



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VI - POETA PINTO DO MONTEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E EXATAS
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM MATEMÁTICA**

JOSÉ JOEL FELIPE FERREIRA SOARES

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO
TÉRMICA LINEAR DE SÓLIDOS METÁLICOS UTILIZANDO
CONCEITOS DA GEOMETRIA PLANA E DE ARCOS E
ÂNGULOS**

**MONTEIRO
2023**

JOSÉ JOEL FELIPE FERREIRA SOARES

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO
TÉRMICA LINEAR DE SÓLIDOS METÁLICOS UTILIZANDO
CONCEITOS DA GEOMETRIA PLANA E DE ARCOS E
ÂNGULOS**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado à coordenação do curso de Licenciatura em Matemática do Centro de Ciências Humanas e Exatas da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências legais para a obtenção do título de Graduado no Curso de Licenciatura Plena em Matemática.

Área de concentração: Matemática aplicada

Orientador: Prof. Me. Robson Batista de Sousa

MONTEIRO

2023

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S676d Soares, Jose Joel Felipe Ferreira.
Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear de sólidos metálicos utilizando conceitos da geometria plana e de arcos e ângulos [manuscrito] / Jose Joel Felipe Ferreira Soares. - 2023.
39 p. : il. colorido.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Matemática) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Humanas e Exatas, 2023.
"Orientação : Prof. Me. Robson Batista de Sousa, Coordenação do Curso de Matemática - CCHE. "

1. Dilatação térmica. 2. Coeficiente de dilatação linear. 3. Corpos metálicos. I. Título

21. ed. CDD 516.23

JOSÉ JOEL FELIPE FERREIRA SOARES

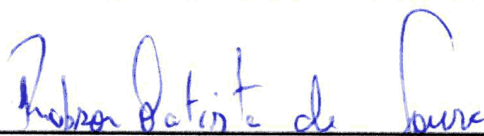
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA
LINEAR DE SÓLIDOS METÁLICOS UTILIZANDO CONCEITOS DA
GEOMETRIA PLANA E DE ARCOS E ÂNGULOS

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado
à coordenação do curso de Licenciatura em
Matemática do Centro de Ciências Humanas e
Exatas da Universidade Estadual da Paraíba,
em cumprimento às exigências legais para a
obtenção do título de Graduado no Curso de
Licenciatura Plena em Matemática.

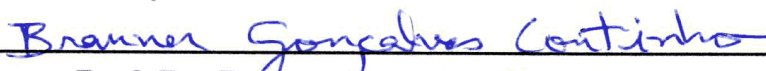
Área de concentração: Matemática aplicada

Aprovada em: 02/05/2023.

BANCA EXAMINADORA




Prof. Me. Robson Batista de Sousa
Orientador



Prof. Dr. Brauner Gonçalves Coutinho
Examinador interno (CCHE/UEPB)



Prof. Dr. Thiago Silva Araújo
Examinador externo (E.E.E.F.M. Murilo Braga)



Este trabalho é dedicado às crianças adultas que, quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, primeiramente, por proporcionar-me forças e sabedoria todos os dias. Agradeço a minha mãe, minha esposa, meu filho e meus irmãos por sempre continuarem apoiando-me nas lutas diárias, aos meus amigos e colegas que fazem parte da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, campus VI.

Aos profissionais que fazem parte da UEPB. Especialmente ao Prof. Me. Robson Batista de Sousa, por ajudar-me no desenvolvimento desse trabalho como orientador e amigo, aos Prof. Dr. Brauner Gonçalves Coutinho e ao Prof. Dr. Thiago Silva Araújo, por aceitarem participar da banca examinadora desse TCC, e contribuírem de certa forma para esse trabalho de conclusão de curso.

Agradeço a Diego Jonathan Bezerra Silva (aluno do curso de Licenciatura em Matemática-UEPB-CCHE) por ter me ajudado na confecção de duas Tabelas do meu TCC.

Agradeço ao Departamento de Física do campus I da UEPB, por ceder o equipamento utilizado na Pesquisa.

“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo, mas transformai-vos pela renovação da mente, a fim de distinguir qual é a vontade de Deus: o que é bom, o que lhe é agradável, o que é perfeito.”
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)

RESUMO

O comportamento termodinâmico da matéria é de interesse físico e possui muitas aplicações em engenharia, física, biologia, etc. A dilatação térmica é uma das características macroscópicas relevantes, observada quando um material - seja sólido, líquido ou gasoso - é exposto a variações de temperatura. Com o presente trabalho objetiva-se determinar o coeficiente de dilatação linear de alguns sólidos metálicos (ferro, alumínio e latão). De acordo com a abordagem do problema, essa pesquisa enquadrou-se como quantitativa e foi dividida em três fases: (I) a bibliográfica; (II) a de obtenção dos dados via kit (da PHYWE) de dilatação linear de corpos metálicos e (III) a de tratamento estatístico dos dados. Do ponto de vista dos resultados, destacamos que os parâmetros físicos dos coeficientes de dilatação linear dos sólidos metálicos estudados nesse trabalho, foram comparados com os apresentados na literatura e demonstraram-se compatíveis.

Palavras-chave: Dilatação térmica. Coeficiente de dilatação linear. Corpos metálicos.

ABSTRACT

The thermodynamic behavior of matter is a physics interest and has a lot of applications in engineering, physics, biology, etc. Thermal Expansion is one of the relevant macroscopic characteristics, observed when a material- whether it be solid, liquid or gas – is exposed to temperature variations. This work's main objective was to determine the linear expansion coefficient of some metallic solids (copper, aluminum and brass). According to the problem's approach, this research fit in as quantitative and it was divided in three phases: (I) bibliographic; (II) data obtaining through a set (PHYWE) of linear expansion of metallic bodies and (III) statistical treatment of the data. From the point of view of the results, it is highlighted the physical parameters of linear expansion coefficient of metallic solids researched in this work, which were compared with those presented in literature and have proved to be compatible.

Palavras-chave: Thermal expansion. Linear expansion coefficient. Metallic bodies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação de operação do refrigerador.	18
Figura 2 – Jato supersônico.	20
Figura 3 – Barra metálica antes e após dilatar-se.	20
Figura 4 – Tipos de pesquisa científica.	24
Figura 5 – Informações técnicas do termômetro digital (TH-1600).	25
Figura 6 – Termômetro digital (TH-1600).	25
Figura 7 – Kit dilatômetro linear utilizado nesta pesquisa.	26
Figura 8 – Recorte do kit dilatômetro linear utilizado nesta pesquisa.	27
Figura 9 – Micrômetro utilizado na medida do diâmetro do cilindro.	28
Figura 10 – Um recorte da imagem do kit de dilatação apresentando a barra metálica e o cilindro acoplado ao ponteiro.	29
Figura 11 – Kit de dilatação junto com os dois termômetros.	29
Figura 12 – Circunferências concêntricas e seus respectivos arcos.	37
Figura 13 – Aquecimento de um cubo e seu resultado após dilatar-se.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns coeficientes de dilatação térmica linear.	21
Tabela 2 – Grandezas físicas medidas para o alumínio.	32
Tabela 3 – Grandezas físicas medidas para o ferro.	32
Tabela 4 – Grandezas físicas medidas para o latão.	33
Tabela 5 – Parâmetros físicos esperados e os obtidos via experimento.	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	12
1.2	O PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.3	OBJETIVOS	14
1.4	A ESTRUTURA DO TCC	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	A TERMOMETRIA NOS SÉCULOS XIX E XX	15
2.2	TEMPERATURA E CALOR	17
2.2.1	Aplicação	17
2.2.2	Lei zero da Termodinâmica	18
2.2.3	Dilatação Térmica	19
2.2.4	Capacidade Térmica	22
2.2.5	Mecanismo de Transferência de Calor	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	ENQUADRAMENTO DA PESQUISA	23
3.2	O KIT EXPERIMENTAL UTILIZADO	24
3.3	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	26
3.4	MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA O TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS	29
3.5	MÉDIA ARITMÉTICA	30
3.6	ERROS DE UMA MEDIDA	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
	REFERÊNCIAS	35
	APÊNDICE A – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO (4.2)	37
	ANEXO A – MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DETER- MINAR O COEFICIENTE DE DILATAÇÃO SUPERFICIAL E VOLUMÉTRICA	39

1 INTRODUÇÃO

A temperatura é uma grandeza física importante para várias áreas do conhecimento (Física, Química, Biologia, etc...). A mesma está ligada diretamente com a dilatação térmica de substâncias, o que pode ser visto na obra de Halliday (2016), Young e Freedman (2008), por exemplo.

É de extrema importância o ser humano saber como cada tipo de material/elemento se comporta em determinadas temperaturas, seja ela na área da construção civil ou até mesmo na área odontológica. Temos como exemplo o ferro, o porquê do uso do ferro em construções civis em estruturas de concreto? Temos que ter em mente que embora sejam completamente diferentes, o ferro e o concreto possuem uma propriedade comum, a dilatação, onde os seus coeficientes lineares se diferenciam por medidas microscópicas. Por isso utiliza-se o ferro nas construções. Do mesmo modo ocorre na área da odontologia, a obturação de um dente é feita com uma substância que possui uma dilatação semelhante ao próprio dente, caso contrário não seria possível realizar essa ação.

O estudo da dilatação térmica é primordial em várias áreas do conhecimento e é um dos temas que fazem parte da Termodinâmica, como pode ser verificado nas obras de Halliday (2016), Young e Freedman (2008) e Gaspar (2013). Nela, o estudo é voltado para o comportamento dos materiais, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos, quando são submetidos a uma variação de temperatura. As variações de temperatura ocorrem quando há uma transferência de calor¹.

Assim, destacam-se três subtópicos que detalham o estudo da dilatação dos sólidos, são eles: dilatação linear, que trata da dilatação sofrida por um corpo apenas em uma das suas dimensões, dilatação superficial, que ocorre em uma superfície e a dilatação volumétrica na qual resulta no aumento de volume.

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Essa pesquisa tem como fundamento o estudo da dilatação térmica linear de alguns metais (ferro, alumínio e latão). Porém, abrange também alguns tópicos que possuem uma relação com este estudo, entre os quais se destacam: Calor, Temperatura, Lei zero e entre outros.

O interesse em estudar e desenvolver uma pesquisa na área de termologia aconteceu a partir de algumas aulas do componente de Física Geral II no decorrer da formação acadêmica, as quais tratavam desse conteúdo, principalmente da dilatometria. Frente

¹ Calor é a energia transferida de um sistema para um ambiente ou vice-versa devido a uma diferença de temperatura (RESNICK; WALKER, 2008).

a isso, foi despertada a curiosidade sobre como os materiais sólidos se comportam em determinadas temperaturas, e o mais importante, como se determinam os coeficientes de dilatação de cada um deles.

Outro aspecto de motivação está ligado à profissão atual, pois trabalhando na área da refrigeração como auxiliar de técnico em refrigeração, houve a curiosidade em compreender como o material que faz parte do ciclo frigorífico², o cobre, se comporta em determinadas temperaturas, já que essas variações são resultado do movimento do gás refrigerante, que percorre todo o circuito sob pressão.

Embora o assunto de dilatação térmica seja relativamente de fácil compreensão, precisamos saber mais especificamente como a dilatação dos materiais acontece cientificamente. Por exemplo, se um corpo ganha energia térmica, por consequência sua temperatura aumenta, nesse aumento de temperatura, o grau de agitação dos átomos também aumenta, fazendo com que, conseqüentemente, haja um aumento na distância média entre as partículas que compõem o corpo.

Acrescenta-se ainda o fato de não ter disponível na biblioteca do Campus VI livros que tratam da obtenção do coeficiente de dilatação térmica linear de sólidos experimentalmente. Dessa forma, acredito que esta pesquisa é importante, pois, servirá como material de apoio na versão online para os estudantes (do CCHE e outros locais) que possam se interessar pelo assunto.

Esta é uma pesquisa interdisciplinar, pois, envolve as disciplinas de Física, Matemática e Estatística. A interdisciplinaridade é verificada através da modelagem matemática³ do problema físico e do tratamento estatístico dos dados do experimento. Conforme os PCNs a interdisciplinaridade questiona a divisão dos diferentes campos do conhecimento produzida por uma abordagem que não considera a influência e inter-relação entre eles. Também questiona a visão compartimentada das disciplinas escolares (BRASIL, 1998).

1.2 O PROBLEMA DE PESQUISA

A questão norteadora deste trabalho é: **Como determinar experimentalmente o coeficiente de dilatação térmica linear de sólidos metálicos?**

² Circuito frigorífico é constituído basicamente por um compressor, um condensador, uma válvula de expansão e um evaporador, interligados por uma tubulação onde o fluido frigorígeno (gás) passa alternadamente do estado líquido ao estado gasoso e vice-versa(<https://www.linkedin.com/pulse/circuito-frigor>).

³ A Modelagem Matemática é o processo que envolve a obtenção de um modelo. E o modelo é um conjunto de símbolos e relações matemáticas que procura traduzir, de alguma forma, um fenômeno em questão ou problema de situação real (BIEMBENGUT; HEIN, 2011).

1.3 OBJETIVOS

A partir da questão norteadora, foi traçado o seguinte objetivo geral:

- Determinar experimentalmente o coeficiente de dilatação térmica linear de alguns sólidos metálicos.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Comparar os resultados experimentais obtidos nessa pesquisa com os existentes na literatura.
- Calcular os erros percentuais.

1.4 A ESTRUTURA DO TCC

Este TCC está estruturado da seguinte forma:

No Capítulo 1 está posta a introdução. Na mesma são mencionados alguns aspectos históricos sobre os conceitos de calor e temperatura, a justificativa do trabalho, o problema de pesquisa e os objetivos.

O Capítulo 2 é o de revisão da literatura. No mesmo são discutidos alguns conceitos básicos acerca do calor, temperatura e da dilatação térmica dos sólidos.

No Capítulo 3 está posto o enquadramento da pesquisa, o kit experimental utilizado, a descrição do experimento e a estatística para o tratamento dos dados experimentais.

No Capítulo 4 estão os resultados e discussões.

No Capítulo 5, trazemos as considerações finais e sugestões para trabalhos posteriores.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A TERMOMETRIA NOS SÉCULOS XIX E XX

A necessidade de estabelecer uma ferramenta ou instrumento padrão que proporcionasse a medição de temperatura foi fundamental para o ser humano e sua própria evolução desde o conhecimentos adquiridos sobre temperatura e calor.

O termômetro, aparato utilizado para medir (aferir) temperatura de corpos, é composto por algumas propriedades, tais como, volume, pressão, resistência elétrica, entre outras, que se relacionam diretamente com a temperatura. Essa última, apresenta um aspecto incomum entre as outras, ou seja, é uma propriedade intensiva¹, como apontam Pires, Afonso e Chaves (2006).

A respeito das escalas termométricas, Pires, Afonso e Chaves (2006) destacam que para estabelecer uma escala é preciso encontrar um elemento/substância que tenha praticidade de uso e que se modifique de modo regular com a temperatura. Segundo os autores, uma grandeza Y é denominada grandeza termométrica quando há uma correspondência entre os valores da grandeza Y e a temperatura T de um corpo, que resulta em uma função termométrica.

Embora existam vários tipos de termômetro, eles se diferenciam pelas suas grandezas termométricas. Nos termômetros de líquidos, como o de etanol ou de Mercúrio, a grandeza termométrica é o volume, que ao variar faz com que a altura da coluna mude para baixo ou para cima, dependendo temperatura.

¹ Propriedade Intensiva é uma propriedade que independe da extensão do sistema, ou seja, não varia de acordo com o tamanho ou quantidade de matéria (LIMA, 2015).

Um dos aspectos mais importante em um termômetro é a sua sensibilidade, como apontam Pires, Afonso e Chaves (2006):

Na construção do termômetro, a sensibilidade é parâmetro crucial e pode ser entendido sob dois pontos de vista Lourenco (1936 apud PIRES; AFONSO; CHAVES, 2006, p.103) e Freitas (1941 apud PIRES; AFONSO; CHAVES, 2006, p.103) : a) a rapidez de resposta do instrumento às variações de temperatura, e b) a capacidade de distinguir pequenas variações de temperatura. No caso (a), o termômetro possui reservatório com pequena quantidade de líquido, o que permite estabelecer o equilíbrio mais rapidamente; na situação (b), aumenta-se o espaçamento entre as frações de grau da escala termométrica, o que exige maiores massas de líquido ou então restringe-se o seu funcionamento a uma faixa de temperatura estreita, como é o caso do familiar termômetro clínico (PIRES; AFONSO; CHAVES, 2006, p.103).

O físico Daniel Gabriel Fahrenheit contribuiu com a criação do termômetro de Mercúrio (1714), que revolucionou o sistema de medidas termométricas devido a precisão, qualidade e reprodutibilidade que seu aparato possuía. Ainda no século XVII, foi definido o grau termométrico, o qual representa a centésima parte da distância do ponto de fusão do gelo até o ponto de ebulição da água fervente. Surgia então, a escala centigrada conhecida como escala Celsius, segundo Pires, Afonso e Chaves (2006).

Em 1848, Kelvin estabeleceu a escala absoluta, conhecida assim por não apresentar valores negativos. Ele verificou que a pressão de um gás diminuía de $1/273$ do seu valor inicial quando resfriado a um volume constante de 0°C a -1°C . Assim, ele concluiu que a pressão do gás seria nula quando ela estivesse a -273°C . Comparando a escala de Kelvin com a escala Celsius, para um mesmo estado térmico, pode-se perceber que a temperatura absoluta é sempre 273,15 unidades mais alta que a escala Celsius.

Partindo para consolidação da termometria, Pires, Afonso e Chaves (2006) descrevem que a partir do momento em que a temperatura começou a ser aferida com precisão, muitas coisas da área das ciências ganharam fundamentação e significado, principalmente na física e na área da química, no final do século XVII e, com isso, muitos conceitos ganharam sentidos e com isso foram estabelecidos.

Nessa faixa de evolução, foram desenvolvidos também os termopares² e os pirômetros³, aparelhos esses que possuem a finalidade de aferir temperaturas elevadas, visto que os termômetros de líquidos são limitados ao ponto de ebulição. Outro tipo de aparato é o termômetro digital, modelo que surgiu no final do século XX, e é o possível substituto do termômetro de Mercúrio, funciona com base de sensores elétricos como o dos termopares,

² Termopares são sensores de temperatura simples, constituídos de dois metais distintos unidos em uma das extremidades. Quando há uma diferença de temperatura entre a extremidade unida e as extremidades livres, verifica-se o surgimento de uma diferença de potencial que pode ser medida por um voltímetro (<https://pt.wikipedia.org/wiki/Termopar>).

³ Pirômetro é um equipamento que mede irradiação térmica da superfície de um objeto e informa a temperatura (<https://www.wikiwand.com/pirômetro>).

termômetros de resistência e termistores ⁴, além da radiação infravermelha, levando em conta que a resposta desse aparelho é uma função não linear, como apontam Pires, Afonso e Chaves (2006).

A evolução do conhecimento e da ciência fez com que o termômetro passasse por diversas mudanças, como redução do peso, diversificação para aplicações específicas, entre outras, tornando-se essencial para a caracterização de inúmeros parâmetros físicos, químicos e até mesmo biológicos. Assim o termômetro, de forma geral, foi e é um dos instrumentos fundamentais para o avanço evolutivo da humanidade.

2.2 TEMPERATURA E CALOR

A Termodinâmica é uma dos ramos da física que estuda a energia térmica, e um dos temas que ela trata é o de temperatura. Existem inúmeras aplicações da termodinâmica em diversas áreas, como na engenharia mecânica, engenharia biomédica, engenharia agrônoma e entre outras. Um exemplo básico é o estudo de transferência de energia térmica nos eventos associados ao EL Niño⁵.

A temperatura é uma grandeza imprescindível no mundo da ciência, tem sua escala definida pelos físicos em (K) Kelvin. Mesmo não havendo um limite superior de temperatura, há um limite inferior do mesmo, onde esse limite é denominado zero absoluto da escala Kelvin (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

É de extrema importância sabermos diferenciar calor e temperatura. A temperatura depende do estado físico do objeto, em que por meio de um descrição quantitativa, pode-se indicar se o mesmo está quente ou frio. Já o termo Calor, está diretamente ligada à transferência de energia térmica de um corpo ou sistema para outro em virtude de uma diferença de temperatura existente entre eles. Segundo Young e Freedman (2008), pode-se alterar a temperatura de um corpo retirando ou fornecendo calor (energia) dele, ou retirando ou fornecendo outra forma de energia, como a energia mecânica.

2.2.1 Aplicação

Destaco aqui, com minha experiência profissional de trabalho, uma das muitas aplicações da termodinâmica, na qual estabeleço uma ênfase à essa área do conhecimento - onde a mesma é relevante para nós seres humanos - que é área da refrigeração.

⁴ Termistor é um sensor de temperatura composto por material semicondutor sinterizado, capaz de exibir uma grande alteração de resistência proporcional a pequenas alterações de temperatura (<https://br.omega.com/prodinfo/termistores.html>).

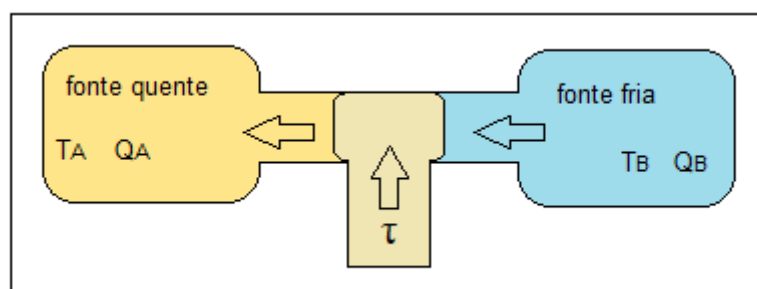
⁵ Fenômeno que ocorre no Oceano Pacífico entre a América do Sul e a Austrália devido a diferença de temperatura da superfície do oceano nessas regiões (PRELA, 2004).

A refrigeração é um processo que é usado para remover calor de um sistema⁶, em que a temperatura fica mais baixa que a temperatura ambiente, essa ação é chamada de refrigeração, o que se difere do resfriamento, cujo objetivo é igualar a temperatura do sistema à temperatura ambiente. Ao deixarmos uma xícara de café sobre a mesa, o café juntamente com a xícara após um certo tempo entrará em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente, ou seja, ocorreu o processo de resfriamento com a xícara e o café. Já o processo da refrigeração ocorre da seguinte forma, por exemplo: uma geladeira propende a tirar calor dos objetos que se encontram armazenados em seu interior, fazendo com que a temperatura das coisas armazenadas com um certo tempo fique muito abaixo da temperatura ambiente a qual se encontra.

Essa ação da refrigeração é um processo inverso ao fluxo natural estabelecido pela segunda lei da termodinâmica, onde esse fluxo se dá da fonte com maior temperatura para a fonte com menor temperatura. No caso da refrigeração, como podemos observar na Figura 1, o fluxo é inverso e é um processo forçado, transcorre da fonte mais fria para a mais quente, exigindo assim um fornecimento de energia (trabalho) para que o sistema funcione.

Acerca da montagem de um sistema de refrigeração, os metais mais utilizados são alumínio e cobre. O cobre se destaca por ser mais eficiente em termos de condutividade térmica, onde o seu coeficiente de transferência de calor é mais alto, e seu custo monetário mais baixo, fazendo assim o material adequado para a montagem desse tipo de sistema.

Figura 1 – Representação de operação do refrigerador.



Fonte: <https://www.infoescola.com/fisica/refrigeracao/>.

2.2.2 Lei zero da Termodinâmica

A lei zero da termodinâmica deriva do estudo da temperatura. Sabemos que as propriedades de um objeto muda de acordo com a variação de temperatura que o mesmo sofre, ou seja, quando dois corpos se encontram em equilíbrio térmico, os mesmos possuem

⁶ Um sistema é entendido como um conjunto ordenado de componentes inter-relacionados, sejam elementos materiais ou conceituais, dotados de uma estrutura, composição e ambiente particulares (<https://conceitosdomundo.pt/sistema/>).

as mesmas temperaturas, quando não, eles tendem a entrar em equilíbrio, esse fenômeno é o que a Lei zero nos mostra.

Como aponta Halliday, Resnick e Walker (2016), se um corpo A e um corpo B se encontram, separadamente, em equilíbrio térmico com o corpo C, então A e B estão em equilíbrio térmico entre si.

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2016, p.417) “a lei zero foi formulada apenas na década de 1930, muito depois de a primeira e a segunda lei da termodinâmica terem sido descobertas e numeradas.”

2.2.3 Dilatação Térmica

Seja o metal ou qualquer outro tipo de material sólido, quando é submetido a uma fonte de calor, essa fonte faz com que os átomos do objeto ganhem energia e se afastem um dos outros até entrarem em equilíbrio de elasticidade interatômica, o que os mantém unidos. Segundo Halliday (2016), a dilatação térmica de um sólido é como a ampliação de uma fotografia, exceto pelo fato de que podem ocorrer de três maneiras: dilatação linear ⁷, dilatação superficial⁸ e dilatação volumétrica ⁹. Assim, entende-se a dilatação térmica como o aumento das dimensões do corpo com o aumento da temperatura (GASPAR, 2013).

Em seu livro, Halliday, Resnick e Walker (2016) descrevem que quando um jato voava mais rápido que a velocidade do som, se produz um atrito entre o ar e a aeronave resultando em uma dilatação térmica que provocou um aumento no comprimento da aeronave de 12,5 cm. A temperatura na ponta da nave chegava a $128^{\circ}C$ e na cauda $90^{\circ}C$. Na Figura 2 observa-se o avião comercial supersônico Concorde.

⁷ Dilatação linear ocorre quando há um aumento no comprimento de um corpo.

⁸ Dilatação superficial acontece quando há um aumento da área de um corpo.

⁹ Dilatação volumétrica efetua-se quando há um aumento nas três dimensões (largura, comprimento e altura) do objeto.

Figura 2 – Jato supersônico.



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2016, p.424).

Se uma barra sólida de comprimento L_0 sofre uma variação de temperatura ΔT , seu comprimento sofre uma variação ΔL , dado por:

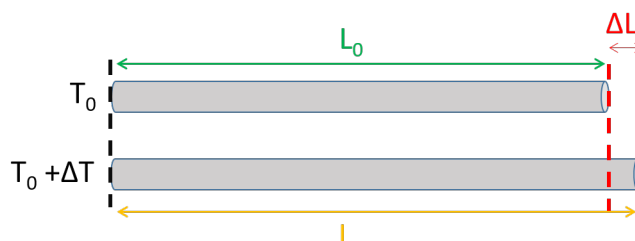
$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T. \quad (2.1)$$

Onde α é o coeficiente de dilatação linear. Embora α varie ligeiramente com a temperatura, na maioria dos casos pode ser considerado constante para um dado material. O parâmetro físico α possui unidade de medida como sendo $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ou K^{-1} .

Da Equação (2.1) pode-se dizer que a experiência mostra que a mesma é válida para ΔT não muito grande (menor que cerca de 100°C) (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

Na Figura 3 pode-se observar uma barra a uma temperatura T_0 e comprimento L_0 e seu estado após sofrer uma variação de temperatura ΔT . Observando a figura, podemos escrever: $L = L_0 + \Delta L$. Ou ainda escrever $L = L_0 (1 + \alpha \Delta T)$.

Figura 3 – Barra metálica antes e após dilatar-se.



Fonte: Adaptada de Young e Freedman (2008, p.185).

Do mesmo modo ocorrem na dilatação superficial e volumétrica, com um aumento de tamanho e duas dimensões e três dimensões, respectivamente, sendo dada da seguinte forma:

$$\Delta A = A_o\beta\Delta T. \quad (2.2)$$

$$\Delta V = V_o\gamma\Delta T. \quad (2.3)$$

Em que $\beta = 2\alpha$ (coeficiente de dilatação superficial), e $\gamma = 3\alpha$ (coeficiente de dilatação volumétrica) (GASPAR, 2013). As equações (2.2) e (2.3) são demonstradas no Anexo A.

Na Tabela 1 observam-se alguns coeficientes de dilatação térmica linear de algumas substâncias. Um material é tanto mais dilatável quando maior é seu coeficiente de dilatação linear. Sabe-se que o coeficiente de dilatação linear de um sólido, embora varie um pouco, só é constante dentro de determinado intervalo de temperatura. Os dados da Tabela 1 se referem à temperatura de $20^\circ C$ (GASPAR, 2013).

Tabela 1 – Alguns coeficientes de dilatação térmica linear.

Substância	$\alpha(10^{-6}/^\circ C)$
Alumínio	24
Latão	19
Ferro	12

Fonte: Adaptada de Gaspar (2013, p.208).

2.2.4 Capacidade Térmica

A capacidade térmica de um corpo (C) é, como descreve Halliday, Resnick e Walker (2016), “uma constante de proporcionalidade entre calor (Q) recebido ou cedido e a variação de temperatura (ΔT) do corpo”. Essa proporcionalidade é descrita da seguinte forma:

$$Q = C\Delta T = C(T_f - T_i) \quad (2.4)$$

Onde C é medida em unidades de energia por grau ou energia por Kelvin, ou seja, em $\text{cal}/^\circ\text{C}$, Cal/K ou Joule/K . A capacidade térmica de um corpo indica a quantidade de calor que ele precisa receber ou ceder para que sua temperatura varie uma unidade.

O calor específico (c) de um material é definido como sendo:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}. \quad (2.5)$$

O calor específico indica a quantidade de calor que cada unidade de massa do corpo precisa receber ou ceder para que sua temperatura varie uma unidade.

2.2.5 Mecanismo de Transferência de Calor

Existem materiais que permitem a condução de calor, ou seja, são condutores de energia térmica. Existem também os que impedem a transferência de calor, são denominados isolantes térmicos. Por exemplo, uma panela de alumínio que facilita a transferência de calor entre o fogo do fogão e o interior da panela. Outro exemplo é a parede da geladeira, que é feita de um material isolante, que é projetada para impedir que o interior da geladeira ganhe calor. Em relação à transferência de calor, existem 3 tipos de mecanismos que facilitam essa ação, são eles: a Condução, a Convecção e a Radiação (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

Segundo Young e Freedman (2008), a Condução ocorre no interior de um material ou entre dois materiais que se encontram em contato. A Convecção¹⁰ depende do movimento da massa, que se dá de uma região para outra. E a Radiação é a transferência de calor que ocorre pela radiação eletromagnética, tal como a energia solar.

¹⁰ A convecção é um processo de transmissão de calor que ocorre apenas em fluidos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ENQUADRAMENTO DA PESQUISA

Sobre a natureza, essa pesquisa pode ser enquadrada como básica, já que objetiva gerar conhecimentos novos, úteis para o avanço da ciência, sem aplicação prática prevista, envolvendo verdades e interesses universais (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Com relação aos objetivos propostos, essa pesquisa é classificada como explicativa, já que busca detalhar os registros realizados por meio de análises. Seu objetivo consiste em aprofundar a realidade observada para compreender seus detalhes, estando mais sujeita a erros e desvios interpretativos do pesquisador/investigador. Embora muitos cientistas ainda forcem os dados para dizerem o que lhes convém (XAVIER, 2014).

Sobre os procedimentos técnicos, a pesquisa pode ser considerada **bibliográfica** e **experimental**. Segundo Xavier (2014), a pesquisa bibliográfica é uma forma de investigação cuja resposta é alcançada por meio de materiais já produzidos, seja em bibliotecas ou em materiais virtuais. A pesquisa experimental é aquela em que o pesquisador/investigador manipula e controla as variáveis sobre a ação em observação, objetivando interpretar as modificações que podem acontecer no objeto pesquisado.

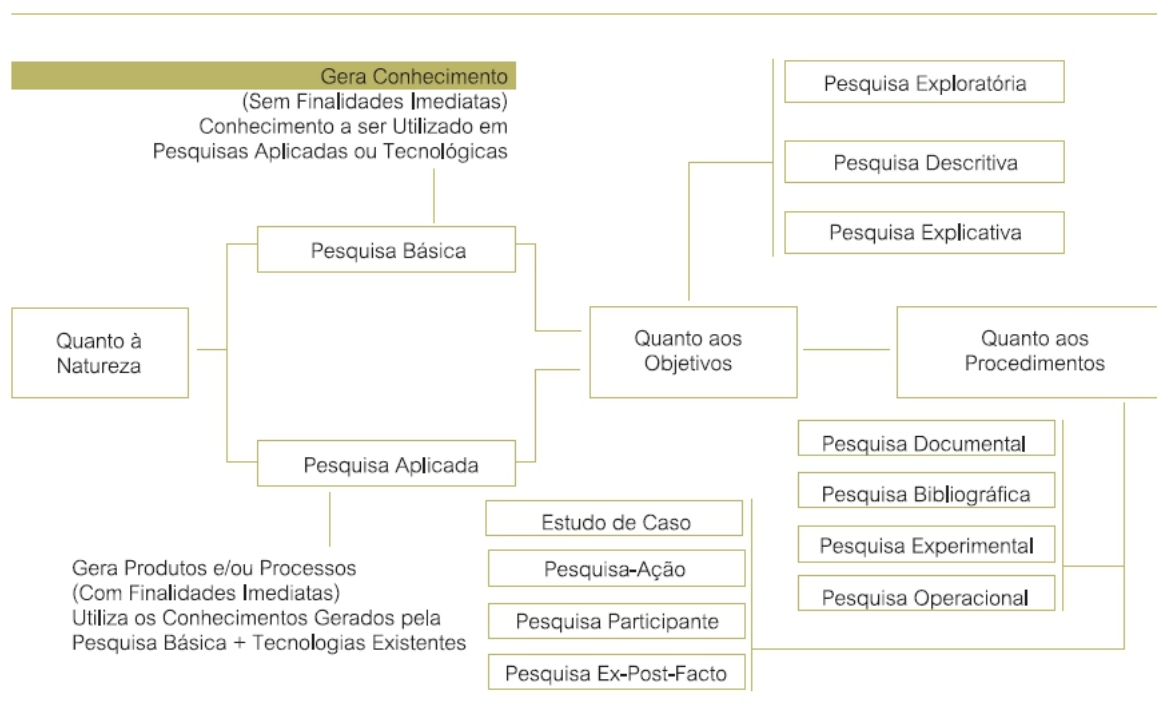
Nesse caso, o experimento ocorre em situação de laboratório, e, segundo Xavier (2014), é possível ao investigador produzir duas ações:

- Controlar as mais diferentes variáveis como temperatura, pressão, velocidade, tempo etc, em face ao objeto observado;
- Interferir na relação causa e efeito, onde pode ser feitas outras reações de acordo com a necessidade do experimento e as intenções do pesquisador.

Ainda conforme a forma de abordagem do problema, essa pesquisa se enquadra como quantitativa. Neste tipo de pesquisa tudo pode ser quantificável e requer o recurso de técnicas de estatística (GIL, 2002).

Na Figura 4, é possível observar os tipos de pesquisas científicas que permitem verificar as causas do enquadramento desta pesquisa.

Figura 4 – Tipos de pesquisa científica.



Fonte: Prodanov e Freitas (2013, p. 51).

3.2 O KIT EXPERIMENTAL UTILIZADO

Esta pesquisa teve como base as observações de dilatação linear devido a variações de temperatura de alguns metais. O kit experimental para dilatação de corpos metálicos pertence ao laboratório de Física do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (Campus I) onde os ensaios experimentais foram realizados. O mesmo é composto pelos seguintes materiais:

- Kitassato de 500 ml com rolha;
- Fonte de calor (Fogareiro elétrico 220V/1000W);
- Barras ocas de alguns metais, como ferro, alumínio e latão (tubos de 50 cm de comprimento);
- Conexão de borracha (Mangueiras de silicone com diâmetro interno de 10 mm);
- Forquilha com eixo móvel provido de ponteiro;
- Termômetro digital (TH-1600) tipo k com datalogger que pode ser visto na Figura 6 e as informações técnicas do mesmo na Figura 5;
- Aparato para estudo de dilatação térmica linear da marca PHYWE.

Figura 5 – Informações técnicas do termômetro digital (TH-1600).

	Escala de Medição	Resolução	Precisão
°C	-200°C ~ 999.9°C	0.1°C	-200°C ~ 999.9°C : ± (0.2%+1°C)
	1000°C ~ 1370°C	1°C	1000°C ~ 1370°C : ± (0.2%+1°C)
°F	-328°F ~ 999.9°F	0.1°F	-328°F ~ 999.9°F: ± (0.3%+2°F)
	1000°F ~ 2498°F	1°F	1000°F ~ 2498°F: ± (0.3%+2°F)

Fonte: O próprio autor.

Figura 6 – Termômetro digital (TH-1600).



Fonte: O próprio autor.

Figura 7 – Kit dilatômetro linear utilizado nesta pesquisa.



Fonte: O próprio autor.

3.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

A montagem do experimento foi realizada conforme a Figura 7. O kit foi montado conforme os seguintes passos:

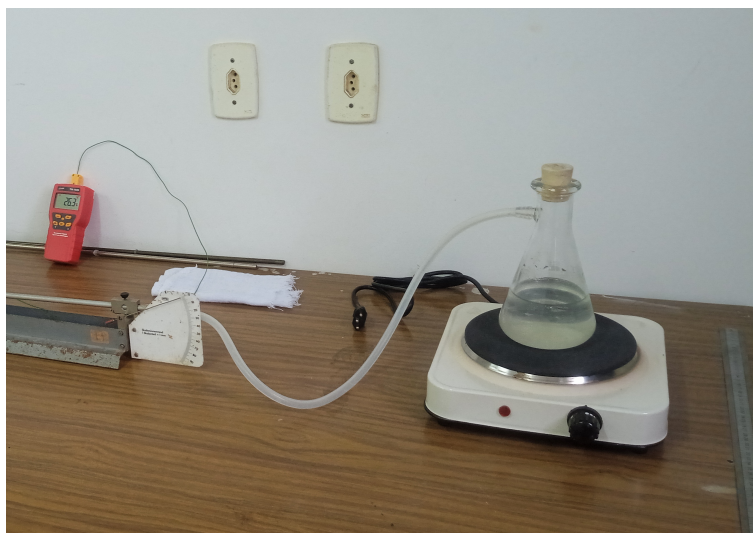
1. Foi realizada a calibração dos termômetros utilizando um termômetro de mercúrio, onde com os mesmo foram conectados em dois pontos das barras metálicas conforme a

Figura 7 e a Figura 11.

2. As barras foram fixadas (utilizando dois parafusos) em dois pontos (distanto 500 mm um do outro) do dilatômetro, um fixo no qual a barra não pôde se mover, e o outro fixado na presilha onde foi possível a barra se mover diante da ação da dilatação;
3. Uma mangueira foi conectada, sendo que uma de suas extremidades ligada ao kitassato e a outra à uma da extremidades das barras metálicas, como pode ser visto na Figura 8;
4. Água foi adicionada ao kitassato, onde a mesma foi aquecida via fogareiro elétrico após a montagem..
5. Espera-se o conjunto entrar em equilíbrio térmico e assim verifica-se as temperaturas finais indicadas nos termômetros;

Para obter alguns parâmetros (comprimento do ponteiro, raio da circunferência menor e maior, comprimento inicial das barras, temperatura inicial e final das barras metálicas e o arco gerado pelo ponteiro maior) físicos foram utilizados equipamento tais como: régua milimetrada, termômetros digitais e micrômetro.

Figura 8 – Recorte do kit dilatômetro linear utilizado nesta pesquisa.



Fonte: O próprio autor.

O coeficiente de dilatação linear foi calculado através da equação (3.1):

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T}. \quad (3.1)$$

A dilatação da barra (ΔL) foi obtido através da equação (3.2), e sua dedução encontra-se no Apêndice A.

Figura 9 – Micrômetro utilizado na medida do diâmetro do cilindro.



Fonte: O próprio autor.

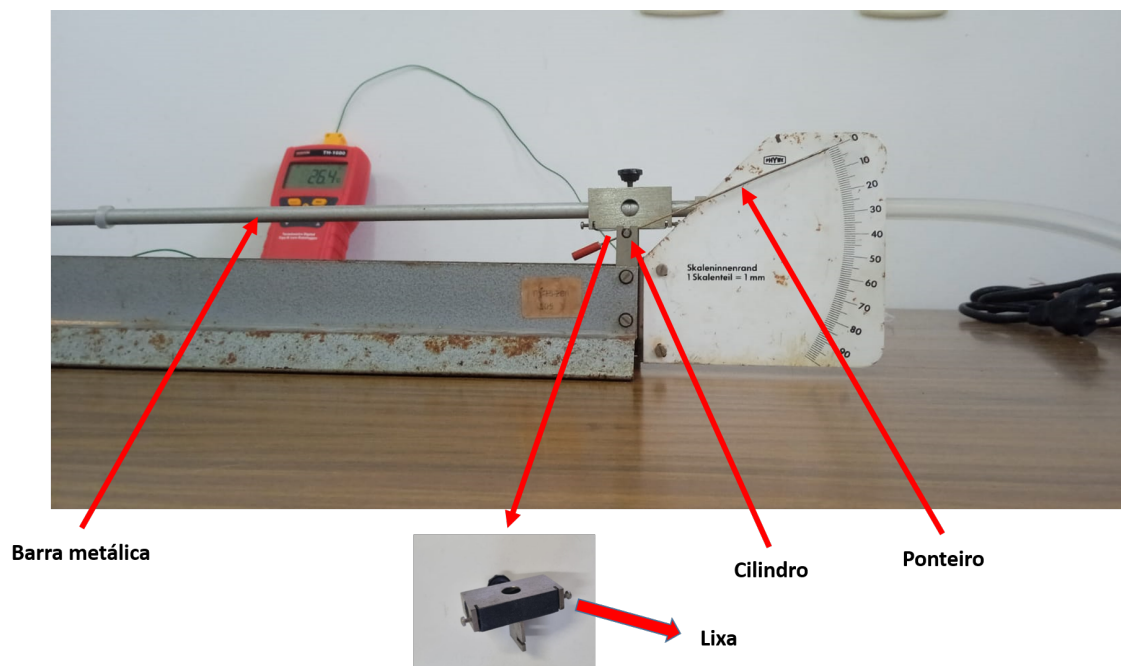
$$\Delta L = \frac{sr}{R}. \quad (3.2)$$

Na equação (3.2) r é o raio ¹ do cilindro que está acoplado ao ponteiro e R é o comprimento do ponteiro somado com o raio do cilindro que está acoplado o ponteiro conforme pode ser observado na Figura 10. A variável s é o arco gerado pelo ponteiro quando a barra se dilata.

Na Figura 11 pode-se observar o kit de dilatação junto com dois termômetros conectados em dois pontos da barra metálica. Observa-se os dois termômetros apresentando os mesmos valores de temperatura (temperatura inicial= 27, 2°C).

¹ Essa medida foi realizada utilizando-se de um micrômetro. O mesmo pode ser observado na Figura 9. A precisão desse instrumento é de 0,01mm. O micrômetro permite efetuar medidas de até centésimos de milímetros e medida máxima de até 25mm.

Figura 10 – Um recorte da imagem do kit de dilatação apresentando a barra metálica e o cilindro acoplado ao ponteiro.



Fonte: O próprio autor.

Figura 11 – Kit de dilatação junto com os dois termômetros.



Fonte: O próprio autor.

3.4 MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA O TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

A Estatística possui por objetivo fornecer métodos e técnicas para lidar com situações sujeitas a incertezas, a mesma pode ser considerada como um conjunto de técnicas e métodos que envolvem a planificação de experiências, a recolha e sistematização

de dados, a inferência², o processamento, a análise e a disseminação de informação.

A maioria dos dados apresenta uma diferente tendência de se agrupar em torno de um ponto central. Assim, para um determinado conjunto de dados, torna-se possível selecionar uma média para fornecer a descrição de todo o conjunto. Este valor descritivo é denominado de Medida de localização ou Tendência central. Como tipos de médias de tendência central utilizadas citam-se: a média aritmética, a mediana, a moda, a média do intervalo e a média das juntas ou *midhinge* (LEVINE; BERENSON; STEPHAN, 2008).

3.5 MÉDIA ARITMÉTICA

Em geral, a média aritmética³ é o tipo de medida central mais utilizada. Assim, se x_1, \dots, x_n são os n valores da variável X a média aritmética de X segundo Morettin e Bussab (2010) é dada por:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.3)$$

Da Equação (3.3) têm-se o seguinte entendimento: a média aritmética das observações é dada pela soma de todas as observações dividida pelo total de observações. A média funciona como ponto de equilíbrio de modo que as observações que são menores equilibram as maiores (LEVINE; BERENSON; STEPHAN, 2008).

3.6 ERROS DE UMA MEDIDA

O Erro de uma medida é definido como sendo:

$$\epsilon = V - V_R. \quad (3.4)$$

Onde, V é o valor medido e V_R é o valor real da medida. No entanto, em boa parte das vezes o parâmetro físico V_R não pode ser determinado. Assim, não há como determinar o erro. Uma sugestão para contornar isso é substituir o valor real pelo valor mais próximo dele e calcular o desvio da medida (SILVA; SILVA; NASCIMENTO, 1995).

Mesmo tendo o conhecimento do erro de uma determinada medida há uma certa dificuldade em avaliar se o mesmo é “pequeno ou grande” devido não ter um parâmetro para comparação. Assim, define-se o Erro relativo de uma medida como sendo:

² Inferência é uma dedução feita com base em informações ou um raciocínio que usa dados disponíveis para se chegar a uma conclusão.

³ Com respeito a média aritmética é preciso dizer que, uma vez que, a mesma se baseia em todas as observações, torna-se altamente afetada por um ou mais valores extremos da amostra. Para tais casos, verifica-se uma representação distorcida do que os dados estão fornecendo. Logo, para tais tipos de dados, não é conveniente a utilização do cálculo da média aritmética para descrever o conjunto de dados (LEVINE; BERENSON; STEPHAN, 2008).

$$\epsilon_R = \frac{\epsilon}{V_R} = \frac{V - V_R}{V_R}. \quad (3.5)$$

O **erro percentual** é o erro relativo multiplicado por 100. Assim, escreve-se:

$$\epsilon_p = \epsilon_R \times 100. \quad (3.6)$$

Sabe-se que, em um experimento, os dados experimentais podem conter erros. Os erros podem ser classificados como **grosseiros**, **estatísticos** e **sistemáticos** (PRECKER; SILVA, 1997). Como exemplo de **erros grosseiros** pode-se citar: enganos de leitura de uma determinada medida, erros de calibração de determinado equipamento, erros nos cálculos, etc. Os **erros estatísticos** são aqueles em que uma determinada medida varia para mais ou para menos. Tais erros estão ligados à precisão dos instrumentos ou modificações de leituras. Os **erros sistemáticos** estão ligados à exatidão dos instrumentos de medida ou à utilização inapropriada de procedimentos experimentais ou de conceitos físicos (PRECKER; SILVA, 1997).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Tabelas 2, 3 e 4 estão colocados as grandezas físicas medidas para o alumínio, ferro e latão. Os valores de temperatura final (T) e inicial (T_0) correspondem à média aritmética de duas medidas de temperatura realizadas em dois pontos diferentes das barras, utilizando termômetros.

Tabela 2 – Grandezas físicas medidas para o alumínio.

Grandeza Medida	Valor	Unidade
Comprimento inicial da barra (L_0)	500	<i>mm</i>
Temperatura inicial da barra (T_0)	27,2	$^{\circ}C$
Temperatura final da barra (T)	92,2	$^{\circ}C$
Varição de temperatura (ΔT)	65	$^{\circ}C$
Raio da circunferência menor (r)	1,98	<i>mm</i>
Raio da circunferência maior (R)	99,98	<i>mm</i>
Comprimento do ponteiro (C_p)	98,00	<i>mm</i>
Arco maior (s)	40	<i>mm</i>

Fonte: O próprio autor.

Tabela 3 – Grandezas físicas medidas para o ferro.

Grandeza Medida	Valor	Unidade
Comprimento inicial da barra (L_0)	500	<i>mm</i>
Temperatura inicial da barra (T_0)	28,2	$^{\circ}C$
Temperatura final da barra (T)	89,3	$^{\circ}C$
Varição de temperatura (ΔT)	61,1	$^{\circ}C$
Raio da circunferência menor (r)	1,98	<i>mm</i>
Raio da circunferência maior (R)	99,98	<i>mm</i>
Comprimento do ponteiro (C_p)	98,00	<i>mm</i>
Arco maior (s)	20	<i>mm</i>

Fonte: O próprio autor.

Tabela 4 – Grandezas físicas medidas para o latão.

Grandeza Medida	Valor	Unidade
Comprimento inicial da barra (L_0)	500	mm
Temperatura inicial da barra (T_0)	28,5	$^{\circ}C$
Temperatura final da barra (T)	91	$^{\circ}C$
Varição de temperatura (ΔT)	62,5	$^{\circ}C$
Raio da circunferência menor (r)	1,89	mm
Raio da circunferência maior (R)	99,98	mm
Comprimento do ponteiro (C_p)	98,00	mm
Arco maior (s)	33	mm

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 5 encontram-se os parâmetros físicos esperados (os que tem índice E) e os obtidos (com índice o) via experimento. A mesma foi obtidas utilizando os dados que estão postos nas Tabelas 2, 3 e 4. A dilatação esperada (ΔL_E) foi calculada usando a Equação (2.1) e a obtida (ΔL_o) usando a Equação (3.2). O coeficiente de dilatação térmica linear obtido foi calculado usando a Equação (3.1) com a dilatação dada na Equação (3.2).

O erro percentual foi calculado utilizando a Equação (3.6). Para o alumínio verifica-se um erro percentual de 1,55% para a dilatação. Quanto ao coeficiente de dilatação térmica linear um erro de 1,54%. Os coeficientes de dilatação térmica linear esperados que estão postos na Tabela 5 foram retirados do trabalho de Gaspar (2013, p.208). Levando em consideração o erro obtido na dilatação, verifica-se uma boa concordância entre o valor esperado e o obtido. Quanto ao coeficiente de dilatação podemos dizer que o valor encontrado nesse trabalho está em concordância com o apresentado no trabalho de (GASPAR, 2013).

Para o latão o erro na comparação da dilatação foi de 10,07% e no coeficiente de dilatação térmica linear o erro foi de 10,05%.

O erro obtido na comparação entre a dilatação esperada e a obtida para o ferro foi de 8,01%. E o erro na comparação entre o coeficiente de dilatação térmica linear esperado e obtido foi de 8,00%.

Tabela 5 – Parâmetros físicos esperados e os obtidos via experimento.

Material	ΔL_E (m)	ΔL_o (m)	Er%	$\alpha_E(^{\circ}C^{-1})$	$\alpha_o(^{\circ}C^{-1})$	Er%
Alumínio	$78,00 \times 10^{-5}$	$79,21 \times 10^{-5}$	1,55	24×10^{-6}	$24,37 \times 10^{-6}$	1,54
Latão	$59,37 \times 10^{-5}$	$65,35 \times 10^{-5}$	10,07	19×10^{-6}	$20,91 \times 10^{-6}$	10,05
Ferro	$36,66 \times 10^{-5}$	$39,60 \times 10^{-5}$	8,01	12×10^{-6}	$12,96 \times 10^{-6}$	8,00

Fonte: O próprio autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho teve como objetivo geral determinar experimentalmente o coeficiente de dilatação térmica linear de alguns materiais metálicos. Os dados foram obtidos através de um kit de dilatação linear da marca PHYWE.

As dilatações obtidas para o alumínio, ferro e latão foram comparadas com as dilatações esperadas e os resultados demonstraram uma boa concordância entre as mesmas.

O modelo matemático (A.5) utilizado nesse trabalho demonstrou reproduzir resultados esperados pelo modelo (2.1). Ainda com relação ao modelo (A.5) não foram vistos trabalhos utilizando o mesmo para determinar dilatações.

Como sugestão para pesquisas futuras indica-se a utilização da teoria dos erros e de desvio para que assim possa ser verificado as influências de erros em medidas que são obtidas através de outras. Estas teorias podem ser encontradas nos trabalhos de Vuolo (1996) e Silva, Silva e Nascimento (1995). Conforme Vuolo (1996, p.53) “os objetivos da teoria de erros consistem em determinar o melhor valor possível para a grandeza a partir de medições e determinar quanto o melhor valor obtido pode ser diferente do valor verdadeiro”. Indica-se fazer um estudo mais aprofundado das propriedades físicas dos metais utilizados nesse trabalho. Ainda sugere-se comparar os coeficientes de dilatação térmica linear obtidos nesse trabalho com outros apresentados na literatura. Por exemplo, comparar com o trabalho de Young e Freedman (2008) e Nussenzveig (2018), etc.

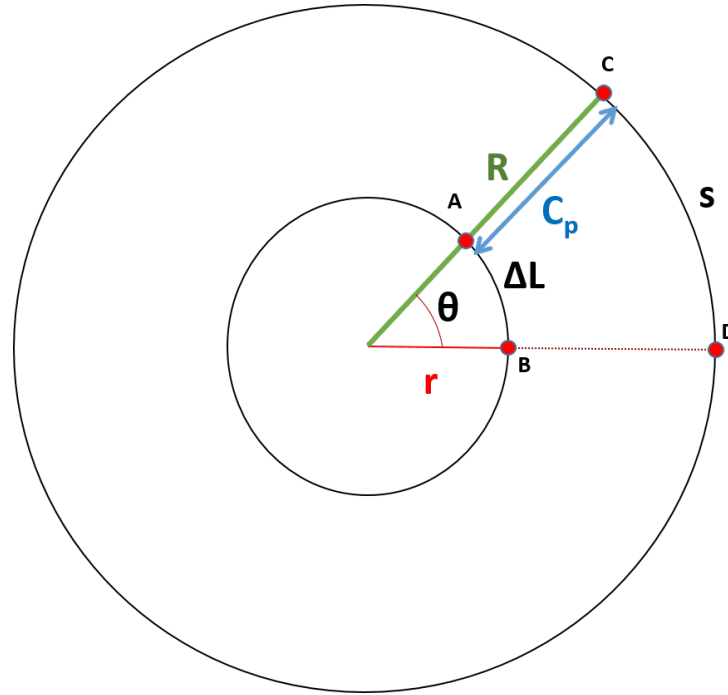
REFERÊNCIAS

- BIEMBENGUT, M. S.; HEIN, N. **Modelagem Matemática no Ensino**. 5. ed. São Paulo: Contexto, 2011. Citado na página 13.
- BISCUOLA, G. J.; MAIALI, A. C. **Física**. São Paulo: Saraiva, 1996. único. Citado na página 39.
- BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais: 3º e 4º Ciclos do Ensino Fundamental: apresentação dos temas transversais**. Brasília: MEC/SEF, 1998. Citado na página 13.
- FREITAS, A. **Curso de física**. São Paulo: Cia Melhoramentos, 1941. Citado na página 16.
- GASPAR, A. **Compreendendo a Física: Ondas, Óptica e Termodinâmica**. 2. ed. São Paulo: Ática, 2013. v. 2. Citado nas páginas 12, 19, 21 e 33.
- GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo-SP: Atlas, 2002. Citado na página 23.
- HALLIDAY, D. **Fundamentos de física**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 2. Citado nas páginas 12 e 19.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 1. Citado nas páginas 17, 19, 20 e 22.
- LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. **Estatística: Teoria e Aplicações usando o microsoft excel em português**. 5. ed. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 2008. Citado na página 30.
- LIMA, L. S. Propriedades intensivas e propriedades extensivas. **Revista de Ciência Elementar**, v. 3, n. 4, p. 240, 2015. Citado na página 15.
- LOURENCO, O. B. **Física - Iniciação ao estudo da física experimental**. São Paulo: Cia Editora Nacional, 1936. Citado na página 16.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. de O. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010. Citado na página 30.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica: fluidos, oscilações e ondas, calor**. 5. ed. São Paulo: Blusher, 2018. Citado na página 34.
- PIRES, D. P. L.; AFONSO, J. C.; CHAVES, F. A. B. A termometria nos séculos XIX e XX. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 28, p. 101–114, 2006. Citado nas páginas 15, 16 e 17.
- PRECKER, J. W.; SILVA, W. P. da. O modelo da dilatação térmica e os erros sistemáticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 19, n. 3, p. 311–314, setembro 1997. Citado na página 31.

- PRELA, A. **Influência dos fenômenos El Niño/La Niña na produtividade de trigo no estado do Paraná**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2004. Citado na página 17.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas de Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Universidade FEEVALE, 2013. Citado nas páginas 23 e 24.
- RESNICK, H.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. v. 2. Citado na página 12.
- SILVA, W. P. da; SILVA, C. M. e; NASCIMENTO, M. S. **Tratamento de dados experimentais**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 1995. Citado nas páginas 30 e 34.
- VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blusher, 1996. Citado na página 34.
- XAVIER, A. C. **Como fazer e apresentar trabalhos científicos em eventos acadêmicos**. São Paulo: Rasper, 2014. único. Citado na página 23.
- YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008. Citado nas páginas 12, 17, 20, 22 e 34.

APÊNDICE A – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO (4.2)

Figura 12 – Circunferências concêntricas e seus respectivos arcos.



Fonte: O próprio autor.

A Equação (3.2) é obtida da seguinte forma:

$$\begin{cases} 360^\circ \longrightarrow 2\pi r \\ \theta \longrightarrow \Delta L \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Logo, observando a Figura 12 pode-se concluir que:

$$\Delta L = \widehat{AB} = \frac{2\pi r}{360^\circ} \theta. \quad (\text{A.2})$$

e,

$$s = \widehat{CD} = \frac{2\pi R}{360^\circ} \theta. \quad (\text{A.3})$$

Como θ é o mesmo para os arcos ΔL e s , pode-se escrever:

$$\frac{360^\circ \Delta L}{2\pi r} = \frac{360^\circ s}{2\pi R}. \quad (\text{A.4})$$

Logo, tem-se:

$$\Delta L = \frac{sr}{R}. \quad (\text{A.5})$$

Da Figura 12 note que R é dado por:

$$R = C_p + r, \quad (\text{A.6})$$

em que, R é o raio maior, C_p é o comprimento do ponteiro e r é o raio do cilindro.

Caso os leitores desse TCC queiram estudar um pouco mais sobre arcos e ângulos, sugere-se a leitura de algumas obras. Uma delas é o capítulo 1 da obra de Iezzi (1977-1978). Outra opção é o capítulo 2 da obra de Dante (2016). Além disso, também é possível consultar o capítulo 1 da obra de Iezzi et al. (2016).

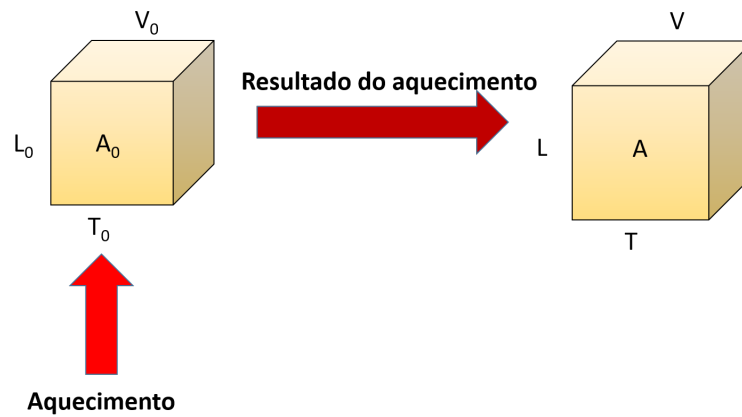
O modelo A.5 para determinar o ΔL foi proposto pelo professor Thiago Silva Araújo.¹

¹ O professor Thiago Silva Araújo também é técnico de Laboratório de Física no Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da UEPB (Campus I).

ANEXO A – MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DETERMINAR O COEFICIENTE DE DILATAÇÃO SUPERFICIAL E VOLUMÉTRICA

Considere um cubo metálico (ver Figura 13). O mesmo possui um comprimento inicial L_0 , área inicial A_0 e volume inicial V_0 , que o mesmo sofra uma variação de temperatura ΔT e que devido a isso o mesmo se dilate. Devido a dilatação seu comprimento passa a ser L , sua área A e seu volume V .

Figura 13 – Aquecimento de um cubo e seu resultado após dilatar-se.



Fonte: O próprio autor.

Pode-se mostrar que a dilatação da área e do volume do cubo são dadas pelas seguintes relações conforme Biscuola e Maiali (1996):

$$\Delta A = \beta A_0 \Delta T,$$

e,

$$\Delta V = \gamma V_0 \Delta T,$$

onde as mesmas originam-se da fórmula da dilatação linear $\Delta L = L_0 \alpha \Delta T$.

Com base na Figura 13, temos as seguintes relações de variações: $\Delta L = L - L_0$, $\Delta A = A - A_0$ e $\Delta V = V - V_0$.

Fazendo $L_0 = 1$ unidade de comprimento e $\Delta T = 1$ unidade de variação de temperatura, obtém-se $\Delta L = \alpha$. Assim, α informa a variação de comprimento ocorrida em cada unidade do comprimento inicial e para cada unidade de variação de temperatura.

Da relação $\Delta L = L - L_0$, temos:

$$L = L_0 + \Delta L \tag{A.1}$$

Considerando agora $A_0 = L_0^2$ e $A = L^2$, temos:

$$\Delta A = A - A_0 = L^2 - L_0^2 \quad (\text{A.2})$$

Substituindo (A.1) em (A.2) obtém-se:

$$\Delta A = L^2 - L_0^2 = (L_0 + \Delta L)^2 - L_0^2 \quad (\text{A.3})$$

$$\Delta A = (L_0^2 + 2L_0\Delta L + \Delta L^2) - L_0^2 = 2L_0\Delta L + \Delta L^2 \quad (\text{A.4})$$

Como ΔL é muito menor que L_0 , ΔL^2 é desprezível em relação a $2L_0\Delta L$. Assim, têm-se:

$$\Delta A = 2L_0\Delta L \quad (\text{A.5})$$

Fazendo $\Delta L = \alpha L_0\Delta T$, obtém-se:

$$\Delta A = 2L_0\alpha L_0\Delta T = 2\alpha L_0^2\Delta T = 2\alpha A_0\Delta T$$

A grandeza 2α será representada por β , onde é denominada coeficiente de dilatação superficial. Portanto, a equação final é:

$$\Delta A = \beta A_0\Delta T \quad (\text{A.6})$$

Ainda da Figura 13, para o volume do cubo, têm-se: $V_0 = L_0^3$ e $V = L^3$.

Então, como $L = L_0 + \Delta L$, obtemos: $\Delta V = V - V_0 = L^3 - L_0^3 = (L_0 + \Delta L)^3 - L_0^3 = (L_0^3 + 3L_0^2\Delta L + 3L_0\Delta L^2 + \Delta L^3) - L_0^3 = 3L_0^2\Delta L + 3L_0\Delta L^2 + \Delta L^3$.

Como ΔL é muito menor que L_0 , as parcelas $3L_0\Delta L^2$ e ΔL^3 se tornam desprezíveis em comparação a $3L_0^2\Delta L$.

Assim, têm-se:

$$\Delta V = 3L_0^2\Delta L.$$

Fazendo $\Delta L = \alpha L_0\Delta T$, obtém-se:

$$\Delta V = 3L_0^2(\alpha L_0\Delta T) = 3\alpha L_0^3\Delta T$$

A grandeza 3α é representada por γ e é denominada de coeficiente de dilatação volumétrica ou cúbica. Assim, obtém-se a equação:

$$\Delta V = \gamma V_0\Delta T. \quad (\text{A.7})$$