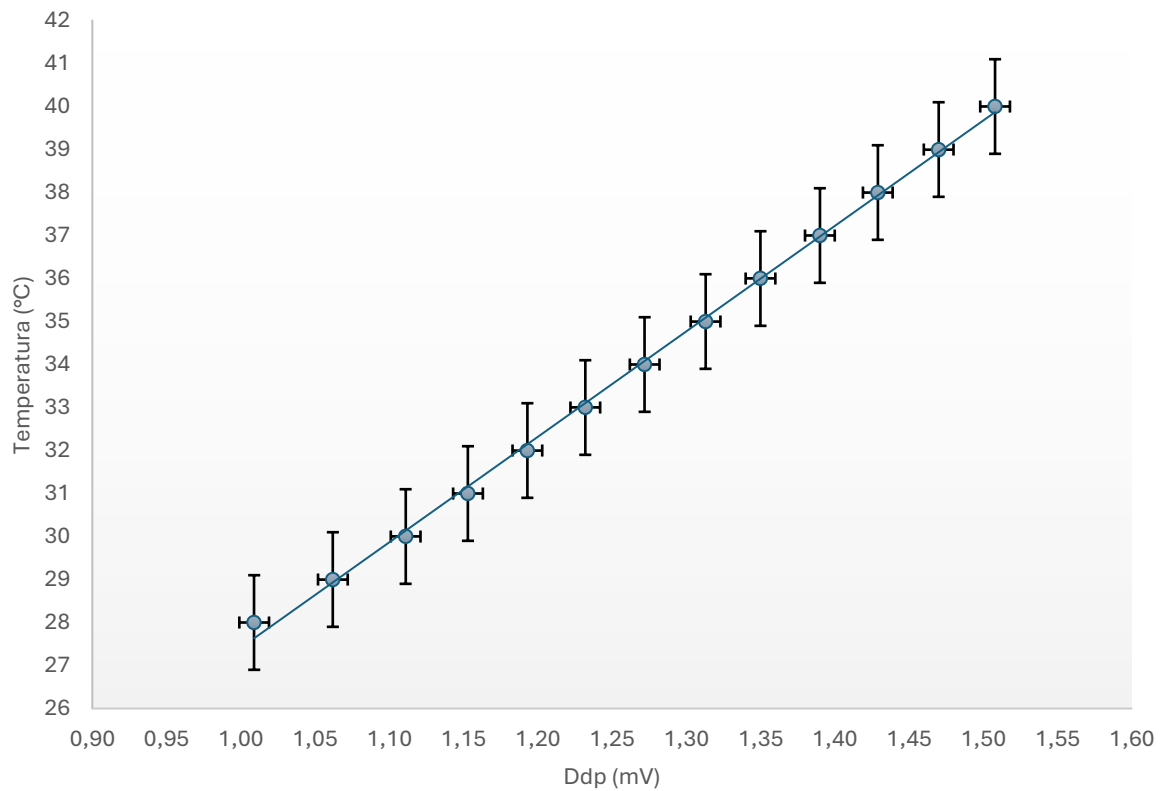
Então foram levantadas as curvas de distribuição da temperatura (T) em função da ddp (mV) utilizando o Excel. As figuras 7 a 10 representam as curvas de calibração resultantes.

Figura 7 – Curva resultante do processo de calibração do termopar 1



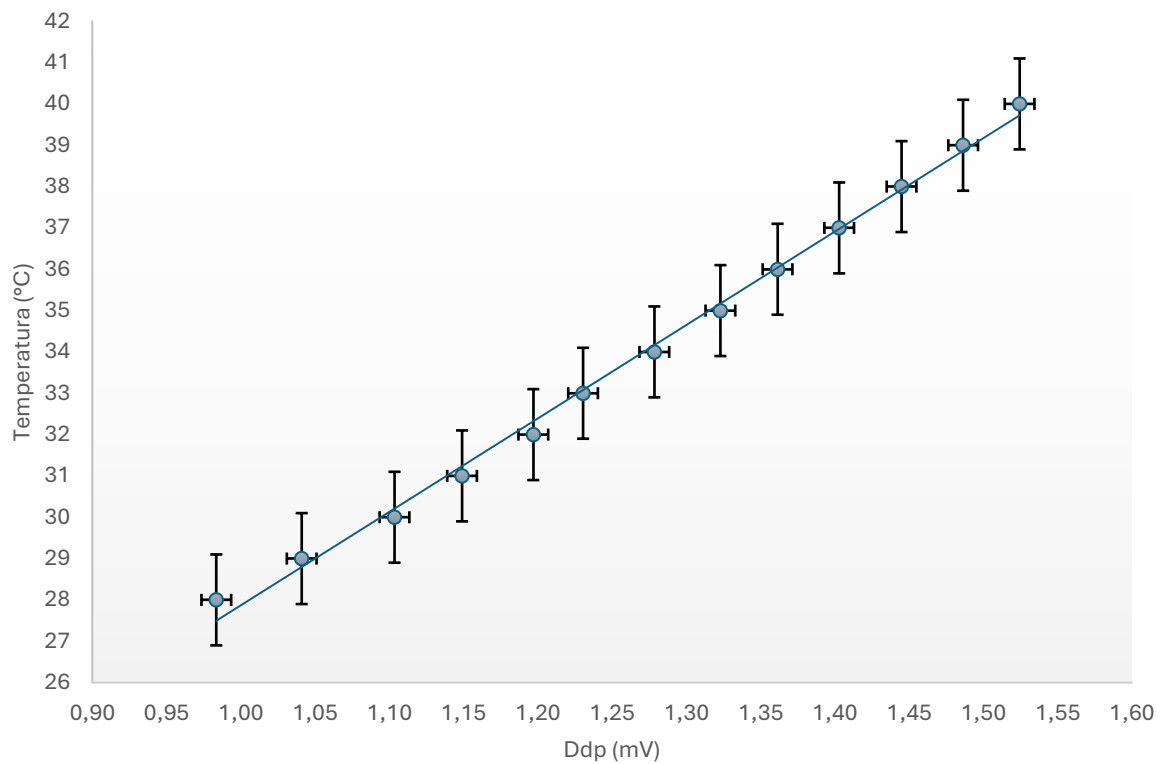
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 8 – Curva resultante do processo de calibração do termopar 2



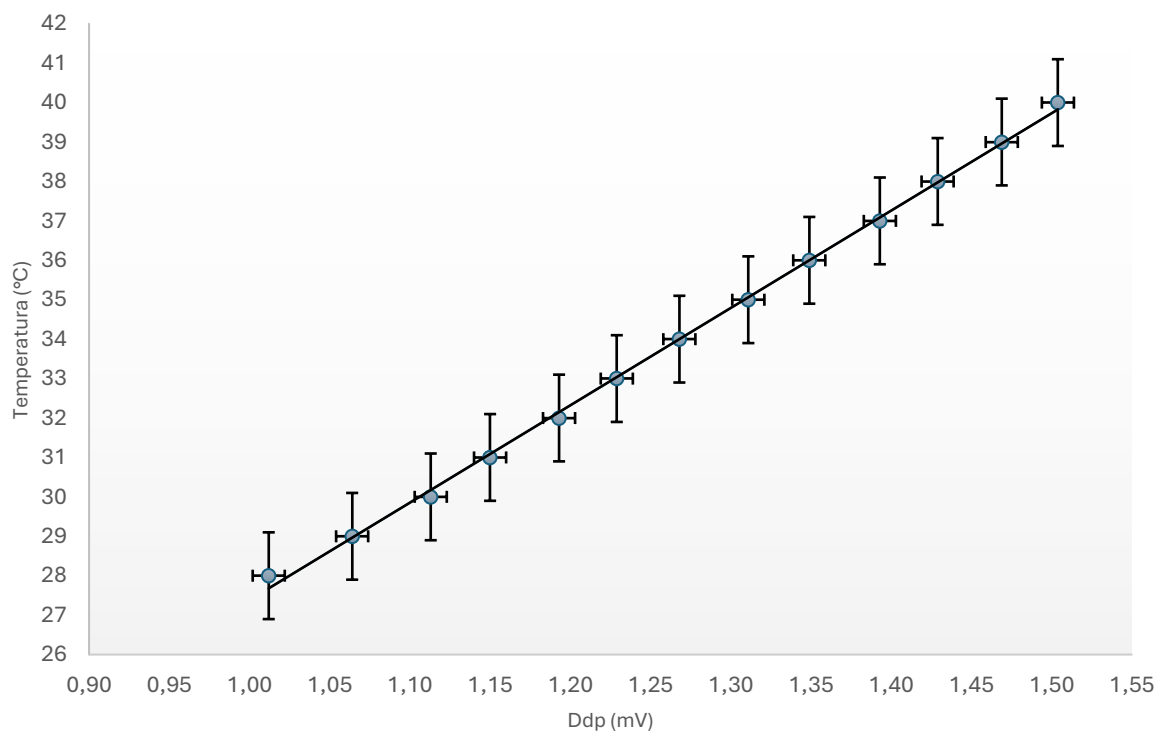
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 9 – Curva resultante do processo de calibração do termopar 3



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 10 – Curva resultante do processo de calibração do termopar 4



Fonte: Produção do próprio autor

Com as equações (3) e (4) foram calculados os desvios padrão e os valores RMS para cada termopar, sendo os dados estão dispostos na Tabela 6

Tabela 6 – Desvios padrão e valores RMS calculados

Termopar	RMS (°C)	Desvio padrão(°C)
Termopar 1	1,14	3,5
Termopar 2	1,14	3,5
Termopar 3	1,09	3,3
Termopar 4	1,15	3,5

Fonte: Produção do próprio autor

Com as curvas de calibração levantadas, foi possível obter as equações que representam as curvas de calibração e o coeficiente de determinação de cada termopar a partir dos gráficos. As Equações (9), (10), (11) e (12) apresentam as curvas de calibração dos termopares de 1 a 4 e o seu respectivo coeficiente de determinação.

Termopar 1:

$$Y(T) = 24,69 \cdot x(mV) + 2,73 \pm 1,14 \quad (9)$$

$$R^2 = 0,9984$$

Termopar 2:

$$Y(T) = 24,52 \cdot x(mV) + 2,89 \pm 1,14 \quad (10)$$

$$R^2 = 0,9986$$

Termopar 3:

$$Y(T) = 22,60 \cdot x(mV) + 5,27 \pm 1,09 \quad (11)$$

$$R^2 = 0,9964$$

Termopar 4:

$$Y(T) = 24,69 \cdot x(mV) + 2,70 \pm 1,15 \quad (12)$$

$$R^2 = 0,9989$$

Ao analisar as equações obtidas, bem como a Tabela 6, notou-se uma proximidade nos coeficientes calculados. O comportamento similar dos termopares foi esperado, visto que são termopares do mesmo tipo e a calibração deles foi realizada simultaneamente.

A coleta dos dados foi realizada em um período de 5 dias, cada dia foi realizado um processo de aquecimento e um processo de resfriamento para os 4 termopares. Os dados estão dispostos nas Tabelas A.1 a A.8, no apêndice deste trabalho. No caso do termopar 3, o desvio padrão foi menor que todos os outros calculados, indicando que os dados referentes ao termopar 3 tinham uma variação menor em relação à média dos dados.

A Tabela 7 apresenta as temperaturas de referência, obtidas pelo banho ultratermostatizado e a média das temperaturas de cada termopar, calculadas a partir das equações obtidas no trabalho.

Tabela 7 – Temperatura média dos termopares

Temp. referência (°C) ± 0,1	Termopar 1 (mV) ± 0,03	Termopar 2 (mV) ± 0,03	Termopar 3 (mV) ± 0,03	Termopar 4 (mV) ± 0,03
28,0	27,64	27,64	28,19	27,70
29,0	28,93	28,94	29,37	28,99
30,0	30,16	30,15	30,51	30,20
31,0	31,12	31,19	31,44	31,11
32,0	32,19	32,18	32,47	32,17
33,0	33,07	33,14	33,29	33,06
34,0	34,06	34,13	34,24	34,02
35,0	35,15	35,14	35,18	35,08
36,0	36,06	36,05	35,98	36,02
37,0	37,02	37,04	36,89	37,11
38,0	37,99	38,00	37,78	38,00
39,0	38,90	39,02	38,64	38,98
40,0	39,81	39,95	38,37	39,85

Fonte: Produção do próprio autor

Já a Tabela 8 apresenta o erro percentual das temperaturas calculadas em relação às temperaturas de referência.

Tabela 8 – Erro percentual das temperaturas calculadas

Temp. referência (°C) $\pm 0,1$	Termopar 1 (%)	Termopar 2 (%)	Termopar 3 (%)	Termopar 4 (%)
28,0	4,1	4,1	3,9	4,2
29,0	3,9	3,9	3,7	4,0
30,0	3,8	3,8	3,6	3,8
31,0	3,6	3,7	3,5	3,7
32,0	3,5	3,5	3,3	3,6
33,0	3,4	3,4	3,3	3,5
34,0	3,3	3,3	3,2	3,4
35,0	3,2	3,2	3,1	3,3
36,0	3,1	3,2	3,0	3,2
37,0	3,1	3,1	2,9	3,1
38,0	3,0	3,0	2,9	3,0
39,0	2,9	2,9	2,8	3,0
40,0	2,9	2,9	2,8	2,9

Fonte: Produção do próprio autor

Analisando a Tabela 8, é possível observar que os erros percentuais não ultrapassaram 4,2%. Considerando que a medição de temperatura em laboratório será para fins didáticos, não havendo a necessidade de um controle preciso de temperatura (nível industrial), os resultados apresentados são satisfatórios para a utilização das curvas de calibração no experimento didático de aferição de temperatura em corpos submersos.

Para o R^2 , os 4 termopares apresentaram valores próximos a 1, indicando que as curvas levantadas pelo modelo estatístico utilizado propõem uma representação satisfatória dos dados coletados neste trabalho.

Analisando o circuito, a presença da chave seletora no circuito para interligar as junções de medição com a junção de referência, bem como a dissipação de calor na tampa da garrafa térmica (que foi adaptada para poder inserir a junção de referência dentro da garrafa) agregam nos valores dos erros percentuais encontrados. Também é válido citar sobre o erro de distribuição aleatória, que está presente nos dados e influenciaram nos valores dos erros percentuais.

Com isso, as Equações (9), (10), (11) e (12) serão utilizadas para os Termopares 1 a 4 são, respectivamente:

Termopar 1:

$$Y(T) = 24,69 \cdot x(mV) + 2,73 \pm 1,14 \quad (9)$$

Termopar 2:

$$Y(T) = 24,52 \cdot x(mV) + 2,89 \pm 1,14 \quad (10)$$

Termopar 3:

$$Y(T) = 22,60 \cdot x(mV) + 5,27 \pm 1,09 \quad (11)$$

Termopar 4:

$$Y(T) = 24,69 \cdot x(mV) + 2,70 \pm 1,15 \quad (12)$$

Também válido citar que a precisão dos termopares analisados não deve expressar grandezas decimais, visto que o desvio das medidas é próximo a 1°C. A apresentação das equações com escala centesimal deixa claro que as equações não são idênticas.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho alcançou com êxito seu objetivo de levantar curvas de calibração para termopares tipo T utilizados em uma bancada experimental de aferição de temperatura em corpos submersos. A aplicação do método comparativo, aliado ao controle térmico do banho ultratermostatizado e a análise estatística permitiu obter equações de calibração com incertezas próximas a 1°C e coeficientes de determinação próximos de 1. Com o trabalho realizado a banca didática terá acesso às equações das curvas de calibração dos termopares.

A utilização de ferramentas como multímetro, chave seletora e banho ultratermostatizado proporcionou um ambiente controlado e adequado para a coleta de dados, enquanto a análise estatística, incluindo a média RMS das incertezas das temperaturas, desvio padrão e incerteza combinada, assegurou a validade dos resultados obtidos.

Uma sugestão a ser feita para encontrar equações com maior precisão seria de aumentar o tamanho da amostra de temperatura, gerando uma faixa de análise com maior número de pontos. Outra ação a ser tomada para minimizar os erros seria fazer uma calibração individual dos termopares, simplificando o circuito para que houvesse menos dispositivos influenciando nas medidas.

A calibração periódica de termopares não possui um padrão universal pois varia de acordo com o uso do dispositivo. Termopares que são utilizados com maior frequência, bem como aqueles que são utilizados em processos mais agressivos (como ambientes oxidantes, fornos, exposição a vibrações) exigem períodos menores entre as calibrações. Este trabalho realizou a calibração de termopares que são utilizados em aulas de laboratório, as quais não submetem os termopares em questão a utilização severa. Sendo assim, recomenda-se realizar a calibração desses termopares anualmente para garantir a precisão das medidas.

5. REFERÊNCIAS

FERREIRA, J. M. Princípios de termometria e calibração de sensores. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

GARCIA, J. Instrumentação industrial: sensores e aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora Técnica, 2021.

LIMA, D. M.; CARDOSO, J. C.; SILVA, R. A.; SANTOS, M. A. Calibration of thermocouples by the comparative method using a thermoelectric calibration furnace. *Measurement*, v. 168, p. 108313, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108313>.

MARINHA DO BRASIL. Estudo sobre termopares: princípios, tipos e aplicações em processos industriais e navais. Rio de Janeiro: Diretoria de Portos e Costas, [s.d.]. Disponível em: <https://repositorio.marinha.mil.br/bitstream/ripcmb/843925/1/00000544.pdf>.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

PIRES, D. P. L.; AFONSO, J. C.; CHAVES, F. A. B. *A termometria nos séculos XIX e XX*. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 1, p. 101-114, 2006. Disponível em: <http://sbfisica.org.br/rbef/pdf/v28_101.pdf>.

ROSA, A. P.; OLIVEIRA, J. L.; ALMEIDA, F. B.; MARTINS, C. H. Evaluation of thermocouple calibration methods: Comparative analysis of fixed-point and comparison techniques. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 145, p. 213-220, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09795-6>.

SOUZA, F. R.; CARVALHO, M. T.; ANDRADE, L. P.; COSTA, R. G. Procedimentos para calibração de termopares conforme requisitos da norma ISO/IEC 17025. *Revista Metrologia & Instrumentação*, n. 72, p. 30-36, 2018.

6. APÊNDICE

Tabela A.1 – Valores de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 1

Temperatura (°C) ± 0,1	Curva 1 AQ ± 0,05	Curva 2 AQ ± 0,05	Curva 3 AQ ± 0,05	Curva 4 AQ ± 0,05	Curva 5 AQ ± 0,05
28,0	0,76	1,05	0,88	0,96	0,95
29,0	0,81	1,11	0,96	1,03	1,03
30,0	0,86	1,17	1,01	1,18	1,07
31,0	0,90	1,21	1,05	1,22	1,11
32,0	0,93	1,26	1,12	1,27	1,18
33,0	0,97	1,29	1,16	1,30	1,24
34,0	1,01	1,33	1,22	1,34	1,29
35,0	1,05	1,38	1,26	1,38	1,35
36,0	1,08	1,42	1,30	1,45	1,38
37,0	1,11	1,46	1,37	1,48	1,43
38,0	1,16	1,51	1,42	1,52	1,49
39,0	1,21	1,55	1,46	1,56	1,52
40,0	1,25	1,60	1,50	1,60	1,56

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela A.2 – Valores de ddp coletados do processo de resfriamento do cilindro 1

Temperatura (°C) ± 0,1	Curva 1 RE ± 0,05	Curva 2 RE ± 0,05	Curva 3 RE ± 0,05	Curva 4 RE ± 0,05	Curva 5 RE ± 0,05
40,0	1,25	1,60	1,50	1,60	1,56
39,0	1,21	1,54	1,48	1,58	1,54
38,0	1,18	1,49	1,45	1,55	1,51
37,0	1,16	1,47	1,41	1,52	1,48
36,0	1,12	1,44	1,37	1,49	1,45
35,0	1,09	1,41	1,35	1,45	1,41
34,0	1,05	1,35	1,32	1,41	1,37
33,0	1,01	1,33	1,28	1,38	1,33
32,0	0,99	1,29	1,25	1,34	1,30
31,0	0,95	1,26	1,22	1,31	1,27
30,0	0,91	1,22	1,18	1,27	1,24
29,0	0,89	1,19	1,16	1,23	1,20
28,0	0,85	1,16	1,12	1,20	1,16

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela A.3 – Valores de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 2

Temperatura (°C) ± 0,1	Curva 1 AQ ± 0,05	Curva 2 AQ ± 0,05	Curva 3 AQ ± 0,05	Curva 4 AQ ± 0,05	Curva 5 AQ ± 0,05
28,0	0,74	1,06	0,89	0,95	0,96
29,0	0,79	1,10	0,97	1,02	1,02
30,0	0,84	1,16	1,00	1,16	1,05
31,0	0,89	1,21	1,04	1,21	1,10
32,0	0,91	1,25	1,13	1,28	1,18
33,0	0,97	1,29	1,14	1,30	1,26
34,0	1,00	1,34	1,23	1,35	1,30
35,0	1,04	1,37	1,27	1,37	1,34
36,0	1,09	1,41	1,31	1,43	1,37
37,0	1,12	1,47	1,36	1,50	1,43
38,0	1,15	1,51	1,41	1,52	1,49
39,0	1,22	1,55	1,46	1,54	1,54
40,0	1,24	1,59	1,51	1,62	1,58

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela A.4 – Valores de ddp coletados do processo de resfriamento do cilindro 2

Temperatura (°C) ± 0,1	Curva 1 RE ± 0,05	Curva 2 RE ± 0,05	Curva 3 RE ± 0,05	Curva 4 RE ± 0,05	Curva 5 RE ± 0,05
40,0	1,26	1,62	1,51	1,61	1,57
39,0	1,23	1,55	1,48	1,59	1,55
38,0	1,19	1,48	1,46	1,54	1,52
37,0	1,17	1,46	1,40	1,53	1,49
36,0	1,11	1,43	1,37	1,50	1,46
35,0	1,09	1,40	1,34	1,46	1,42
34,0	1,06	1,36	1,31	1,42	1,38
33,0	1,01	1,33	1,29	1,39	1,34
32,0	0,99	1,28	1,26	1,33	1,31
31,0	0,96	1,25	1,23	1,32	1,28
30,0	0,90	1,23	1,19	1,27	1,23
29,0	0,89	1,20	1,15	1,23	1,21
28,0	0,84	1,18	1,11	1,19	1,17

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela A.5 – Valores de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 3

Temperatura (°C) ± 0,1	Curva 1 AQ ± 0,05	Curva 2 AQ ± 0,05	Curva 3 AQ ± 0,05	Curva 4 AQ ± 0,05	Curva 5 AQ ± 0,05
28,0	0,74	1,05	0,88	0,97	0,95
29,0	0,80	1,10	0,97	1,04	1,03
30,0	0,85	1,16	1,02	1,19	1,07
31,0	0,91	1,21	1,06	1,22	1,11
32,0	0,92	1,27	1,12	1,28	1,19
33,0	0,96	1,29	1,17	1,31	1,24
34,0	1,02	1,34	1,23	1,35	1,30
35,0	1,06	1,39	1,27	1,40	1,35
36,0	1,08	1,43	1,30	1,47	1,38
37,0	1,11	1,47	1,36	1,49	1,44
38,0	1,16	1,50	1,43	1,52	1,49
39,0	1,20	1,56	1,46	1,57	1,52
40,0	1,25	1,61	1,50	1,61	1,56

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela A.6 – Valores de ddp coletados do processo de resfriamento do cilindro 3

Temperatura (°C) ± 0,1	Curva 1 RE ± 0,05	Curva 2 RE ± 0,05	Curva 3 RE ± 0,05	Curva 4 RE ± 0,05	Curva 5 RE ± 0,05
40,0	1,26	1,10	1,51	1,60	1,58
39,0	1,22	1,55	1,49	1,57	1,56
38,0	1,19	1,50	1,46	1,55	1,52
37,0	1,17	1,46	1,41	1,53	1,49
36,0	1,13	1,43	1,37	1,49	1,45
35,0	1,10	1,40	1,35	1,45	1,41
34,0	1,06	1,36	1,32	1,42	1,37
33,0	1,02	1,34	1,29	1,39	1,34
32,0	1,00	1,30	1,24	1,35	1,32
31,0	0,95	1,27	1,22	1,30	1,29
30,0	0,92	1,22	1,19	1,27	1,24
29,0	0,90	1,19	1,17	1,23	1,20
28,0	0,85	1,17	1,12	1,20	1,18

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela A.7 – Valores de ddp coletados do processo de aquecimento do cilindro 4

Temperatura (°C) ± 0,1	Curva 1 AQ ± 0,05	Curva 2 AQ ± 0,05	Curva 3 AQ ± 0,05	Curva 4 AQ ± 0,05	Curva 5 AQ ± 0,05
28,0	0,76	1,06	0,90	0,96	0,96
29,0	0,80	1,12	0,98	1,04	1,03
30,0	0,85	1,18	1,03	1,17	1,08
31,0	0,89	1,22	1,07	1,23	1,10
32,0	0,92	1,27	1,14	1,26	1,19
33,0	0,96	1,30	1,18	1,31	1,23
34,0	1,00	1,34	1,24	1,33	1,28
35,0	1,04	1,39	1,28	1,37	1,36
36,0	1,07	1,43	1,32	1,46	1,37
37,0	1,10	1,47	1,39	1,49	1,44
38,0	1,16	1,51	1,44	1,53	1,48
39,0	1,21	1,56	1,47	1,57	1,53
40,0	1,25	1,61	1,51	1,61	1,57

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela A.8 – Valores de ddp coletados do processo de resfriamento do cilindro 4

Temperatura (°C) ± 0,1	Curva 1 RE ± 0,05	Curva 2 RE ± 0,05	Curva 3 RE ± 0,05	Curva 4 RE ± 0,05	Curva 5 RE ± 0,05
40,0	1,24	1,59	1,51	1,59	1,56
39,0	1,21	1,54	1,49	1,57	1,54
38,0	1,17	1,49	1,46	1,54	1,51
37,0	1,15	1,46	1,42	1,53	1,48
36,0	1,11	1,44	1,36	1,48	1,45
35,0	1,07	1,40	1,35	1,44	1,41
34,0	1,04	1,35	1,33	1,40	1,37
33,0	1,00	1,32	1,29	1,37	1,33
32,0	0,98	1,28	1,26	1,33	1,30
31,0	0,94	1,25	1,23	1,30	1,27
30,0	0,90	1,23	1,19	1,26	1,24
29,0	0,88	1,18	1,17	1,24	1,20
28,0	0,85	1,15	1,13	1,19	1,16

Fonte: Produção do próprio autor