

## Considerações teórico-experimentais sobre o resfriamento pós morte

G. S. Marinho <sup>a,\*</sup>, R. F. Farias <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Laboratório de Transferência de Calor, Natal (RN), Brasil.

\*Endereço de e-mail para correspondência: [george.marinho@ufrn.br](mailto:george.marinho@ufrn.br). Tel.: +55-84-32153740.

Recebido em 26/05/2020; Revisado em 08/12/2022; Aceito em 21/12/2022

### Resumo

Realizou-se um estudo comparativo entre dados de temperatura relativos ao resfriamento de corpos. Foram considerados dados obtidos a partir de dois modelos matemáticos e dados experimentais, obtidos a partir do resfriamento de uma amostra de carne bovina. Sensores pirométricos foram inseridos na amostra para registro da temperatura durante o resfriamento em ambiente com controle térmico. As comparações foram realizadas por meio de gráficos de intervalos de tempo de resfriamento. Diferenças significativas foram constatadas entre os dois modelos teóricos utilizados no estudo quando esses modelos eram comparados aos resultados experimentais. Apresentam-se considerações sobre as possíveis causas das diferenças observadas. Perspectivas sobre o desenvolvimento da Tanatologia são descritas.

*Palavras-Chave:* Tanatologia; Transferência de calor; Temperatura; Hora de óbito.

### Abstract

A comparative study was carried out between temperature data related to the cooling of bodies. Data obtained from two mathematical models and experimental data, obtained from cooling a sample of beef were considered. Pyrometric sensors were inserted in the sample to record the temperature during cooling in a thermally controlled environment. The comparisons were made using graphs of cooling time intervals. Significant differences were found between the two theoretical models used in the study when these models were compared to the experimental results. Considerations are presented on the possible causes of the observed differences. Perspectives on the development of Thanatology are described.

*Keywords:* Thanatology; Heat transfer; Temperature; Time of death.

## 1. INTRODUÇÃO

A Criminalística pode ser definida como a arte de identificar indícios e interpretá-los por meio de conhecimentos adquiridos das ciências biológicas, físicas, matemáticas e químicas.

Essencial à investigação criminal, a estimativa da hora de óbito pode ser feita por meio de técnicas como: nível de potássio vítreo, rigidez cadavérica, nebulosidade da córnea ou temperatura corporal, entre outras [1,2].

Na análise do resfriamento pós morte, dados de temperatura corporal são aplicados em relações matemáticas, teóricas ou empíricas, que combinam variáveis físicas para quantificação de parâmetros

associados às trocas de energia entre o corpo e o meio, permitindo estimar o tempo pós morte.

Condução, convecção, radiação e mudança de fase são modos de transferência de calor próprios de máquinas térmicas utilizadas para conversão de energia e que fazem parte do cotidiano – e.g., aquecedores, condicionadores de ar e refrigeradores. Estender os conhecimentos da Termodinâmica à transferência de calor em corpo humano não é tarefa trivial. Massa corpórea, idade, sexo, etnia, vestimenta e condições do ar no ambiente em que a vítima foi encontrada são apenas alguns dos parâmetros que interferem no processo [1,3].

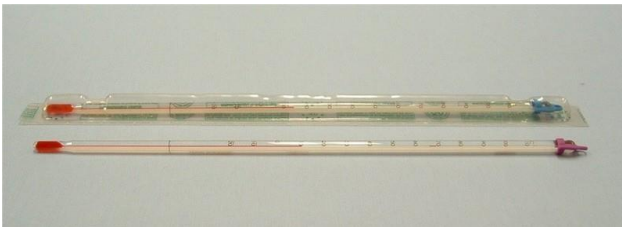
Sem se aprofundar nas minúcias desses parâmetros, desenvolveu-se uma análise comparativa simplificada, a

partir de dados de resfriamento obtidos por meio de duas ferramentas matemáticas utilizadas na estimativa do tempo pós-morte, aplicadas a um experimento de resfriamento de carne bovina.

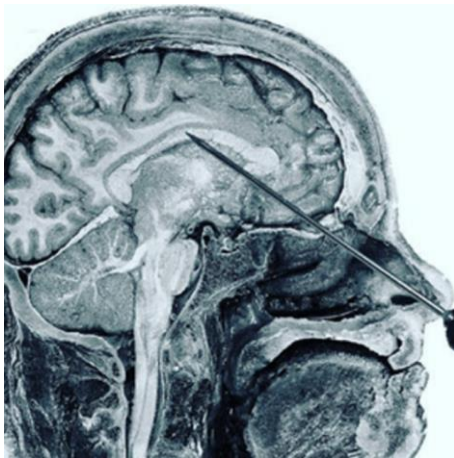
## 2. FÍSICA DE CORPOS EM RESFRIAMENTO

A temperatura é a primeira grandeza metrológica com a qual o perito inicia seu trabalho ao chegar à cena do crime. Existem pirômetros apropriados para medir e registrar a variação temporal da temperatura nas duas etapas de coleta de dados.

O termômetro de líquido em bulbo de vidro (TLBV) para inserção retal (**Figura 1**) é utilizado na etapa anterior a remoção do corpo. O termômetro com sonda “agulha” para medição da temperatura do cérebro (**Figura 2**) é empregado após a chegada do corpo à sala de necropsia.



**Figura 1.** Termômetros retais pós morte [4].



**Figura 2.** Termômetro com sonda “agulha” (termopar) para medição pós morte da temperatura do cérebro [5].

Outras partes do corpo humano podem ser utilizadas para fins de investigação forense – e.g., fígado, globo ocular e tímpano [1]. Qualquer que seja a opção, a qualidade dos dados que serão obtidos dependerá da concomitância entre técnica adequada e instrumentação específica. Mesmo quando essa condição é satisfeita, entre dispor de dados de resfriamento e determinar a hora da morte, há um longo caminho a ser percorrido. Para trilha-lo, o perito precisará de conhecimentos de diversas áreas, em particular da Termodinâmica.

A troca de energia entre um corpo aquecido e o ambiente despertou a curiosidade de vários pensadores ao

longo da história. Em 1701, quando se acreditava que calor era uma substância (“calórico”), Isaac Newton publicou anonimamente um artigo seminal na revista *Philosophical Transactions* intitulado *Scala graduum caloris – Calorum descriptiones et signa*, onde propôs uma relação matemática para descrição do fenômeno [1]. Denominada “Lei do Resfriamento”, a relação estabelece que, se um corpo a uma temperatura superficial  $\theta_s$  é colocado em um meio a uma temperatura constante  $\theta_\infty$ , ele sofre variação temporal de temperatura expressa por:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\kappa(\theta_s - \theta_\infty) \quad (1)$$

sendo  $k$  a constante de proporcionalidade adimensional.

A **Equação 1** pode ser reescrita para adequar-se à análise do tempo de resfriamento do corpo humano, adquirindo a seguinte forma [6]:

$$t = -\frac{1}{k} \left[ \ln \left( \frac{\theta_m - \theta_\infty}{\theta_0 - \theta_\infty} \right) \right] \quad (2)$$

sendo:  $t$  o tempo pós morte,  $\theta_m$  a temperatura retal média corporal e  $\theta_0$  a primeira temperatura retal tomada no local do óbito. A constante de proporcionalidade é obtida por meio da seguinte expressão [6]:

$$k = -\frac{1}{\Delta t} \left[ \ln \left( \frac{\theta_1 - \theta_\infty}{\theta_0 - \theta_\infty} \right) \right] \quad (3)$$

sendo  $\Delta t$  o intervalo de tempo entre duas medições da temperatura retal pós-morte ( $\theta_0$  e  $\theta_1$ ).

Apesar da praticidade, a **Equação 2** fornece resultados muito limitados ao ser aplicada ao resfriamento do corpo humano. Originalmente, ela foi expressa em termos de taxa de transferência de calor, na seguinte forma:

$$\frac{\delta Q}{dt} = hA(\theta_s - \theta_\infty) \quad (4)$$

sendo:  $\delta Q/dt$  a taxa de calor liberado pelo corpo (em Watt),  $h$  o coeficiente convectivo de transferência de calor (em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) e  $A$  a área superficial do corpo (em  $m^2$ ).

O termo  $\theta_s$  restringe a confiabilidade de aplicação da **Equação 4** – e, portanto, da **Equação 2**, à análise do resfriamento do corpo humano, uma vez que podem ocorrer diferenças significativas de temperatura entre pontos distintos da superfície. Some-se a isso o fato de

que as diferenças aumentam na proporção direta das dimensões do corpo.

A obtenção de uma temperatura superficial média ( $\theta_s$ ) que seja, de fato, representativa para desenvolvimento da análise do fenômeno, não é, nem de longe, o maior dos problemas relativos ao uso da **Equação 2** para estimativa do tempo de resfriamento de um cadáver.

Dos parâmetros que caracterizam os processos de transferência de calor – emissividade “ $\varepsilon$ ” (na radiação), condutividade “ $\kappa$ ” (na condução) e o coeficiente “ $h$ ” (na convecção), este último possui o maior número de fatores determinantes. Esses fatores dependem de outras propriedades (e.g., capacidade calorífica do corpo e difusividade térmica da superfície), e essas, por sua vez, variam em função da temperatura [7].

O primeiro estudo registrado sobre resfriamento de corpos humanos data de 1839, do médico inglês John Davey, que não derivou uma equação, mas vaticinou a importância da variável na investigação criminal [8].

Em 1868, Harry Rainy [9] apresentou a primeira tentativa de quantificar a taxa de resfriamento de cadáveres, tendo afirmado que a Lei do Resfriamento de Newton não era exatamente adequada ao caso [8].

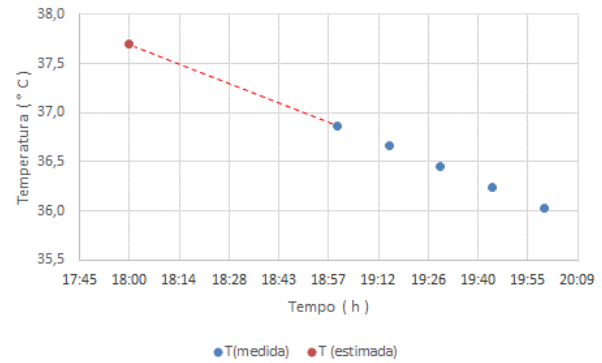
Em 1962, T. Marshall & F. Hoare propuseram uma relação denominada “Curva Padrão de Resfriamento” para quantificar a hora de óbito [1], expressa por:

$$t = \frac{\theta_m - \theta_L}{0,8333} \quad (5)$$

sendo:  $t$  o tempo decorrido (em horas) desde o óbito,  $\theta_m$  a temperatura média corporal humana (em °C) e  $\theta_L$  a temperatura do corpo (em °C) medida no local do óbito.

No modelo de Marshall & Hoare (**Equação 5**), o corpo humano perde calor de modo linear, resultando em uma redução de temperatura de 0,8333 °C por hora. Porém, para qualquer taxa, desde que o modelo matemático seja linear (i.e., equação de primeira ordem), a estimativa do tempo pós morte constitui um procedimento simples: de posse dos dados de temperatura e da taxa de perda de calor, aplica-se a equação no sentido decrescente do tempo e calcula-se o momento em que a temperatura corresponde àquela em vida.

Como ilustração, suponha-se um perito convocado à cena de um crime. Ao chegar, às 19h00, ele realiza a primeira medição de temperatura do corpo e, na hora seguinte, faz novas medições a cada 15 minutos. Depois, aplicando o modelo de Marshall & Hoare (**Equação 5**), ele obtém o gráfico temporal ilustrado na Fig. 3. Em seguida, ele estende o início da reta de resfriamento desde o ponto 36,9 °C (primeira medição) até 37,7 °C, correspondente à temperatura retal média corporal humana [6], conforme representado na **Figura 3** pela linha tracejada.



**Figura 3.** Gráfico hipotético de resfriamento humano pós morte.

Nessa situação hipotética, o modelo de Marshall & Hoare permitirá ao perito estimar que a vítima se apresentava com temperatura de 37,7 °C às 18h00 – hora provável do crime.

Depois de Marshall & Hoare, outros modelos matemáticos (teóricos e empíricos) foram propostos. Apesar de refinados, a confiabilidade continua baixa.

A principal razão da deficiência dos modelos de previsão do resfriamento humano se deve à incerteza na obtenção da taxa de transferência de calor entre o corpo e o meio. Como já explicado, há um conjunto extenso de variáveis que afetam o processo. Algumas das variáveis são independentes, outras não. Mesmo aquelas que são mensuráveis, apresentam elevado grau de incerteza.

Considera-se uma estimativa “razoável” do tempo pós-morte um valor dentro de uma margem de até 2 horas [2]. Daí porque peritos preferem reportar um intervalo de tempo (e.g., “entre 17h00 e 19h00”), em vez do valor específico (e.g., “às 18h00”) obtido a partir de algum dos modelos disponíveis [1].

Dito isso, relatam-se a seguir os procedimentos experimentais adotados para análise do resfriamento de uma amostra de carne bovina, cujos resultados foram posteriormente comparados àqueles obtidos por meio das relações supracitadas – **Equações 2 e 5**.

### 3. MATERIAL E PROCEDIMENTOS

A parte experimental do estudo foi desenvolvida utilizando-se recursos geralmente disponíveis em laboratórios de ensino de transferência de calor de instituições de ensino superior.

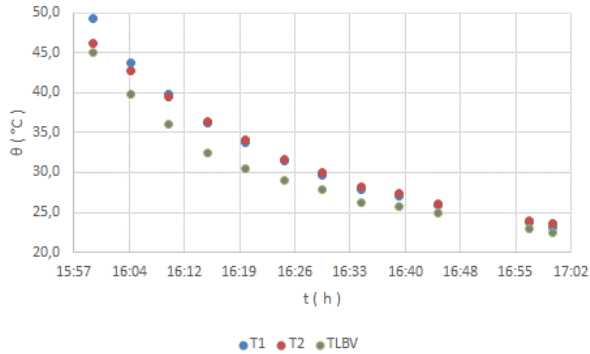
#### 3.1. Preparação do experimento

Na **Figura 4** observam-se os elementos que integraram o conjunto experimental. Por meio de uma balança digital foi realizada a medição da massa da amostra de carne bovina adquirida em açougue.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

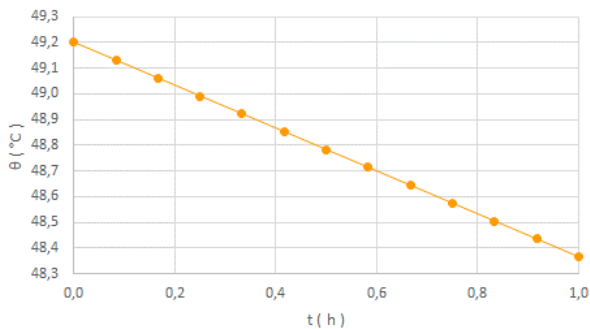
Na **Figura 7** veem-se as curvas experimentais relativas ao resfriamento da amostra de carne bovina, cujos valores foram obtidos por meio do pirômetro TLBV e termopares T1 e T2.



**Figura 7.** Dados experimentais.

Analisando-se a **Figura 7**, percebe-se que as curvas apresentam tendências concordantes. A maior diferença entre as temperaturas indicadas por termopares e pelo TLBV ficou em cerca de 4 °C. Entre os termopares, determinou-se um desvio médio de 2 °C. Esses valores atendem às expectativas de desvios de cada tipo de pirômetro.

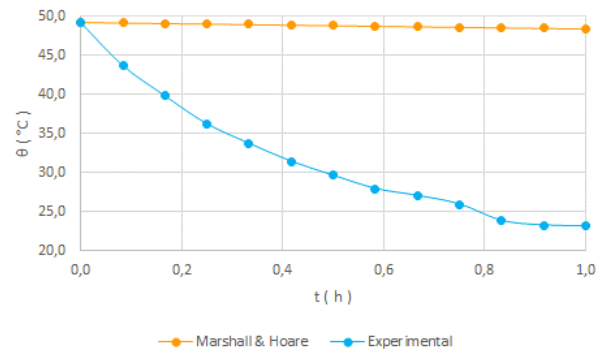
Aplicando-se a temperatura experimental inicial ( $\theta_i = 49,20$  °C) ao modelo de resfriamento de Marshall & Hoare, obtêm-se os resultados ilustrados na **Figura 8**.



**Figura 8.** Dados do modelo Marshall & Hoare.

Como era esperado de um modelo linear, i.e., baseado em uma equação matemática de primeira ordem (**Equação 7**), constatou-se decréscimo constante da temperatura teórica da amostra em função do tempo, conforme se vê na reta apresentada na **Figura 8**.

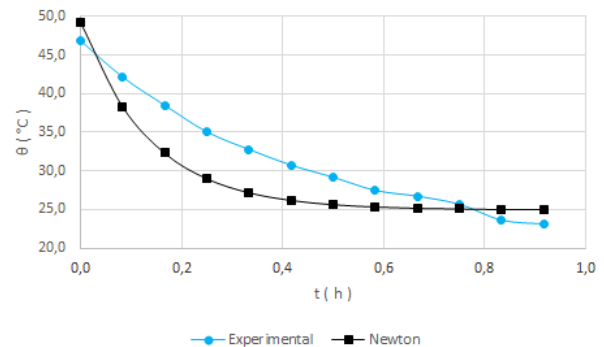
Considerando-se os dados obtidos por meio do modelo de resfriamento de Marshall & Hoare e os dados obtidos experimentalmente – no caso, valores médios das temperaturas determinadas por meio dos pirômetros T1, T2 e TLBV, para um mesmo intervalo de tempo, chega-se aos resultados mostrados na **Figura 9**.



**Figura 9.** Dados do modelo Marshall & Hoare e experimentais.

A discrepância (até 25 °C) entre teoria e experimento, ilustrada na **Figura 9** apenas para efeitos de visualização dos modelos, foi uma consequência do valor da taxa de resfriamento adotado no modelo teórico de Marshall & Hoare – que prevê uma variação inferior a 1 °C dentro do intervalo de tempo considerado (1 h) e que é aplicável ao corpo humano. Evidentemente, o modelo não se adequa à análise do resfriamento da amostra do experimento.

Considerando-se o modelo de resfriamento proposto por Newton e os valores médios das temperaturas determinadas no experimento, as distribuições temporais assumiram os perfis indicados na **Figura 10**.

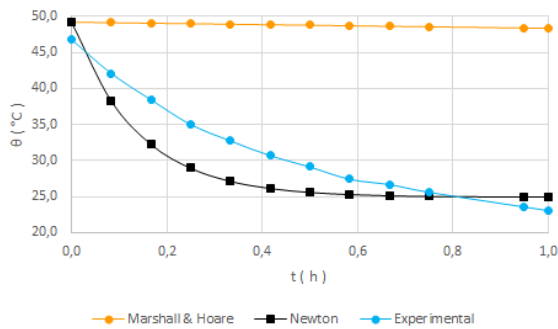


**Figura 10.** Dados do modelo de Newton e experimentais.

Novamente, a ilustração (**Figura 10**) serve apenas como meio para facilitar a visualização dos modelos, com a maior discrepância entre os valores atingindo 6 °C.

Contribuíram para divergências entre resultados teóricos e experimental a diferença entre as massas consideradas em cada caso e a eliminação do efeito da condução de calor nos experimentos. O fato de o experimento ter sido realizado com a amostra suspensa no ar, tornou a situação real mais próxima das condições de contorno requeridas para descrição do fenômeno por meio da Lei do Resfriamento de Newton, cujo modelo considera o processo puramente convectivo. Além disso, pode-se especular que as diferenças observadas na **Figura 10** sejam uma consequência das perdas de calor por radiação, não quantificadas no modelo de resfriamento proposto por Newton.

Na **Figura 11** comparam-se as curvas de resfriamento obtidas por meio do experimento e dos modelos matemáticos teórico (Newton, **Equação 6**) e empírico (Marshall & Hoare, **Equação 7**).



**Figura 11.** Resultados experimentais, teórico e empírico.

As diferenças entre os dados de Marshall & Hoare e Newton são patentes, como se vê na **Figura 11**. Enquanto os primeiros pressupõem um resfriamento linear, o segundo trata o fenômeno como uma função exponencial, onde as diferenças de temperatura são maiores no início e diminuem durante a evolução do processo, corroborando os resultados obtidos no experimento. Essa interpretação pode conduzir à conclusão de que a Lei do Resfriamento de Newton é adequada à descrição do resfriamento de cadáveres. Contudo, não é uma dedução correta.

Aplicando a Lei de Newton ao resfriamento de 42 cadáveres, Costa [6] mostrou que as diferenças entre os dados teóricos e reais chegam a cerca de 30 %. Desvios dessa ordem podem ter origem na constante “k” (**Equação 2**), que possui parâmetros convectivos cujos comportamentos ainda não são satisfatoriamente descritos [7].

Mesmo com recursos computacionais modernos, a aplicação da Lei de Newton à análise do resfriamento de cadáveres tem limitações intrínsecas – e.g., ela não considera perdas de calor por radiação, as quais não são desprezíveis. Mesmo em situações de baixas potências térmicas (caso do corpo humano), a radiação pode contribuir com até 30 % da energia liberada no processo [10]. Adicionalmente, há aquele enorme conjunto de fatores ambientais e características humanas que tornam a análise um desafio.

Apesar do número significativo de pesquisadores que aceitou o desafio de tentar descrever o resfriamento do corpo humano, resultando em mais de 150 anos de pesquisa, desde que Harry Rainy [9] formulou a primeira proposta para quantificar o processo, estimar com exatidão a hora da morte só é possível no caso em que a vítima falece na presença de um médico [1].

Do ponto de vista da Termodinâmica, a troca de energia entre um corpo e o meio envolvente depende do coeficiente convectivo “h”, que só pode ser estimado com

grau limitado de confiabilidade por meio de soluções semiempíricas complexas, enquanto as soluções analítica ou numérica produzem resultados distantes da realidade. Todavia, não há razão para pessimismo.

Novas técnicas continuam a ser desenvolvidas visando disponibilizar à Criminalística ferramentas necessárias ao aprimoramento da investigação.

Para medições de altíssima resolução de pequenas variações da temperatura de órgãos do corpo humano, já está disponível a termografia por micro-ondas (MTS – microwave thermography system) [11].

Em fase de pesquisa, a espectroscopia de ressonância magnética do hidrogênio permitirá identificar produtos derivados da decomposição do tecido cerebral e, assim, avaliar com maior confiabilidade o tempo pós morte [2].

A análise de decomposição do DNA se mostra promissora. Mas, depende de uma técnica complementar denominada “citometria de fluxo multiparamétrica” [2] – usada na contagem e classificação de partículas microscópicas imersas em um fluido em escoamento. Por enquanto, continua pouco acessível.

Pesquisas sobre decomposição de cadáveres, baseadas em estudos com porcos, permitiram estabelecer a primeira relação empírica para estimativa do tempo pós morte, onde as principais variáveis consideradas são: umidade, temperatura e pressão parcial do oxigênio [12].

Quanto à pesquisa sobre modelos matemáticos, tanto a simplificação do volume de controle (e.g., considerar a geometria do corpo humano semelhante a um cilindro) quanto a modificação das equações de resfriamento (e.g., introduzir mais termos exponenciais), até agora, resultaram no aumento do trabalho sem a devida melhoria na exatidão dos resultados [2].

#### 4. CONCLUSÕES

A estimativa da hora de óbito constitui um parâmetro indispensável à investigação criminal. O diagnóstico cronológico da morte – conhecido por cronotanatognose ou tanatocronodiagnose, tem sido continuamente aperfeiçoado por meio da pesquisa. Entretanto, apesar dos esforços, permanece uma questão aberta, restando ao pesquisador recorrer ao estudo experimental e apoiar-se em uma das mais poderosas ferramentas da Criminalística moderna – a estatística [13].

Conforme observado aqui, experimentalmente, a temperatura da superfície do corpo é representativa nos casos de convecção envolvendo corpos de dimensões relativamente pequenas. Talvez seja possível reduzir a diferença entre o teórico e o real, ou, pelo menos, facilitar a análise, introduzindo-se um novo parâmetro – um fator de forma geométrico “humano”, que considere as características dimensionais dos corpos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D.P. Lyle. *Forensics: a guide for writers*. Georgetown, ON, Canada, F + W Publications, Inc., 2008, p. 55-58.
- [2] M. Kaliszana, R. Hauser, G.K. Wighton. Estimation of the time of death based on the assessment of post mortem processes with emphasis on body cooling. *Legal Medicine* **11**, 111–117, 2009.
- [3] C. Henssge. With reference to the paper by Hubig et al. entitled “Temperature based forensic death time estimation: The standard model in experimental test”. *Legal Medicine* **19**, 112, 2016.
- [4] CSI Crime Scene Investigation. *Post mortem rectal thermometer*, 2020. Disponível em: [https://www.csiequipment.com/post-mortem-rectal-thermometer\\_p31751.aspx](https://www.csiequipment.com/post-mortem-rectal-thermometer_p31751.aspx)  
Acesso em: 15/05/2020.
- [5] R. Hernandez. *Medição da temperatura corporal pós-morte*. Canal de Perícia, 2020.  
Disponível em:  
<http://www.canaldepericia.org/post/medi%C3%A7%C3%A3o-da-temperatura-corporal-p%C3%B3s-morte>  
Acesso em: 15/05/2020.
- [6] L.R.S. Costa. *Estimativa do tempo decorrido de morte através da análise do resfriamento corporal*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Odontologia de Piracicaba, Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- [7] G.S. Marinho, R.F. Farias. Demonstração experimental do efeito da temperatura na mudança de fase. *Mens Agitat* **15**, 21-25, 2020.
- [8] B. Knight. The evolution of methods for estimating the time of death from body temperature. *Forensic Science International* **36**, 47-55, 1988.
- [9] H. Rainy. On the cooling of dead bodies as indicating the length of time since death. *Glasgow Medical Journal* **1**, 323-330, 1868.
- [10] G.S. Marinho. Intensificação do fluxo de ar por convecção natural entre placas assimetricamente aquecidas em um canal vertical: análise dos efeitos da potência térmica, posição e emissividade. *Tese de Doutorado*, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.
- [11] L.M. Al-Alousi, R.A. Anderson, D.M. Worster, D.V. Land. Multiple-probe thermography for estimating the postmortem interval: I. Continuous monitoring and data analysis of brain, liver, rectal and environmental temperatures in 117 forensic cases. *Journal of Forensic Science* **46(2)**, 317-322, 2001.
- [12] A.A. Vass. The elusive universal post-mortem interval formula. *Forensic Science International* **204**, 34–40, 2011.
- [13] A.R. Piquero, D. Weisburd. *Handbook of Quantitative Criminology*. New York, Springer, 2010.