



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**PROPOSITURA DE ADIMENSIONAIS RELEVANTES NA DINÂMICA
DE AQUECIMENTO COM LENTES DE FRESNEL**

Maria Eduarda de Melo Gonçalves Dias

**UBERLÂNDIA - MG
2019**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Propositura de Adimensionais Relevantes na Dinâmica de Aquecimento
com Lentes de Fresnel**

Maria Eduarda de Melo Gonçalves Dias

**Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como
parte dos requisitos necessários para a
aprovação na disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso do curso de Engenharia
Química.**

UBERLÂNDIA - MG
2019

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE MARIA EDUARDA DE MELO
GONÇALVES DIAS APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA, EM 02/07/2019.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
Orientador - FEQUI/UFU

Eng^a Dayana D'Arc de Fátima Palhares
Doutoranda PPGEQ/UFU

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
FEQUI/UFU

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	ii
Lista de Símbolos	iii
Resumo.....	iv
Abstract	v
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – OBJETIVO GERAL	1
1.1.1 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 – ENERGIA SOLAR	3
2.2 – CONCENTRADOR SOLAR: LENTE DE FRESNEL	4
2.2.1 – LENTE	4
2.2.2 – CONCENTRADOR SOLAR	4
2.3 – APLICAÇÃO	5
2.4 – ADIMENSIONAIS	5
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	6
3.1 – II GRUPOS	7
3.2 – AGRUPAMENTOS DE ADIMENSIONAIS	7
3.3 – BALANÇO DE ENERGIA	8
3.4 – VARIAÇÃO DA ÁREA DA LENTE DE FRESNEL, FLUXO DE RADIAÇÃO E MASSA DO CORPO DE PROVA	9
3.5 – MATERIAIS	10
3.6 – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (h)	11
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	12
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Curva de π_5 em função de π_w	19
Figura 4.2 - Curva de π_5 em função de π_w (após divisão)	20
Figura 4.3 - Parâmetro “a” em função da densidade dos materiais	21
Figura 4.4 - Parâmetro “a” em função do calor específico dos materiais.....	21
Figura 4.5 - Parâmetro “b” em função da densidade dos materiais	22
Figura 4.6 - Parâmetro “b” em função do calor específico dos materiais.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Matriz de Planejamento	9
Tabela 3.2 – Propriedades dos materiais	10
Tabela 4.1 - Resultados dos adimensionais para o Aço Inoxidável AISI 304	12
Tabela 4.2 - Resultados dos adimensionais para o Berílio	13
Tabela 4.3 -Resultados dos adimensionais para o Carbetto de Sílicio	13
Tabela 4.4 - Resultados dos adimensionais para o Constantan	14
Tabela 4.5 - Resultados dos adimensionais para o Ferro Puro.....	15
Tabela 4.6 - Resultados dos adimensionais para a Liga Pt-Rh	16
Tabela 4.7 - Resultados dos adimensionais para o Níquel Puro	16
Tabela 4.8 - Resultados dos adimensionais para Óxido de Alumínio.....	17
Tabela 4.9 - Resultados dos adimensionais para Platina.....	18
Tabela 4.10 - Parâmetros da Regressão Não Linear.....	20
Tabela 4.11 - Parâmetros para Regressão Múltipla.....	24

LISTA DE SÍMBOLOS

- α_A - difusividade térmica do ar [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$].
 α_s - absortividade do corpo de prova [-];
 a - área da interceptação do corpo de prova [m^2];
 A - área da Lente de Fresnel [m^2];
 C_p - calor específico do corpo de prova [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$];
 D - diâmetro do corpo de prova [m];
 $F_{s\infty}$ - fator de forma do corpo de prova para o ambiente [-];
 G - fluxo de radiação [$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$];
 g - aceleração da gravidade [m s^{-2}];
 h - coeficiente convectivo de transferência de calor [$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$];
 K - condutividade térmica do ar [$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$];
 K_s - condutividade térmica do corpo de prova [$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$];
 m - massa do corpo de prova [kg];
 Nu - número de Nusselt [-];
 Pr - número de Prandtl [-];
 T_{∞} - temperatura ambiente [K];
 T - temperatura da superfície do corpo de prova [K];
 t_a - tempo de aquecimento [s].
 T_e - temperatura de equilíbrio [K];
 V - volume do corpo de prova [m^3];
 β - coeficiente de expansão térmica [K^{-1}];
 γ - difusividade cinemática do ar [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$];
 ε_s - emissividade do corpo de prova [-];
 ρ - densidade do corpo de prova [kg m^{-3}];
 ρ_c - refletividade do corpo de prova [-];
 σ - constante de StephanBoltzman= $5,67.10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$;
 τ - transmissividade da Lente de Fresnel [-];

RESUMO

O Sol é a estrela central do sistema solar, sendo a principal fonte de energia da Terra. A canalização da energia vinda do Sol para o aquecimento de fluidos é uma técnica muito utilizada atualmente, conseguida através do uso de coletores solares, que são trocadores de calor que transformam radiação solar em calor e se dividem em concentradores e não-concentradores. Concentradores solares possibilitam atingir altas escalas de temperatura, resultando em uma eficiência termodinâmica melhor, redução de perdas devido a uma área de aquecimento menor e a redução de custos de material de construção. O presente trabalho tem como objetivo avaliar os números adimensionais relacionados no processo de aquecimento, por energia solar, de determinados recipientes de diferentes materiais através da utilização de concentrador solar do tipo Lente de Fresnel. Dessa forma, através do Teorema Pi - Buckingham, Balanço de Energia e esforços computacionais foram encontrados dois parâmetros que puderam ser expressos matematicamente, onde um deles mostrou ter relação com a densidade e o calor específico dos materiais, enquanto o outro se manteve constante. Sendo, então, possível encontrar uma relação matemática entre os números adimensionais estudados.

Palavras-chave: adimensionais, Lente de Fresnel, aquecimento, energia solar.

ABSTRACT

The Sun is the central star of the solar system, being the main energy source of Earth. The channeling of energy from the Sun for fluid heating is a technique widely used today, achieved through the use of solar collectors, that are heat exchanges that transform solar radiation in heat, and there are solar concentrators and not concentrators. Solar concentrators are able to achieve high temperatures, resulting in a better thermodynamic efficiency, loss reduction due to a smaller heating area and the reduction of construction material costs. The present work has the goal to evaluate the dimensionless numbers related in the heating process, by solar energy, of certain containers of different materials, through the use of solar concentrators like Fresnel Lens. Thus, through the Buckingham Pi Theorem, Energy Balance and computational efforts, two parameters were found, that could be expressed mathematically, where one of them showed to have relation with the density and specific heat of materials, while the other remained constant. Then, a mathematical relation was found between the dimensionless numbers studied.

Keywords: dimensionless, Fresnel Lens, heating, solar energy.

1. INTRODUÇÃO

A principal fonte de energia da Terra é oriunda da estrela central do sistema solar, o Sol. Sua capacidade energética, absorvida pelo globo terrestre, equivale à explosão de 1200 bombas atômicas por segundo e pela escala de vida humana pode ser considerada inesgotável, já que o seu tempo de vida útil se estende a bilhões de anos. O seu aproveitamento, tanto como fonte de calor quanto de luz, é uma das alternativas energéticas mais promissoras.

Ao contrário das fontes convencionais, a energia solar é uma energia limpa. Seu sistema de captação é adaptável, podendo ser interceptada preferencialmente em ambientes áridos e semi-áridos, a exemplo dos desertos e do sertão. Em contrapartida, pode ser captada também, em ambientes urbanos através de telhados, vidros e fachadas.

O uso da energia solar tem aumentado nos últimos anos, pois tem muitas vantagens sobre outras fontes de energia. Além disso, ela é importante na preservação do meio ambiente.

Tem aumentado também o interesse em processos que utilizam o aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos e ambientes a partir do uso de concentradores solares.

A utilização de concentradores solares é vantajosa, principalmente quando se trata da Lente de Fresnel, pois ela possibilita a construção de grande abertura e curta distância focal sem o peso e volume do material que seriam necessários a uma lente convencional. Comparadas a estas, as de Fresnel são bem mais finas, permitindo a passagem de mais luz.

O estudo de qualquer processo envolvendo engenharia requer esforços computacionais e/ou experimentais, como ocorre com o processo de aquecimento de corpos de prova utilizando concentradores solares. Dessa forma, analisar os principais números adimensionais envolvidos nessa dinâmica e suas relações é de grande contribuição para reduzir esses esforços.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é avaliar se existe alguma relação, que possa ser expressa matematicamente, entre os números adimensionais relevantes envolvidos no processo de aquecimento de corpos de prova utilizando concentradores solares do tipo Lente de Fresnel.

1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Encontrar os números adimensionais envolvidos na dinâmica de aquecimento;
- Realizar um Balanço de Energia que represente o processo;

- Verificar os efeitos para área da lente de Fresnel, fluxo de radiação e massa do corpo de prova sobre a dinâmica de aquecimento;
- Encontrar materiais com uma faixa ampla de densidade e calor específico, que possam ser trabalhados respondendo aos valores adotados para área da lente de Fresnel, fluxo de radiação e massa do corpo de prova.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ENERGIA SOLAR

O Sol é a maior fonte de energia conhecida. Com a escassez das fontes de energia naturais e a preocupação com a manutenção ecológica, iniciaram-se várias pesquisas para que se descobrisse como utilizar essa fonte a favor do homem. Desenvolveu-se então o termo “Energia Solar” que significa a utilização da energia vinda desta estrela. No contexto da energia solar, é atualmente muito utilizada a canalização da energia vinda do Sol para o aquecimento de fluidos (PENTEADO *et al.*, 2008).

Atualmente, há grande preocupação relacionada às fontes de energia que podem ser utilizadas pelo homem. As energias renováveis são provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, que é a fonte primária de quase toda energia disponível na Terra, por isso são praticamente inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta (PENTEADO *et al.*, 2008).

É fato que energias renováveis possuem um potencial de exploração e desenvolvimento bastante elevado. As vantagens de sua utilização podem ser centralizadas não apenas na diminuição dos impactos ambientais, mas também na taxa de renovação quase infinita (CABRAL, 2017).

Segundo Prado (2015), ao contrário das fontes convencionais, tais quais o carvão, o urânio e o petróleo, a energia solar não produz resíduos, o que a conceitua como limpa, assim como são a eólica, a geotérmica e a das marés. Seu sistema de captação é adaptável, podendo ser interceptada preferencialmente em ambientes áridos e semi-áridos. Em contrapartida, pode ser captada também, em ambientes urbanos através de telhados, vidros e fachadas.

De toda a radiação solar incidida sobre o planeta, cerca de 30% é refletida para o espaço, 20% é absorvida por nuvens e moléculas do ar. Mesmo que apenas 10% da radiação sejam utilizadas, meros 0,1% desta quantidade são suficientes para atender a necessidade da população da Terra (CHEN, 2011).

O uso das fontes de energia renováveis vem crescendo. Tal crescimento tem sido elevado especialmente para as fontes de energia solar, a energia eólica e a energia advinda de biomassa e resíduos. Apesar dos crescentes investimentos, as energias renováveis ainda contribuem de forma pouco expressiva para atender a demanda global (ANDRADE, 2018).

A energia solar difere da maioria dos sistemas energéticos pela dificuldade de controle, por essa razão o estudo do comportamento do Sol é de extrema importância (PRADO, 2015).

2.2. CONCENTRADOR SOLAR:LENTE DE FRESNEL

2.2.1. LENTE

Comparativamente às lentes convencionais, a lente de Fresnel é mais fina, o seu peso e volume são mais reduzidos, pelo que a luz incidente sofre menos atenuação. Deste modo, a luz emitida pelos faróis equipados com este tipo de lentes consegue ser visível a distâncias maiores. As lentes de Fresnel são lentes planas de anéis circulares concêntricos sucessivos na sua superfície. Este tipo de lente foi inventada pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel, para o uso de faróis (GARCIA, 2013).

Os parâmetros gerais de uma lente de Fresnel comercial são: profundidade, frequência, Pitch (graus) e espessura da lente. Estes parâmetros determinam a distância focal da lente de Fresnel. A desvantagem principal destas lentes é o fato de possuírem aberração cromática, que leva a um decréscimo da eficiência de concentração da energia solar (GARCIA, 2013).

2.2.2. CONCENTRADOR SOLAR

Coletores solares são trocadores de calor que transformam radiação solar em calor. E são divididos fundamentalmente em dois tipos: não-concentradores e concentradores (CABRAL, 2017).

A localização geográfica, a posição, formato e orientação do coletor, duração do dia, estações do ano e condições atmosféricas são alguns dos principais fatores que afetam a quantidade de incidência da radiação (PRADO, 2015).

Os concentradores solares têm como principais vantagens: a possibilidade de atingir altas escalas de temperatura, resultando em uma eficiência termodinâmica melhor, redução de perdas devido a uma área de aquecimento menor e a redução de custos de material de construção (GARG e PRAKASH, 2000).

Rastreabilidade, índice de concentração, formato do absorvedor e temperatura requerida influencia na escolha de um tipo de concentrador. Os mais comuns são: o concentrador plano, o concentrador solar composto, o tipo calha parabólica (cilíndrico), o tipo bacia parabólica (disco), a torre solar e as lentes do tipo Fresnel (PRADO, 2015).

As Lentes de Fresnel utilizam-se dos princípios da refração, diferente da maioria dos concentradores solares, que utilizam sistemas baseados na reflexão. Assim, no caso da Lente de Fresnel, o concentrador é composto por uma ou mais lentes que criam um ponto, uma linha ou uma área de concentração dos raios solares. Eles são absorvidos na zona focal e repassados para a função desejada, que pode ser a geração de energia elétrica, o aquecimento de tubulações, a climatização de ambientes, etc (PRADO, 2015).

2.3. APLICAÇÃO

A dessalinização de águas é um dos processos que utiliza o aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos a partir do uso de concentradores solares.

O consumo de água doce no mundo aumenta a um ritmo superior ao do crescimento da população, restando como uma das saídas para satisfazer as necessidades hídricas, a produção de água doce, retirando-a do mar ou das águas salobras dos açudes e poços (MARINHO *et al.*, 2012).

A água que se encontra na natureza, muitas vezes, tem uma salinidade muito alta tornando-a imprópria para o consumo, chamada de água bruta. A dessalinização tem por objetivo eliminar ou diminuir esta salinidade da água bruta, deixando-a própria para o consumo. A água dessalinizada é também chamada de água doce ou água potável. No processo de dessalinização não se obtém o sal como subproduto. O sal extraído sai no fluxo de salmoura, também chamado de rejeito (SANTOS, 2005).

A dessalinização por concentrador solar proporciona água segura para o consumo humano, é de fácil aplicação, fácil transferência aos usuários de comunidades dispersas de agricultores e outros setores sócio-ocupacionais sem água potável. Da água bruta que entra na unidade dessalinizadora, uma parte sai em forma de água doce ou potável e a outra parte (chama de salmoura) é devolvida à natureza (MARINHO *et al.*, 2012).

2.4. ADIMENSIONAIS

Números adimensionais são comumente utilizados na Engenharia, como o número de Mach ou o número de Reynolds. Tais coeficientes adimensionais prevêm possibilidades de cálculos de acordo a maior aproximação e simplificação possível da realidade (FREITAS *et al.*, 2015).

Como o número de grupos adimensionais é relativamente menor que o número de variáveis físicas, há uma grande redução de esforço experimental para estabelecer a relação entre algumas variáveis.

A maior parte das aplicações em Engenharia é realizada utilizando-se modelos em escala, pois com o uso de adimensionais, experimentos de diferentes escalas apresentam os mesmos valores para os grupos adimensionais a eles pertinentes.

Dessa forma, estudar o comportamento e a relação dos adimensionais relevantes no aquecimento de corpos de prova utilizando Lentes de Fresnel é de grande importância para que se reduza o esforço experimental e computacional ao se trabalhar com esse processo.

3. METODOLOGIA

Primeiramente, foram listadas todas as variáveis relacionadas à dinâmica de aquecimento de corpos de prova:

m - massa do corpo de prova [kg];

ρ - densidade do corpo de prova [kg.m⁻³];

C_p - calor específico do corpo de prova [J.kg⁻¹.K⁻¹];

K_s - condutividade térmica do corpo de prova [J.s⁻¹.m⁻¹.K⁻¹];

h - coeficiente convectivo de transferência de calor [J.s⁻¹.m⁻².K⁻¹];

G - fluxo de radiação [J.s⁻¹.m⁻²];

A - área da Lente de Fresnel [m²];

a - área da interceptação do corpo de prova [m²];

T_e - temperatura de equilíbrio [K];

t_a - tempo de aquecimento [s].

Após a análise das variáveis, montou-se a matriz dos coeficientes abaixo:

	m	ρ	C_p	K_s	h	G	A	a	T_e	t_a
M	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
L	0	-3	2	1	0	0	2	2	0	0
T	0	0	-2	-3	-3	-3	0	0	0	1
Θ	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	0

De acordo com o Teorema Pi - Buckingham o número de π grupos é dado pela Equação 3.1:

$$\text{N}^\circ \text{ de } \pi \text{ grupos} = \text{N}^\circ \text{ de variáveis} - \text{Rank da matriz dos coeficientes} \quad (3.1)$$

Se existir pelo menos uma matriz quadrada da matriz dos coeficientes com determinante diferente de zero, a ordem desta matriz equivalerá ao número de fatores que comporão o núcleo e também ao rank da matriz dos coeficientes. Neste sentido, há mais de uma matriz de ordem 4 cujo determinante não é nulo. Assim, o Rank da matriz dos coeficientes é 4 e o núcleo será composto por 4 fatores (geométrico, dinâmico, cinemático e térmico).

Sendo assim, o número de π grupos é igual a seis e o núcleo (N) será: N = (A, ρ , h, C_p).

3.1. II GRUPOS

Utilizando o Teorema Pi de Buckingham, os seis π grupos são, como mostram as Equações 3.2 a 3.7:

$$\pi_1 = \frac{m}{\rho A^{\frac{3}{2}}} \quad (3.2)$$

$$\pi_2 = \frac{Ks}{h A^{\frac{1}{2}}} \quad (3.3)$$

$$\pi_3 = \frac{G \rho^2 Cp^3}{h^3} \quad (3.4)$$

$$\pi_4 = \frac{a}{A} \quad (3.5)$$

$$\pi_5 = \frac{Te \rho^2 Cp^3}{h^2} \quad (3.6)$$

$$\pi_6 = \frac{ta h}{p Cp A^{\frac{1}{2}}} \quad (3.7)$$

O tempo de aquecimento (t_a) é o tempo necessário para que temperatura do corpo de prova permaneça constante, sendo que esta é a temperatura de equilíbrio (T_E), onde ela é também a temperatura máxima que o corpo de prova atinge. Tanto T_E quanto t_a são variáveis importantes para o processo, portanto pelo menos um dos adimensionais escolhidos deve contê-las.

Espera-se que a temperatura de equilíbrio seja maior com o aumento do fluxo da radiação e da área da lente de Fresnel e com a diminuição da massa do corpo de prova, quando comparada para um mesmo material. Dessa maneira, deseja-se relacionar o π_5 , que contém a temperatura de equilíbrio, com outro adimensional que contenha a relação $\frac{A \times G}{m}$. Desse modo, os outros 5 (cinco) π grupos foram agrupados de várias maneiras entre si, a fim de se encontrar essa relação.

3.2. AGRUPAMENTO DE ADIMENSIONAIS

Foi possível agrupar os adimensionais de modo que as principais variáveis fossem relacionadas.

Assim, os possíveis adimensionais encontrados foram, como mostram as Equações 3.8 a 3.11:

$$\pi_x = \frac{\pi_3 \pi_2}{\pi_1} = \frac{\rho^3 C_p^3 k_s AG}{h^4 m} \quad (3.8)$$

Ou

$$\pi_y = \frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_1} = \frac{\rho^2 C_p^2 t_a AG}{h^2 m} \quad (3.9)$$

Ou

$$\pi_z = \frac{\pi_3 \pi_4}{\pi_1 \pi_2} = \frac{\rho^3 C_p^3 a AG}{h^2 k_s m} \quad (3.10)$$

Ou

$$\pi_w = \frac{\pi_3 \pi_4}{\pi_1 \pi_6} = \frac{\rho^4 C_p^4 a AG}{h^2 t_a m} \quad (3.11)$$

A partir da análise dos adimensionais acima, vê-se que o π_w é um adimensional interessante, pois ele possui o tempo de aquecimento do corpo de prova, além das outras propriedades. Sendo assim, trabalhou-se apenas com π_5 em função desse adimensional, como segue a Equação 3.12:

$$\pi_5 = f(\pi_w) \quad (3.12)$$

3.3. BALANÇO DE ENERGIA

Posteriormente, realizou-se o Balanço de Energia no corpo de prova, representado pelas Equações 3.13 a 3.15:

$$\text{Acúmulo} = \text{Entrada(radiação)} - \text{Saída(radiação+reflexão+convecção)} \quad (3.13)$$

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = GA\tau - (1-\alpha_s)GA\tau - F_{s\infty} \epsilon_s a \sigma (T^4 - T_\infty^4) - ha(T - T_\infty) \quad (3.14)$$

Seja $\rho V = m$,

$$m C_p \frac{dT}{dt} = GA\tau - (1-\alpha_s)GA\tau - F_{s\infty}\epsilon_s a\sigma(T^4 - T_\infty^4) - ha(T - T_\infty) \quad (3.15)$$

Foi feita a consideração de que o meio ambiente recebe a maior parte da radiação emitida ou refletida pelo corpo de prova, então, $F_{s\infty} = 1$. Ainda, foi considerado que as condições da Lei de Kirchoff estavam presentes, assim, $\alpha_s = \epsilon_s$. E, por fim, que o somatório das propriedades radiativas do corpo de prova (refletividade, absorvidade e transmissividade) é igual a 1 e que o corpo de prova é opaco, então $\rho c = 1 - \alpha_s$.

Baseado em trabalhos da literatura, a temperatura ambiente adotada foi igual a 300 K, emissividade do corpo de prova foi igual a 0,9 e a transmissividade da Lente de Fresnel 0,74.

De posse do Balanço de Energia, escolheram-se, então, nove materiais na literatura, e variando os valores de m , G e A para cada material, obteve-se resultados para π_5 e π_w .

3.4. VARIAÇÃO DA ÁREA DALENTE DE FRESNEL, DO FLUXO DE RADIAÇÃO E MASSA DO CORPO DE PROVA

Para cada material, foram feitas as combinações de m , G e A conforme a Matriz de Planejamento, representada pela Tabela 3.1, para, posteriormente, obter 27 valores de temperatura de equilíbrio e tempo de aquecimento.

Tabela 3.1 – Matriz de Planejamento

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]
0,010	0,9	500	0,055	1,0	1000
0,010	0,9	750	0,055	1,1	500
0,010	0,9	1000	0,055	1,1	750
0,010	1,0	500	0,055	1,1	1000
0,010	1,0	750	0,100	0,9	500
0,010	1,0	1000	0,100	0,9	750
0,010	1,1	500	0,100	0,9	1000
0,010	1,1	750	0,100	1,0	500
0,010	1,1	1000	0,100	1,0	750
0,055	0,9	500	0,100	1,0	1000
0,055	0,9	750	0,100	1,1	500
0,055	0,9	1000	0,100	1,1	750
0,055	1,0	500	0,100	1,1	1000
0,055	1,0	750			

Sabe-se que: $\rho V = m$, ou seja, $V = \frac{m}{\rho}$.

Considerando que os corpos de prova eram esféricos, tem-se que, pelas Equações 3.16, 3.17 e 3.18:

$$V = \frac{4 \pi r^3}{3} \quad (3.16)$$

Logo,

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (3.17)$$

Sendo assim,

$$a = 4 \pi \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.18)$$

Onde, $\pi = 3,141592654$.

Ou seja, a área do corpo de prova varia com sua massa (m), tendo impacto diretamente nas perdas radiativas e convectivas.

3.5. MATERIAIS DOS CORPOS DE PROVA

A escolha dos materiais foi feita levando em consideração, principalmente, o valor da densidade e do calor específico, mesmo que alguns possuam alto valor agregado, pois o presente trabalho não tinha como objetivo procedimentos experimentais.

As propriedades (densidade, calor específico e condutividade térmica) dos materiais são apresentadas na Tabela 3.2 (INCROPERA *et al.*, 2008).

Tabela 3.2 – Propriedades dos materiais

Material	ρ [kg m ⁻³]	C_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	h [J s ⁻¹ m ⁻² K ⁻¹]	K_s [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Aço inoxidável AISI 304	7900,0	477,0	13,7	14,9
Berílio	1850,0	1825,0	11,4	200,0
Carbeto de silício	3160,0	675,0	12,0	490,0
Constantan	8920,0	384,0	14,0	23,0
Ferro puro	7870,0	447,0	14,0	80,2
Liga Platina-Ródio(Pt-Rh)	16630,0	162,0	15,0	47,0
Níquel puro	8900,0	444,0	14,0	90,7
Óxido de alumínio	3970,0	765,0	12,4	36,0
Platina	21450,0	133,0	16,0	71,6

3.6. CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (h)

De acordo com Incropera *et al.* (2008), o número de Nusselt (Nu) para esferas em fluidos com Prandtl (Pr) maior ou igual a 0,7 e número de Rayleigh (R_{aD}) menor ou igual a 10^{11} é igual ao que se apresenta na Equação 3.19:

$$Nu = 2 + \frac{0,589 R_{aD}^{1/4}}{\left(1 + (0,469/Pr)^{9/16}\right)^{4/9}} \quad (3.19)$$

Onde o número de Rayleigh é dado pela Equação 3.20.

$$R_{aD} = \frac{g \beta (T - T_{\infty}) D^3}{\gamma \alpha_A} \quad (3.20)$$

Sabe-se que Prandtl (Pr) e Nusselt (Nu) são dados pelas Equações 3.21 e 3.22, respectivamente.

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} = \frac{\gamma}{\alpha_A} \quad (3.21)$$

$$Nu = \frac{h D}{K} \quad (3.22)$$

Considerando o fluido externo sendo o ar, nas condições de pressão atmosférica e temperatura (T_{∞}) de 300 K, segundo Incropera *et al.* (2008), sua condutividade térmica (K) é $0,0263 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, a difusividades cinemática (γ) tem o valor de $0,00001589 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e a difusividade térmica (α_A) vale $0,0000225 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Dessa forma, para encontrar o valor de h , foi feito o algoritmo a seguir:

- (I) Escolhe-se um valor arbitrário de h ;
- (II) Utiliza-se esse valor no Balanço de Energia;
- (III) Encontra-se a temperatura de equilíbrio;
- (IV) Encontra-se o número de Rayleigh;
- (V) Encontra-se o número de Nusselt;
- (VI) Acha-se o valor de h ;
- (VII) Repete-se o processo até que h pare de variar.

4. RESULTADOS

Como explicado anteriormente, a temperatura de equilíbrio e o tempo de aquecimento foram encontrados para cada material. Isso foi feito com o auxílio do *software* Maple, dos valores da Tabela 3.1 e o Balanço de Energia apresentado na Equação 3.15.

Assim, de posse de todas as propriedades de cada material, tem-se os valores de T_E , ta , π_5 e π_w mostrados nas Tabelas 4.1 a 4.9:

Tabela 4.1 – Resultados dos adimensionais para o Aço Inoxidável AISI 304

m [kg]	A [m ²]	G [J.s ⁻¹ .m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,050	0,500	250	951,4	1000	3,43E+16	1,09E+20
0,050	0,500	500	1150,4	600	4,15E+16	3,63E+20
0,050	0,500	750	1282,1	445	4,63E+16	7,34E+20
0,050	0,645	250	1020,9	800	3,68E+16	1,76E+20
0,050	0,645	500	1231,7	600	4,45E+16	4,68E+20
0,050	0,645	750	1371,3	400	4,95E+16	1,05E+21
0,050	0,790	250	1079,2	750	3,89E+16	2,30E+20
0,050	0,790	500	1299,9	400	4,69E+16	8,61E+20
0,050	0,790	750	1446,2	350	5,22E+16	1,48E+21
0,075	0,500	250	881,7	1450	3,18E+16	6,56E+19
0,075	0,500	500	1069,1	900	3,86E+16	2,11E+20
0,075	0,500	750	1193,0	700	4,31E+16	4,08E+20
0,075	0,645	250	947,2	1200	3,42E+16	1,02E+20
0,075	0,645	500	1145,6	670	4,13E+16	3,66E+20
0,075	0,645	750	1276,8	600	4,61E+16	6,14E+20
0,075	0,790	250	1003,0	1200	3,62E+16	1,25E+20
0,075	0,790	500	1209,7	600	4,37E+16	5,01E+20
0,075	0,790	750	1347,1	480	4,86E+16	9,40E+20
0,100	0,500	250	834,7	2100	3,01E+16	4,12E+19
0,100	0,500	500	1014,3	1200	3,66E+16	1,44E+20
0,100	0,500	750	1133,0	800	4,09E+16	3,24E+20
0,100	0,645	250	897,5	1600	3,24E+16	6,97E+19
0,100	0,645	500	1087,5	900	3,92E+16	2,48E+20
0,100	0,645	750	1213,2	700	4,38E+16	4,78E+20
0,100	0,790	250	950,1	1200	3,43E+16	1,14E+20
0,100	0,790	500	1148,9	800	4,15E+16	3,42E+20
0,100	0,790	750	1280,5	650	4,62E+16	6,31E+20

Tabela 4.2 – Resultados dos adimensionais para o Berílio

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,050	0,500	250	731,4	3100	1,17E+17	1,24E+20
0,050	0,500	500	889,3	1700	1,42E+17	4,53E+20
0,050	0,500	750	994,1	1300	1,59E+17	8,89E+20
0,050	0,645	250	786,4	2400	1,26E+17	2,07E+20
0,050	0,645	500	954,0	1600	1,53E+17	6,22E+20
0,050	0,645	750	1065,0	1100	1,70E+17	1,36E+21
0,050	0,790	250	832,7	2400	1,33E+17	2,54E+20
0,050	0,790	500	1008,2	1300	1,61E+17	9,37E+20
0,050	0,790	750	1124,5	1100	1,80E+17	1,66E+21
0,075	0,500	250	676,7	3700	1,08E+17	9,10E+19
0,075	0,500	500	824,7	2600	1,32E+17	2,59E+20
0,075	0,500	750	923,2	1800	1,48E+17	5,61E+20
0,075	0,645	250	728,2	3200	1,17E+17	1,36E+20
0,075	0,645	500	885,4	2000	1,42E+17	4,34E+20
0,075	0,645	750	989,9	1600	1,58E+17	8,14E+20
0,075	0,790	250	771,5	2900	1,24E+17	1,83E+20
0,075	0,790	500	936,5	1800	1,50E+17	5,91E+20
0,075	0,790	750	1045,8	1400	1,67E+17	1,14E+21
0,100	0,500	250	640,2	5000	1,02E+17	6,12E+19
0,100	0,500	500	781,2	3100	1,25E+17	1,97E+20
0,100	0,500	750	875,4	2400	1,40E+17	3,82E+20
0,100	0,645	250	689,1	4700	1,10E+17	8,40E+19
0,100	0,645	500	839,3	2600	1,34E+17	3,04E+20
0,100	0,645	750	939,3	2100	1,50E+17	5,64E+20
0,100	0,790	250	730,4	3700	1,17E+17	1,31E+20
0,100	0,790	500	888,2	2300	1,42E+17	4,20E+20
0,100	0,790	750	992,8	1900	1,59E+17	7,63E+20

Tabela 4.3 – Resultados dos adimensionais para o Carbetto de Sílicio

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,050	0,500	250	806,9	1300	1,72E+16	2,69E+19
0,050	0,500	500	979,0	800	2,09E+16	8,75E+19
0,050	0,500	750	1093,0	600	2,33E+16	1,75E+20
0,050	0,645	250	867,0	1000	1,85E+16	4,51E+19
0,050	0,645	500	1049,4	700	2,24E+16	1,29E+20
0,050	0,645	750	1170,1	450	2,50E+16	3,01E+20
0,050	0,790	250	917,4	900	1,96E+16	6,14E+19
0,050	0,790	500	1108,4	600	2,36E+16	1,84E+20
0,050	0,790	750	1234,8	400	2,63E+16	4,15E+20
0,075	0,500	250	747,0	1600	1,59E+16	1,91E+19
0,075	0,500	500	908,7	1100	1,94E+16	5,56E+19

Tabela 4.3 – Resultados dos adimensionais para o Carbetto de Silício (continuação)

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,075	0,500	750	1015,9	900	2,17E+16	1,02E+20
0,075	0,645	250	803,4	1500	1,71E+16	2,63E+19
0,075	0,645	500	974,8	900	2,08E+16	8,76E+19
0,075	0,645	750	1088,4	700	2,32E+16	1,69E+20
0,075	0,790	250	850,7	1200	1,81E+16	4,03E+19
0,075	0,790	500	1030,3	800	2,20E+16	1,21E+20
0,075	0,790	750	1149,2	550	2,45E+16	2,63E+20
0,100	0,500	250	706,8	2000	1,51E+16	1,39E+19
0,100	0,500	500	861,3	1200	1,84E+16	4,63E+19
0,100	0,500	750	963,9	1000	2,06E+16	8,33E+19
0,100	0,645	250	760,6	1800	1,62E+16	1,99E+19
0,100	0,645	500	924,6	1200	1,97E+16	5,97E+19
0,100	0,645	750	1033,4	800	2,20E+16	1,34E+20
0,100	0,790	250	805,9	1600	1,72E+16	2,74E+19
0,100	0,790	500	977,8	900	2,09E+16	9,75E+19
0,100	0,790	750	1091,6	800	2,33E+16	1,65E+20

Tabela 4.4 – Resultados dos adimensionais para o Constantan

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,050	0,500	250	972,0	900	2,23E+16	6,99E+19
0,050	0,500	500	1175,0	600	2,70E+16	2,10E+20
0,050	0,500	750	1309,3	500	3,01E+16	3,77E+20
0,050	0,645	250	1043,0	800	2,40E+16	1,01E+20
0,050	0,645	500	1257,9	400	2,89E+16	4,06E+20
0,050	0,645	750	1400,2	350	3,22E+16	6,96E+20
0,050	0,790	250	1102,4	600	2,53E+16	1,66E+20
0,050	0,790	500	1327,4	400	3,05E+16	4,97E+20
0,050	0,790	750	1476,5	300	3,39E+16	9,94E+20
0,075	0,500	250	901,0	1100	2,07E+16	5,00E+19
0,075	0,500	500	1092,1	700	2,51E+16	1,57E+20
0,075	0,500	750	1218,4	500	2,80E+16	3,30E+20
0,075	0,645	250	967,8	1000	2,22E+16	7,09E+19
0,075	0,645	500	1170,1	600	2,69E+16	2,36E+20
0,075	0,645	750	1303,8	500	3,00E+16	4,25E+20
0,075	0,790	250	1023,8	800	2,35E+16	1,09E+20
0,075	0,790	500	1235,4	500	2,84E+16	3,47E+20
0,075	0,790	750	1375,5	400	3,16E+16	6,51E+20
0,100	0,500	250	853,2	1500	1,96E+16	3,33E+19
0,100	0,500	500	1036,2	900	2,38E+16	1,11E+20
0,100	0,500	750	1157,2	700	2,66E+16	2,14E+20
0,100	0,645	250	917,2	1200	2,11E+16	5,37E+19

Tabela 4.4 – Resultados dos adimensionais para o Constantan (continuação)

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,100	0,645	500	1110,9	800	2,55E+16	1,61E+20
0,100	0,645	750	1239,0	600	2,85E+16	3,22E+20
0,100	0,790	250	970,8	1000	2,23E+16	7,89E+19
0,100	0,790	500	1173,5	700	2,70E+16	2,25E+20
0,100	0,790	750	1307,6	500	3,01E+16	4,73E+20

Tabela 4.5 – Resultados dos adimensionais para o Ferro Puro

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,050	0,500	250	949,6	1000	2,68E+16	7,61E+19
0,050	0,500	500	1148,9	600	3,24E+16	2,54E+20
0,050	0,500	750	1280,6	500	3,61E+16	4,56E+20
0,050	0,645	250	1019,3	800	2,88E+16	1,23E+20
0,050	0,645	500	1230,2	500	3,47E+16	3,93E+20
0,050	0,645	750	1369,8	400	3,87E+16	7,36E+20
0,050	0,790	250	1077,6	700	3,04E+16	1,72E+20
0,050	0,790	500	1298,4	400	3,66E+16	6,01E+20
0,050	0,790	750	1444,6	300	4,08E+16	1,20E+21
0,075	0,500	250	879,9	1400	2,48E+16	4,75E+19
0,075	0,500	500	1067,5	800	3,01E+16	1,66E+20
0,075	0,500	750	1191,4	700	3,36E+16	2,85E+20
0,075	0,645	250	945,5	1100	2,67E+16	7,79E+19
0,075	0,645	500	1144,0	700	3,23E+16	2,45E+20
0,075	0,645	750	1275,3	500	3,60E+16	5,14E+20
0,075	0,790	250	1000,4	1000	2,82E+16	1,05E+20
0,075	0,790	500	1208,2	600	3,41E+16	3,50E+20
0,075	0,790	750	1345,6	500	3,80E+16	6,30E+20
0,100	0,500	250	833,0	1800	2,35E+16	3,35E+19
0,100	0,500	500	1012,7	1000	2,86E+16	1,21E+20
0,100	0,500	750	1131,4	800	3,19E+16	2,26E+20
0,100	0,645	250	895,8	1600	2,53E+16	4,87E+19
0,100	0,645	500	1086,0	800	3,07E+16	1,95E+20
0,100	0,645	750	1211,7	600	3,42E+16	3,89E+20
0,100	0,790	250	948,4	1300	2,68E+16	7,34E+19
0,100	0,790	500	1147,4	700	3,24E+16	2,73E+20
0,100	0,790	750	1279,0	600	3,61E+16	4,77E+20

Tabela 4.6 – Resultados dos adimensionais para a Liga Pt-Rh

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,050	0,500	250	1087,0	400	5,68E+15	3,01E+19
0,050	0,500	500	1310,5	300	6,85E+15	8,04E+19
0,050	0,500	750	1458,6	200	7,62E+15	1,81E+20
0,050	0,645	250	1165,1	400	6,09E+15	3,89E+19
0,050	0,645	500	1401,9	200	7,33E+15	1,56E+20
0,050	0,645	750	1558,9	150	8,15E+15	3,11E+20
0,050	0,790	250	1230,6	300	6,43E+15	6,35E+19
0,050	0,790	500	1478,5	200	7,73E+15	1,91E+20
0,050	0,790	750	1643,1	150	8,59E+15	3,81E+20
0,075	0,500	250	1008,8	600	5,27E+15	1,76E+19
0,075	0,500	500	1219,2	400	6,37E+15	5,27E+19
0,075	0,500	750	1358,4	300	7,10E+15	1,05E+20
0,075	0,645	250	1082,3	500	5,66E+15	2,72E+19
0,075	0,645	500	1305,1	300	6,82E+15	9,06E+19
0,075	0,645	750	1452,6	250	7,59E+15	1,63E+20
0,075	0,790	250	1144,0	500	5,98E+15	3,33E+19
0,075	0,790	500	1377,1	300	7,20E+15	1,11E+20
0,075	0,790	750	1531,7	200	8,00E+15	2,50E+20
0,100	0,500	250	956,0	700	5,00E+15	1,37E+19
0,100	0,500	500	1157,7	500	6,05E+15	3,83E+19
0,100	0,500	750	1290,9	400	6,75E+15	7,18E+19
0,100	0,645	250	1026,6	600	5,36E+15	2,06E+19
0,100	0,645	500	1239,9	400	6,48E+15	6,17E+19
0,100	0,645	750	1381,1	300	7,22E+15	1,23E+20
0,100	0,790	250	1085,6	500	5,67E+15	3,02E+19
0,100	0,790	500	1308,9	300	6,84E+15	1,01E+20
0,100	0,790	750	1456,8	250	7,61E+15	1,81E+20

Tabela 4.7 – Resultados dos adimensionais para o Níquel Puro

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,050	0,500	250	971,6	1000	3,44E+16	1,12E+20
0,050	0,500	500	1174,5	600	4,15E+16	3,72E+20
0,050	0,500	750	1308,7	500	4,63E+16	6,69E+20
0,050	0,645	250	1042,6	900	3,69E+16	1,60E+20
0,050	0,645	500	1257,4	500	4,45E+16	5,76E+20
0,050	0,645	750	1399,6	400	4,95E+16	1,08E+21
0,050	0,790	250	1102,0	700	3,90E+16	2,52E+20
0,050	0,790	500	1326,9	400	4,69E+16	8,81E+20
0,050	0,790	750	1475,9	350	5,22E+16	1,51E+21
0,075	0,500	250	900,6	1300	3,19E+16	7,50E+19
0,075	0,500	500	1091,7	800	3,86E+16	2,44E+20

Tabela 4.7 – Resultados dos adimensionais para o Níquel Puro (continuação)

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,075	0,500	750	1217,9	700	4,31E+16	4,18E+20
0,075	0,645	250	967,4	1200	3,42E+16	1,05E+20
0,075	0,645	500	1169,6	700	4,14E+16	3,59E+20
0,075	0,645	750	1303,3	600	4,61E+16	6,29E+20
0,075	0,790	250	1023,4	1000	3,62E+16	1,54E+20
0,075	0,790	500	1234,9	700	4,37E+16	4,40E+20
0,075	0,790	750	1375,0	500	4,86E+16	9,24E+20
0,100	0,500	250	852,8	1600	3,02E+16	5,54E+19
0,100	0,500	500	1035,8	1100	3,66E+16	1,61E+20
0,100	0,500	750	1156,8	800	4,09E+16	3,32E+20
0,100	0,645	250	916,8	1400	3,24E+16	8,16E+19
0,100	0,645	500	1140,5	900	4,03E+16	2,54E+20
0,100	0,645	750	1238,5	600	4,38E+16	5,71E+20
0,100	0,790	250	970,4	1300	3,43E+16	1,08E+20
0,100	0,790	500	1173,1	800	4,15E+16	3,50E+20
0,100	0,790	750	1307,1	600	4,62E+16	7,00E+20

Tabela 4.8 – Resultados dos adimensionais para Óxido de Alumínio

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,050	0,500	250	840,8	1400	3,86E+16	7,74E+19
0,050	0,500	500	1019,4	900	4,68E+16	2,41E+20
0,050	0,500	750	1137,5	800	5,22E+16	4,06E+20
0,050	0,645	250	906,2	1200	4,16E+16	1,16E+20
0,050	0,645	500	1092,3	800	5,01E+16	3,49E+20
0,050	0,645	750	1217,5	600	5,59E+16	6,99E+20
0,050	0,790	250	955,5	1000	4,38E+16	1,71E+20
0,050	0,790	500	1153,4	700	5,29E+16	4,89E+20
0,050	0,790	750	1284,6	500	5,89E+16	1,03E+21
0,075	0,500	250	778,5	2100	3,57E+16	4,51E+19
0,075	0,500	500	946,4	1200	4,34E+16	1,58E+20
0,075	0,500	750	1057,5	1100	4,85E+16	2,58E+20
0,075	0,645	250	837,1	1600	3,84E+16	7,63E+19
0,075	0,645	500	1015,0	1000	4,66E+16	2,44E+20
0,075	0,645	750	1132,7	900	5,20E+16	4,07E+20
0,075	0,790	250	886,3	1400	4,07E+16	1,07E+20
0,075	0,790	500	1072,5	900	4,92E+16	3,32E+20
0,075	0,790	750	1195,8	700	5,49E+16	6,41E+20
0,100	0,500	250	736,7	2200	3,38E+16	3,91E+19
0,100	0,500	500	897,3	1600	4,12E+16	1,08E+20
0,100	0,500	750	1003,7	1300	4,61E+16	1,98E+20
0,100	0,645	250	792,7	2000	3,64E+16	5,55E+19

Tabela 4.8 – Resultados dos adimensionais para Óxido de Alumínio (continuação)

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,100	0,645	500	963,0	1300	4,42E+16	1,71E+20
0,100	0,645	750	1075,7	900	4,94E+16	3,70E+20
0,100	0,790	250	839,7	1800	3,85E+16	7,55E+19
0,100	0,790	500	1018,1	1100	4,67E+16	2,47E+20
0,100	0,790	750	1136,1	800	5,21E+16	5,10E+20

Tabela 4.9 – Resultados dos adimensionais para Platina

m [kg]	A [m ²]	G [J s ⁻¹ m ⁻²]	T_E [K]	ta [s]	π_5	π_w
0,050	0,500	250	1135,9	320	4,80E+15	3,09E+19
0,050	0,500	500	1368,8	250	5,79E+15	7,91E+19
0,050	0,500	750	1523,1	200	6,44E+15	1,48E+20
0,050	0,645	250	1217,3	350	5,15E+15	3,64E+19
0,050	0,645	500	1464,0	200	6,19E+15	1,28E+20
0,050	0,645	750	1627,6	150	6,88E+15	2,55E+20
0,050	0,790	250	1285,5	300	5,44E+15	5,21E+19
0,050	0,790	500	1543,9	150	6,53E+15	2,08E+20
0,050	0,790	750	1715,4	150	7,25E+15	3,12E+20
0,075	0,500	250	1054,4	550	4,46E+15	1,57E+19
0,075	0,500	500	1273,7	300	5,39E+15	5,76E+19
0,075	0,500	750	1418,7	200	6,00E+15	1,30E+20
0,075	0,645	250	1131,1	500	4,78E+15	2,23E+19
0,075	0,645	500	1363,2	250	5,76E+15	8,91E+19
0,075	0,645	750	1516,8	200	6,41E+15	1,67E+20
0,075	0,790	250	1195,3	350	5,05E+15	3,90E+19
0,075	0,790	500	1438,2	200	6,08E+15	1,36E+20
0,075	0,790	750	1599,3	150	6,76E+15	2,73E+20
0,100	0,500	250	999,4	600	4,23E+15	1,31E+19
0,100	0,500	500	1209,6	400	5,11E+15	3,92E+19
0,100	0,500	750	1348,4	300	5,70E+15	7,85E+19
0,100	0,645	250	1072,9	500	4,54E+15	2,02E+19
0,100	0,645	500	1295,3	300	5,48E+15	6,75E+19
0,100	0,645	750	1442,4	250	6,10E+15	1,21E+20
0,100	0,790	250	1134,5	450	4,80E+15	2,75E+19
0,100	0,790	500	1367,1	250	5,78E+15	9,92E+19
0,100	0,790	750	1521,2	200	6,43E+15	1,86E+20

Pode-se perceber, pelas Tabelas 4.1 a 4.9, que, para cada material, os maiores valores de $\frac{A \times G}{m}$ geraram os maiores valores de T_E e os menores valores de ta . E o inverso ocorreu com os menores valores de $\frac{A \times G}{m}$, onde os tempos de aquecimento foram os maiores e as temperaturas de equilíbrio foram as mais baixas.

Os valores de π_5 e π_w das Tabelas 4.1 a 4.9 foram plotados em um único gráfico através da utilização do *software* Statistica, como é mostrado na Figura 4.1.

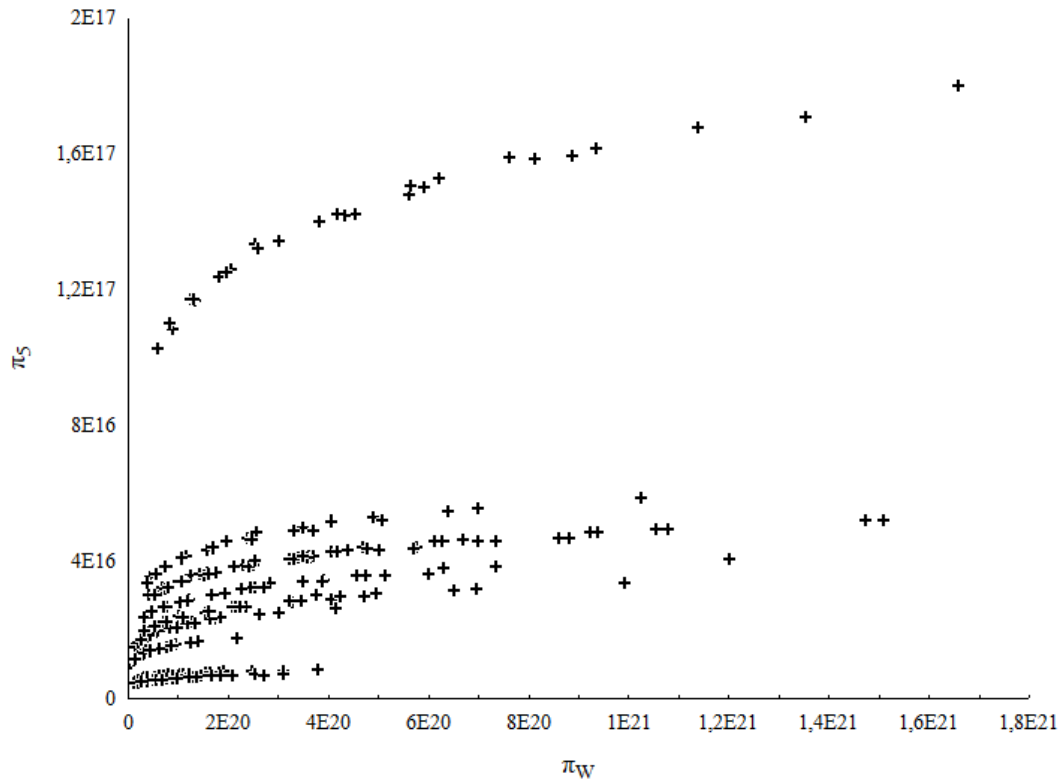


Figura 4.1 – Curva de π_5 em função de π_w

Após a análise da Figura 4.1, estimou-se que a função representada acima teria um mesmo comportamento se analisada individualmente para cada um dos materiais, porém com intensidades diferentes.

Assim, para cada material, a relação entre π_5 e π_w seria próxima do que está representado na Equação 4.1.

$$\pi_5 = a (\pi_w)^b \quad (4.1)$$

Sendo “a” e “b” os parâmetros da Equação 3.23, encontrados através de Regressão Não Linear pelo *software* Statistica.

Porém, como nota-se, os valores de π_5 e π_w são muito grandes. Dessa forma, para que a regressão fosse feita, foi necessário dividir os valores de π_5 e π_w por 10^{16} , obtendo-se, então a Figura 4.2.

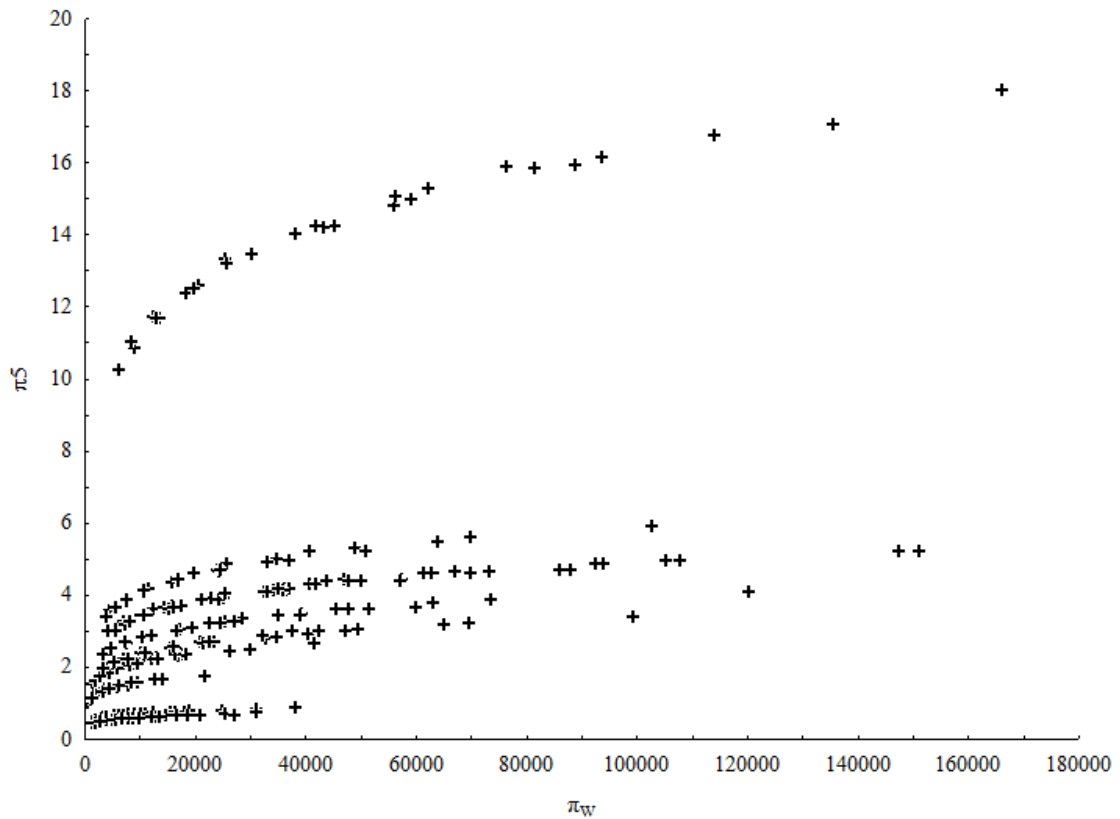


Figura 4.2 – Curva de π_5 em função de π_w (após divisão)

Após todos os cálculos descritos anteriormente, com os valores representados na Figura 4.2, os parâmetros “a” e “b” para cada curva (de cada material) foram encontrados. Assim, eles foram dispostos na Tabela 4.10, juntamente com os valores de R^2 , do método de Regressão Não Linear.

Tabela 4.10 – Parâmetros da Regressão Não Linear

Material	a	b	R^2
Aço inoxidável AISI 304	0,81002	0,15636	0,99407
Berílio	2,43308	0,16570	0,99635
Carbeto de Silício	0,47513	0,16225	0,99426
Constantan	0,52709	0,16217	0,99291
Ferro Puro	0,65678	0,15734	0,99483
Liga Pt-Rh	0,16580	0,15573	0,99167
Níquel Puro	0,76657	0,16107	0,99327
Óxido de Al (policristalino)	0,87290	0,16632	0,99329
Platina	0,13910	0,15685	0,98608

Assim, posteriormente os parâmetros foram relacionados com a densidade e o calor específico, conforme é mostrado nas Figuras 4.3 a 4.6.

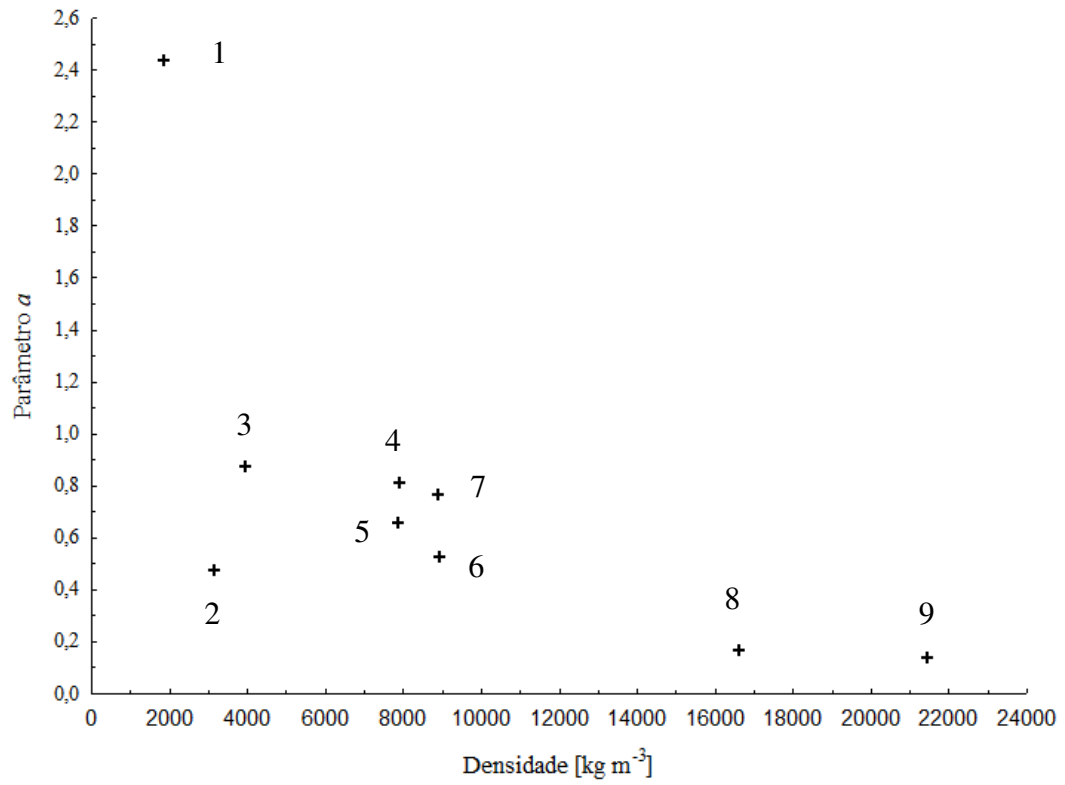


Figura 4.3 – Parâmetro “a” em função da densidade dos materiais

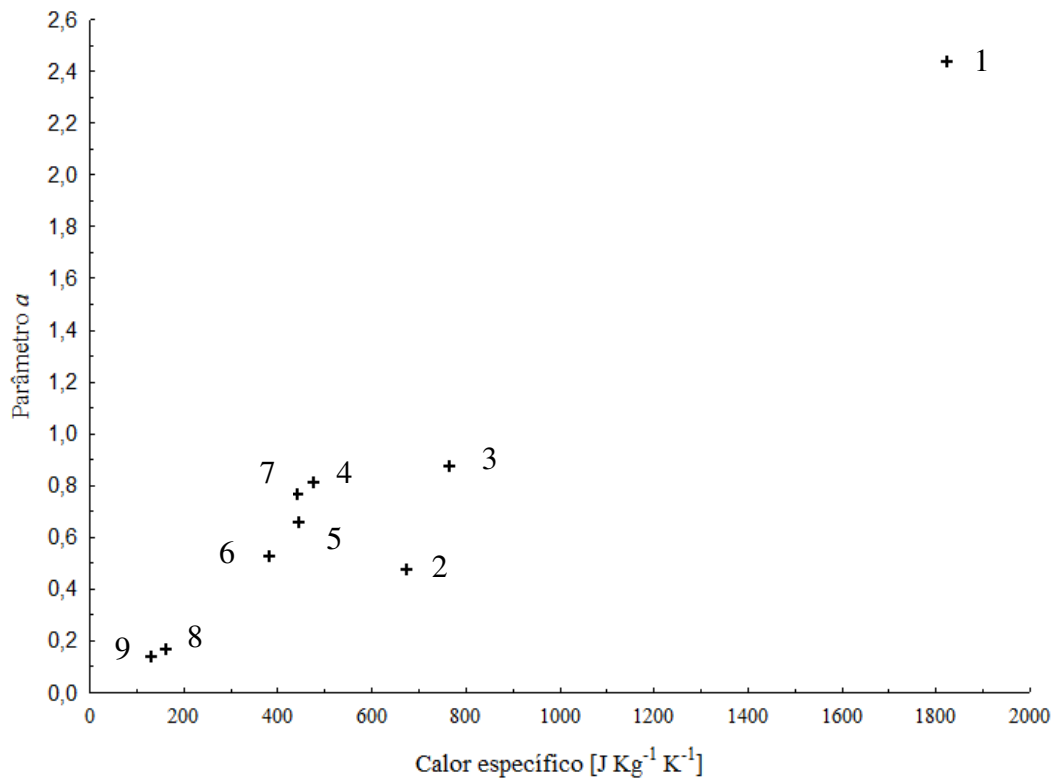


Figura 4.4 – Parâmetro “a” em função do calor específico dos materiais

Sendo que, nas Figuras 4.3 e 4.4, os números de 1 a 9 representam cada um dos materiais, como mostrado a seguir:

- 1 - Berílio
- 2 - Carbetto de Silício
- 3 - Óxido de Alumínio
- 4 - Aço inoxidável AISI 304
- 5 - Ferro Puro
- 6 - Constantan
- 7 - Níquel Puro
- 8 - Liga Pt-Rh
- 9 - Platina

E, como se pode observar nas Figuras 4.3 e 4.4, o parâmetro “a” demonstra ter uma relação com a densidade e com o calor específico.

Já, conforme mostram as Figuras 4.5 e 4.6, o parâmetro “b” permanece praticamente constante, independentemente do material.

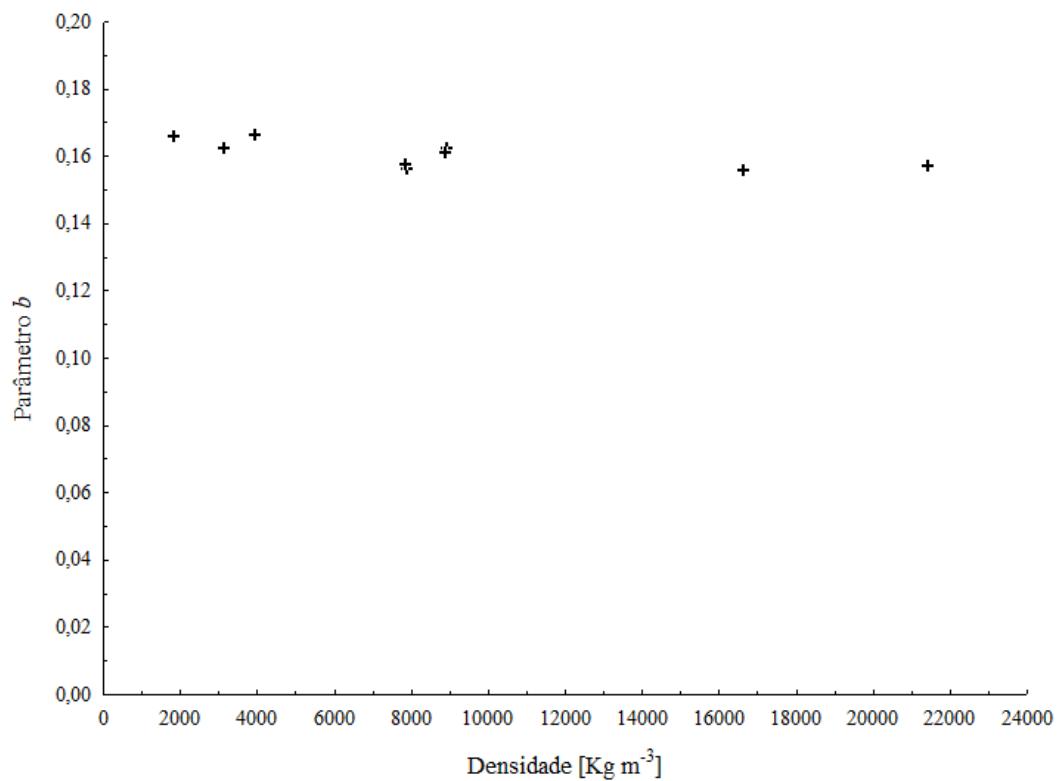


Figura 4.5 – Parâmetro “b” em função da densidade dos materiais

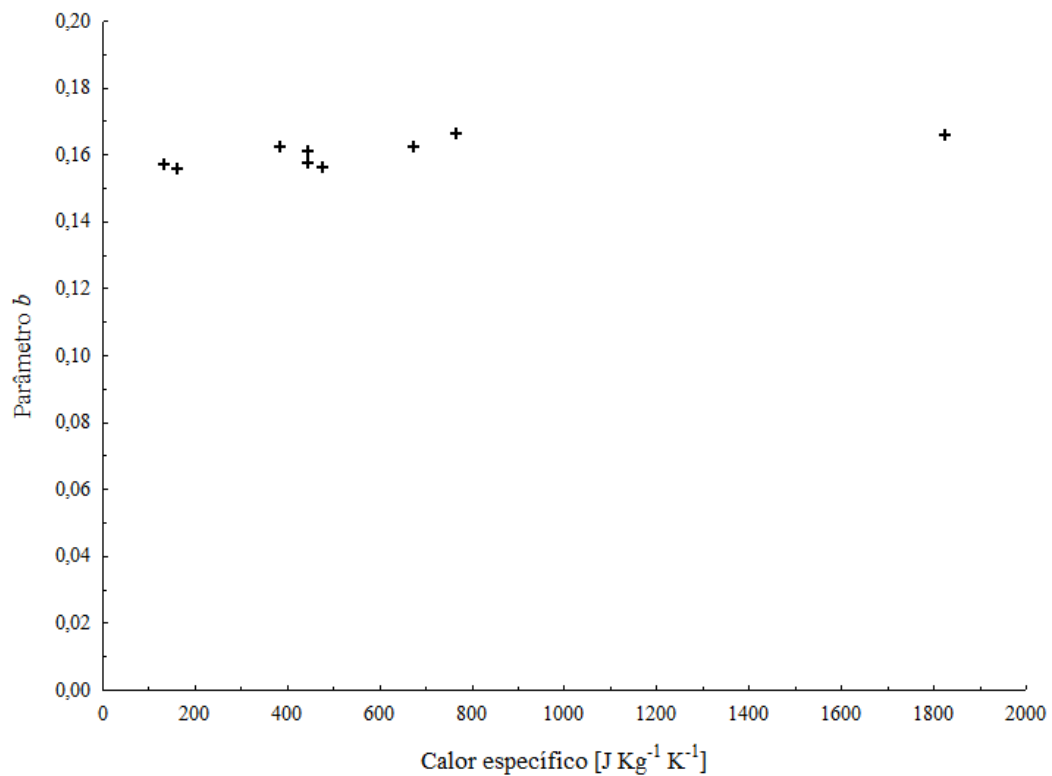


Figura 4.6 – Parâmetro “b” em função do calor específico dos materiais

Assim, considera-se o valor do parâmetro “b” como sendo a média dos valores \pm o desvio padrão, conforme é mostrado na Equação 4.2.

$$b = 0,16042 \mp 0,003423 \quad (4.2)$$

Já para o parâmetro “a”, através do *software* Statistica, foi feita uma Regressão Múltipla, utilizando os valores de X_1 e X_2 apresentados nas Equações 4.3 e 4.4:

$$X_1 = \frac{\rho - \bar{\rho}}{\left[\frac{\rho^{+1} - \rho^{-1}}{2} \right]} \quad (4.3)$$

$$X_2 = \frac{C_p - \bar{C}_p}{\left[\frac{C_p^{+1} - C_p^{-1}}{2} \right]} \quad (4.4)$$

Sendo que,

$$\bar{\rho} = \frac{\rho^{+1} + \rho^{-1}}{2} \quad (4.5)$$

$$\overline{C_p} = \frac{C_p^{+1} + C_p^{-1}}{2} \quad (4.6)$$

Dessa maneira, C_p^{+1} e ρ^{+1} são definidos como os maiores valores de calor específico e densidade, respectivamente, entre os nove materiais e C_p^{-1} e ρ^{-1} os menores valores de calor específico e densidade, respectivamente, entre os nove materiais.

Após a realização dos cálculos descritos anteriormente, tem-se os valores de X_1 e X_2 apresentados na Tabela 4.11:

Tabelas 4.11 – Parâmetros para Regressão Múltipla

a	ρ [kg m ³]	C_p [J s ⁻¹ K ⁻¹]	X_1	X_2
0,81002	7900	477	-0,3826	-0,5933
2,43308	1850	1825	-1,0000	1,0000
0,47513	3160	675	-0,8663	-0,3593
0,52709	8920	384	-0,2785	-0,7033
0,65678	7870	447	-0,3857	-0,6288
0,165804	16630	162	0,5081	-0,9657
0,76657	8900	444	-0,2806	-0,6323
0,87290	3970	765	-0,7836	-0,2529
0,13910	21450	133	1,0000	-1,0000

A Regressão Múltipla feita para encontrar a relação do parâmetro “a” com a densidade e o calor específico teve coeficiente de correlação $R^2 = 0,996639$.

Assim, o parâmetro “a” é representado pela Equação 4.7 a seguir:

$$a = 3,8430 + 3,0575 X_1 + 4,1823 X_2 + 2,5416 X_1 X_2 \quad (4.7)$$

Portanto, com as equações de a e b encontradas, a Equação 4.1 passa a ser representada pela Equação 4.8.

$$\pi_5 = [3,8430 + 3,0575 X_1 + 4,1823 X_2 + 2,5416 X_1 X_2] \pi_w^{0,16042} \quad (4.8)$$

E, substituindo as Equações 4.3 e 4.4 na Equação 4.8, tem-se a Equação 4.9, como mostrado a seguir.

$$\pi_5 = \left[3,8430 + 3,0575 \frac{\rho - \bar{\rho}}{\left[\frac{\rho^{+1} - \rho^{-1}}{2} \right]} + 4,1823 \frac{C_p - \bar{C}_p}{\left[\frac{C_p^{+1} - C_p^{-1}}{2} \right]} + 2,5416 \frac{\rho - \bar{\rho}}{\left[\frac{\rho^{+1} - \rho^{-1}}{2} \right]} \frac{C_p - \bar{C}_p}{\left[\frac{C_p^{+1} - C_p^{-1}}{2} \right]} \right] \pi_W^{0,16042} \quad (4.9)$$

Portanto, de posse das equações que representam os parâmetros a e b , foi provado que há uma relação matemática entre os adimensionais π_5 e π_W , apresentado pela Equação 4.9.

5. CONCLUSÕES

Após estudar o processo de aquecimento envolvendo Lentes de Fresnel, foi possível, então, encontrar os números adimensionais relevantes envolvidos na dinâmica de aquecimento de corpos de prova. E, ainda, agrupá-los, a fim de se trabalhar com as variáveis mais importantes nessa dinâmica.

Além disso, foi possível realizar um Balanço de Energia que representasse o processo, utilizando combinações de valores para área da lente de Fresnel, fluxo de radiação e massa do corpo de prova ($\frac{A \times G}{m}$) para cada material. A partir das 27 combinações e nove materiais estudados, totalizando 243 resultados de temperatura de equilíbrio, tempos de aquecimento e valores para os números adimensionais π_5 e π_w , foi possível obter bons resultados, como, por exemplo, os valores de temperatura de equilíbrio e tempo de aquecimento, que respeitaram a relação $\frac{A \times G}{m}$.

Foi proposta uma equação matemática que relacionasse os adimensionais π_5 e π_w . Para isso, foi necessário encontrar os parâmetros “a” e “b” dessa função. O parâmetro “a” mostrou ter relação com a densidade e o calor específico dos materiais, enquanto o parâmetro “b” se mostrou praticamente constante. Logo, ambos puderam ser representados por funções matemáticas.

Assim, através dos resultados obtidos, conclui-se que os dois principais números adimensionais envolvidos na dinâmica de aquecimento com Lentes de Fresnel possuem uma relação que pode ser expressa matematicamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, L. A. Pirólise Solar Catalítica de Microalgas. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2018.
- CABRAL, Y. R. G. Aplicação de concentradores solares para o aquecimento da água no processo de geração de vapor para injeção em poços petrolíferos. 2017. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2017.
- CHEN, C. J. Physics of Solar Energy. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- FREITAS, G. H. S; MICHELS, F. S.; PASSOS, W. E. Análise Dimensional e Aplicação Hidráulica do Teorema PI de Buckingham. Vetor, Rio Grande, v. 25, n.2, p.84-101, 2015.
- GARCIA, D. M. Forno solar com lentes de Fresnel e Aplicações em laser solar. 2013. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- GARG, H. P.; PRAKASH, J. Solar Energy Fundamentals and Applications. Delphi: McGraw Hill, 2000.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. F. Fundamentos de transferência de calor e de massa, 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro, 2008.
- MARINHO, F. J. L. *et al.* Destilado solar destinado a fornecer água potável para as famílias de agricultores de base familiar. REVISTA BRASILEIRA DE AGROECOLOGIA. Campina Grande, PB. 7(3):53-60. 2012.
- PENTEADO, J. G.; PILATTI, L. A.; PEDROSO, B. Construção de um sistema de aquecimento solar de água integrado a um sistema de aquecimento a gás. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS. 4., 2008. UTFPR, Paraná.
- PRADO, G. O. Concepção e Avaliação de Concentradores Solares do Tipo Disco e Lente de Fresnel para Dessalinização de Água. 2015. 179 f. Tese. (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2015.
- SANTOS, J. J. C. S. Avaliação Exergoeconômica das Tecnologias para a Produção Combinada de Eletricidade e Água Dessalinizada. 2005. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá/MG, 2005.