

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**THABATA FERNANDA CIRINO DOS SANTOS**

**REDIMENSIONAMENTO DE CAVALETES DE CURA DE PLACAS NO  
PROCESSO PRODUTIVO DE BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO TRACIONÁRIAS E  
ANÁLISE DE DEMANDA DE VAPOR DO PROCESSO DE CURA.**

**LONDRINA**

**2022**

**THABATA FERNANDA CIRINO DOS SANTOS**

**REDIMENSIONAMENTO DE CAVALETES DE CURA DE PLACAS NO  
PROCESSO PRODUTIVO DE BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO TRACIONÁRIAS E  
ANÁLISE DE DEMANDA DE VAPOR DO PROCESSO DE CURA.**

**Resizing of plate curing stands in the production process of lead-acid  
tractionary batteries and analysis of steam demand in the curing process.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Larissa Maria Fernandes  
Coorientador(a): Prof. Dr. Lucas Bonfim Rocha

**LONDRINA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**THABATA FERNANDA CIRINO DOS SANTOS**

**REDIMENSIONAMENTO DE CAVALETES DE CURA DE PLACAS NO  
PROCESSO PRODUTIVO DE BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO TRACIONÁRIAS E  
ANÁLISE DE DEMANDA DE VAPOR DO PROCESSO DE CURA.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/ junho /2022

---

Larissa Maria Fernandes  
Doutora em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Lucas Bonfim Rocha  
Doutor em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Joel Fernando Nicoletti  
Doutor em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Rafael Henrique Ribeiro Baptista  
Coordenador de Laboratórios  
Indústrias Tudor de Baterias LTDA

**LONDRINA**

**2022**

Dedico este trabalho à minha família, pelos momentos de ausência e por todo apoio nesta fase.

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço a minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Larissa Maria Fernandes, meu coorientador Prof. Dr. Lucas Bonfim Rocha e à Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lisandra Ferreira de Lima, pela sabedoria com que me guiaram nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala que compartilharam comigo os momentos bons e não tão bons da graduação e ajudaram a tornar esta etapa mais leve, em especial a Danielle Gameiro e Geysa Suzuki.

À minha família, que me apoiou em toda trajetória acadêmica e tornou possível a realização deste sonho.

Aos colegas de trabalho da Indústria X que tanto me ensinaram e colaboraram para que este trabalho fosse concluído.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

SANTOS, Thabata F. C. **Redimensionamento de cavaletes de cura de placas no processo produtivo de baterias chumbo-ácido tracionárias e análise de demanda de vapor do processo de cura.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento Acadêmico de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2022.

O processo de produção de baterias chumbo-ácido tracionárias envolve a etapa de cura de placas, na qual a massa precursora adquire as características e composição necessárias para se transformar em material ativo na etapa de formação e, assim, proporcionar o adequado fornecimento de energia para o sistema que compõe. O processo de cura de placa envolve acomodá-las em cavaletes e posicioná-las em câmaras de cura aonde sob condições controladas de temperatura e umidade relativa transformações químicas e físicas acontecerão. Devido à perda de umidade relativa para além das especificações pré-cura a capacidade dos cavaletes existentes não podia ser totalmente utilizada, portanto, estes foram redimensionados através de análise das dimensões das placas chumbo-ácido tracionárias. Adicionalmente, calculou-se a demanda de vapor durante o processo de cura através de análise das reações químicas e modificações de temperatura e umidade relativa das placas e suas vizinhanças. Através do redimensionamento dos cavaletes tornou-se possível estimar que um ciclo de cura a menos é necessário para curar a produção média mensal de placas, sendo possível ainda adicionar mais 15495 placas à produção. A demanda de vapor calculada para um ciclo de cura foi de 1992,291 kJ. Dessa forma, a produção de baterias pode ser ampliada utilizando um ciclo de cura a menos ou ainda sabendo a demanda energética de cura de cada ciclo, pode-se realizar ampliação da produção analisando se modificações na caldeira se fazem necessárias.

Palavras-chave: bateria chumbo-ácido; bateria tracionária; cura; cavaletes.

## **ABSTRACT**

The production process of traction lead-acid batteries involves the curing stage of plates, in which the precursor mass acquires the characteristics and composition necessary to transform itself into active material in the formation stage and, thus, provide the adequate supply of energy for the system it composes. The slab curing process involves placing them on easels and positioning them in curing chambers where, under controlled conditions of temperature and relative humidity, chemical and physical transformations will take place. Due to the loss of relative humidity beyond the pre-cure specifications, the capacity of the existing easels could not be fully utilized, therefore, these were resized by analyzing the dimensions of the lead-acid traction plates. Additionally, the steam demand during the curing process was calculated through the analysis of chemical reactions and changes in temperature and relative humidity of the plates and their surroundings. By resizing the easels, it became possible to estimate that one less curing cycle is needed to cure the average monthly production of slabs, and it is still possible to add another 15495 slabs to the production. The calculated steam demand for one curing cycle was 1992.291 kJ. In this way, the production of batteries can be expanded using one less curing cycle or even knowing the energy demand for curing of each cycle, production can be expanded by analyzing whether changes in the boiler are necessary.

Keywords: lead-acid battery; traction battery; cure; easels

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais baterias primárias e secundárias. ....	16
Figura 2 - Componentes da bateria tracionária. ....	17
Figura 3 - Composição da massa precursora seca de acordo com a razão H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /PbO. ....	21
Figura 4 - Composição da massa curada ao longo do tempo de cura .....	22
Figura 5 - Caminho hipotético para cálculo de entalpia de reação.....	25
Figura 6 – Componentes do cavalete. ....	27
Figura 7 - Perfil de cura de placas. ....	28
Figura 8 – Representação do Sistema no Enchimento .....	29
Figura 9 – Representação do Sistema no Ciclo 1.....	32
Figura 10 – Representação do Sistema nos Ciclos 2, 3 e 4.....	36
Figura 11 – Representação do Sistema na Secagem.....	38
Figura 12 – Placas de painel simples (a) e duplo (b).....	41
Figura 13 – Dimensional dos novos cavaletes. ....	42



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações de $C_p$ dos compostos .....	30
Tabela 2 – Propriedades do ar .....	31
Tabela 3 – Entalpia padrão de formação dos compostos envolvidos na formação de 4BS .....	33
Tabela 4 – Propriedades do ar a 85°C e 95% de UR .....	35
Tabela 5 – Entalpias padrão de formação dos compostos da reação de oxidação .....	36
Tabela 6 – Composição (em mols) da massa precursora .....	43
Tabela 7 – Energia de aquecimento dos compostos na etapa de enchimento ..	43
Tabela 8 – Energia de aquecimento dos compostos na etapa 1 .....	45
Tabela 9 – Número de mols final ao ciclo 1 .....	45
Tabela 10 – Energia do caminho hipotético do ciclo 1 .....	45
Tabela 11 – Energia de resfriamento ciclos 2, 3 e 4 .....	46
Tabela 12 – Número de mols final ao ciclo 1 .....	47
Tabela 13 – Energia do caminho hipotético dos ciclos 2, 3 e 4 .....	47
Tabela 14 – Energia de aquecimento na etapa de secagem .....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RX	Raio X
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VRLA	Bateria chumbo-ácido regulada por válvula

## LISTA DE SÍMBOLOS

3BS	3PbO.PbSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O
4BS	4PbO.PbSO <sub>4</sub>
A	Área
C <sub>p</sub>	Capacidade calorífica a pressão constante
e <sup>-</sup>	Elétron livre
E <sub>K</sub>	Energia cinética
E <sub>P</sub>	Energia potencial
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção
H	Entalpia
$H_{f,298}^{\circ}$	Entalpia padrão de formação a 298K e 1atm
$H_{rxn,298}^{\circ}$	Entalpia padrão de reação a 298K e 1atm
H <sup>+</sup>	Íon hidrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico
h <sub>rad</sub>	Coeficiente de transferência de calor por radiação
k	Coeficiente de transferência de calor por condução
m	Massa
MM	Massa molar
n	Número de mols
O <sub>2</sub>	Oxigênio
P	Pressão
Pb	Chumbo
Pb(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Chumbo
PbO	Óxido de Chumbo
PbO <sub>2</sub>	Dióxido de Chumbo
PbSO <sub>4</sub>	Sulfato de Chumbo
Q	Calor
$\dot{Q}$	Fluxo de calor
Sb	Antimônio
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Íon sulfato
T	Temperatura
T <sub>s</sub>	Temperatura da superfície
T <sub>viz</sub>	Temperatura da vizinhança
T <sub>∞</sub>	Temperatura do fluido
U	Energia interna

UR	Umidade Relativa
W	Trabalho
$\dot{W}_s$	Trabalho de eixo
$\nu_i$	Coefficiente estequiométrico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Contextualização</b> .....	<b>16</b>
2.1.1	Baterias Chumbo-Ácido.....	16
2.1.2	Produção de Baterias Chumbo-Ácido .....	19
<u>2.1.2.1</u>	<u>Produção de Grades</u> .....	<u>19</u>
<u>2.1.2.2</u>	<u>Produção de Óxido de Chumbo</u> .....	<u>19</u>
<u>2.1.2.3</u>	<u>Produção de Massa Precursora</u> .....	<u>20</u>
<u>2.1.2.4</u>	<u>Empastação</u> .....	<u>21</u>
<u>2.1.2.5</u>	<u>Cura de Placas</u> .....	<u>21</u>
<u>2.1.2.6</u>	<u>Formação</u> .....	<u>23</u>
2.1.3	Balanço de Energia .....	24
<b>2.2</b>	<b>Metodologia</b> .....	<b>26</b>
2.2.1	Dimensionamento de Cavaletes.....	26
2.2.2	Processo de Cura de Placas .....	27
<u>2.2.2.1</u>	<u>Enchimento</u> .....	<u>28</u>
<u>2.2.2.2</u>	<u>1ºCiclo</u> .....	<u>32</u>
<u>2.2.2.3</u>	<u>2º, 3º e 4ºCiclo</u> .....	<u>35</u>
<u>2.2.2.4</u>	<u>Secagem</u> .....	<u>38</u>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Dimensionamento de Cavaletes</b> .....	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Processo de Cura de Placas</b> .....	<b>43</b>
3.2.1	Enchimento .....	43
3.2.2	1º Ciclo .....	44
3.2.3	2º, 3º e 4º Ciclo .....	46
3.2.4	Secagem .....	48
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O mercado global de baterias movimentava cerca de US\$110 bilhões anuais. Do total de baterias produzidas, pode-se afirmar que os tipos predominantes quanto à composição são chumbo-ácido e lítio, com as vendas se dividindo de maneira praticamente igual entre eles. Entre 70% e 75% do volume de megawatts-hora das baterias utilizadas são do tipo chumbo-ácido enquanto os outros 25% a 30% são de lítio. Os usos de baterias chumbo-ácido são os mais variados: desde dar partidas em motores de automóveis a dar backup a torres de celular no mercado de telecomunicações. Este tipo de bateria fornece alimentação secundária de energia elétrica a centros de dados e computadores pessoais, movimentam empilhadeiras e são usadas para mobilidade em bicicletas, scooters e riquixás elétricos principalmente na Índia e na China, com o setor de mobilidade agregando cerca de US\$9 bilhões ao mercado de baterias chumbo-ácido (Raiford para Brasil Energia, 2021).

Dr. Matthew Raiford, gerente técnico do Consortium for Battery Innovation (CBI), revela à Brasil Energia (2021) que a CBI acredita que para suprir as demandas de mercado em constante modificação, serão necessárias baterias de lítio, chumbo, sódio e zinco, cada qual a aplicações específicas. Isto se deve ao fato de que os mercados automotivo e de armazenamento de energia para concessionárias de serviços públicos possuem demanda alta a ponto de exigir várias tecnologias diferentes.

A produção de baterias chumbo-ácido envolve seis processos principais: confecção de grades, produção de óxido de chumbo, confecção de massa precursora, empastação, cura de placas e formação das baterias. O processo de cura das placas consiste na acomodação de placas empastadas com massa contendo o material precursor em cavaletes, os quais serão alimentados em câmaras de cura aonde, sob condições controladas de temperatura e umidade, reações ocorrerão para que o material precursor adquira as características necessárias para se tornar material ativo na fase posterior, a formação (PAVLOV, 2011).

O adequado dimensionamento dos cavaletes de cura se faz necessário para que o maior número de placas possível passe pelo processo de cura em um mesmo ciclo da estufa, resultando em menor gasto. A indústria X, porém, não consegue utilizar a capacidade total de seus cavaletes, ao final do processo de preenchimento

de seus cavaletes a umidade das placas encontra-se abaixo dos limites especificados nas instruções de trabalho da empresa.

As principais causas de placas fora da umidade especificada são:

- 1) Longa permanência da massa no cone pré empastação devido a problemas na linha;
- 2) Massa descarregada prematuramente da masseira devido à queda de energia elétrica;
- 3) Forno a temperaturas elevadas ou baixas;
- 4) Longa permanência das placas no ambiente.

A segunda causa ocorre raramente, uma vez que quedas de energia na indústria são raras. Já a solução da causa 1 envolve troca da empastadora e a terceira causa envolve correta operação do forno e sua manutenção. A troca de equipamento vem sendo amplamente discutida, porém envolve grandes investimentos e a manutenção dos equipamentos é realizada periodicamente, bem como a instrução dos operadores. A quarta causa ocorre devido ao elevado tempo para preencher completamente os cavaletes, o qual muitas vezes é prolongado devido à ocorrência dos outros problemas descritos. Assim, o presente trabalho visa o redimensionamento de cavaletes para que estes possam ser preenchidos em tempo hábil para que a umidade permaneça a níveis aceitáveis e, adicionalmente, realizar análise da demanda de vapor envolvida no uso dos novos cavaletes a fim de detalhar o processo de cura de placas.

## 2 DESENVOLVIMENTO

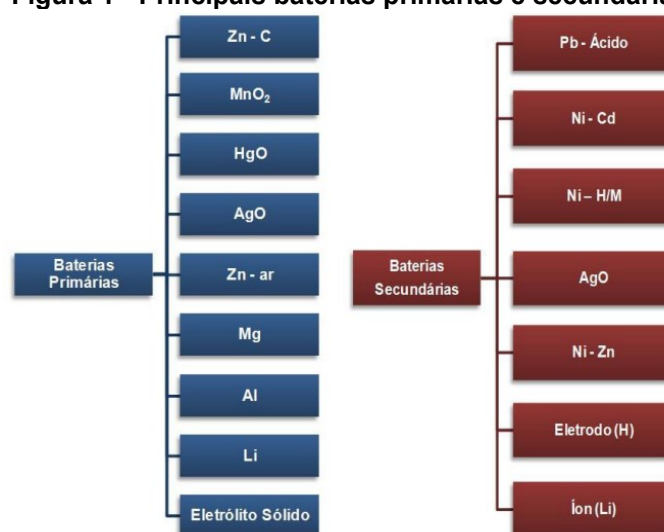
### 2.1 Contextualização

#### 2.1.1 Baterias Chumbo-Ácido

Baterias e pilhas, as últimas também chamadas de células eletroquímicas, são dispositivos onde energia química converte-se em energia elétrica. Estes dispositivos diferem-se pelo fato de que as pilhas são formadas por um eletrólito e dois eletrodos (cátodo e ânodo), enquanto as baterias são compostas por um conjunto de pilhas conectadas em série ou em paralelo (Carneiro *et al.*, 2017).

As baterias secundárias (como as baterias automotivas), ao contrário das baterias primárias, são caracterizadas pela ocorrência de reações reversíveis, ou seja, reações sujeitas a inversão pela passagem de corrente elétrica, gerando reagentes químicos reconvertidos a quantidades próximas da inicial. Sendo assim, estas podem ser recarregadas e apresentar ciclos de vida mais longos. A energia fornecida pelas baterias automotivas é utilizada para partida, iluminação, ignição e alimentação dos sistemas auxiliares, como de som, ar-condicionado, computador de bordo, etc, uma vez que apresentam densidade energética alta e trabalham bem a baixas temperaturas (Carneiro *et al.*, 2017). Na figura 1 são apresentadas as principais baterias primárias e secundárias.

**Figura 1 - Principais baterias primárias e secundárias.**

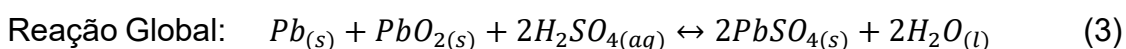
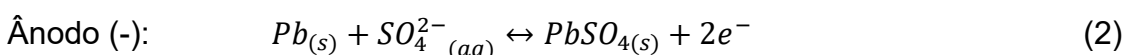
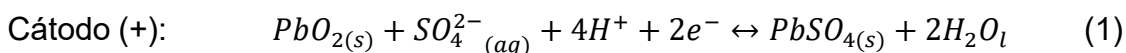


Fonte: Carneiro, R. L. et al. (2017).

No processo de carga de baterias secundárias chumbo-ácido, material ativo do eletrodo positivo é oxidado, liberando elétrons que fluirão e gerarão corrente elétrica,



reduzindo o eletrodo negativo, agente ativo da reação eletroquímica. A reação de redução durante a descarga da bateria leva à transformação do dióxido de chumbo em sulfato de chumbo, enquanto a reação de oxidação produz sulfato de chumbo a partir de chumbo. As reações de redução e oxidação são representadas pelas equações 1 e 2, respectivamente, e sua reação global pela equação 3 (Carneiro *et al.*, 2017).



Os principais componentes de uma bateria chumbo-ácido estão representados na figura 2 utilizando como exemplo uma bateria VLRA.

**Figura 2 - Componentes da bateria tracionária.**



Fonte: Tudor Baterias (2022).

A grade é responsável por segurar o material ativo e conduzir eletricidade entre ele e os terminais celulares. As placas negativas são compostas por grade de chumbo empastada com massa ativa cuja composição contém água, solução de ácido sulfúrico, óxido de chumbo, fibras acrílicas, uma mistura de ligninosulfato de chumbo, sulfato de bário e negro de fumo. Os separadores, constituídos por polímeros, são

responsáveis por evitar o contato direto entre as placas, evitando a ocorrência de curtos-circuitos e também manter uma reserva de eletrólito entre as placas. As placas positivas são compostas por grades de chumbo empastadas por pasta composta por água, óxido de chumbo, solução de ácido sulfúrico e fibras. Um elemento é composto por placas positivas, negativas intercaladas (Carneiro *et al.*, 2017).

Segundo Carneiro *et al.* (2017), os conectores são produzidos por ligas de chumbo e responsáveis por ligar os elementos da bateria em série a fim de que se atinja a tensão necessária. Os polos/postes são condutores metálicos produzidos em liga de chumbo responsáveis por interligar as placas em série com a mesma polaridade do terminal externo para que haja passagem de corrente. Terminal é uma peça metálica produzida em liga de chumbo que atua como ligação externa da bateria. A caixa, produzida em homopolímero, copolímero randômico ou copolímero alternado contém vasos independentes que acondicionam as células e são inertes ao eletrólito. A tampa tem como função isolar os elementos e o eletrólito do meio externo e impedir a entrada de contaminantes na bateria.

O eletrólito consiste em uma solução de ácido sulfúrico diluída em água deionizada com densidade específica. O supressor de chamas e gases é um dispositivo de segurança que atua liberando gases e inibindo o acesso de faíscas e chamas ao interior da bateria. (Carneiro *et al.*, 2017).

Existem três classificações das baterias chumbo-ácido: baterias de arranque, baterias tracionárias e baterias estacionárias (Carneiro *et al.*, 2017). Neste trabalho abordaremos as baterias tracionárias.

As baterias tracionárias, também chamadas de baterias de tração, são as que trabalham sob as condições mais severas, necessitando de mais potência, energia e ciclo de vida mais longo. Seus ciclos de descarga, por necessitarem de mais energia, são mais profundos e podem ocasionar variação de material ativo de até 50%; já as recargas ocorrem em espaço de tempo curto. Para que a vida útil dessas baterias seja maior, as placas que a compõem apresentam maior espessura e massa ativa de alta densidade. As placas caracterizam-se por serem planas e empastadas com grade, em geral, feita de liga Pb-Sb e densidade de eletrólito de  $1240 \text{ g.L}^{-1}$  e  $1270 \text{ g.L}^{-1}$ . Este tipo de bateria é utilizado principalmente em carrinhos para transportes de pessoas,

cargas, paleteiras e plataformas elétricas, lavadoras, varredeiras industriais, sistemas de energia solar e eólica e em conjuntos série-paralelo para partidas e outros serviços em locomotivas (Carneiro *et al.*, 2017). Motores simples, desde um ventilador, até automóveis utilizam baterias tracionárias (Blog Movimak, 2019).

## 2.1.2 Produção de Baterias Chumbo-Ácido

### 2.1.2.1 Produção de Grades

As grades utilizadas nas baterias chumbo-ácido, em geral, são produzidas a partir de ligas de chumbo e exercem como funções principais oferecer suporte mecânico ao material ativo que compõe os dois eletrodos e participar como “sistema sanguíneo” da bateria, por meio do qual a corrente flui de e para todas as partes das placas. O peso total da placa é composto entre 40 e 50% pelo peso das grades (Pavlov, 2011).

A confecção das grades se dá a partir da fundição da liga de chumbo, a qual é então transportada para moldes em formato de grelha até sua solidificação. Em seguida, são armazenadas para, então, serem empastadas (Silva; Silva, 2018).

### 2.1.2.2 Produção de Óxido de Chumbo

A produção óxido de chumbo é realizada a partir do Método “Ball Mill”. Neste processo, cilindros de chumbo são alimentados em tambores de aço que rotacionam em torno de seu eixo horizontal. A partir da rotação, os cilindros de chumbo se chocam, diminuindo sua área superficial devido à quebra e gerando energia a partir do contato. O calor gerado promove a reação de oxidação da superfície do chumbo e, como a reação de oxidação do chumbo é exotérmica, esta energia é utilizada para manter o sistema a temperatura ótima da reação de oxidação. O excesso de energia deve ser removido a partir de sistema de resfriamento utilizando ar seco frio ou aspergindo água na parte de fora do cilindro. A corrente de ar utilizada no resfriamento tem, na verdade, duas funções: fornecer oxigênio para a reação de oxidação e arrastar o pó de óxido de chumbo obtido (Pavlov, 2011).

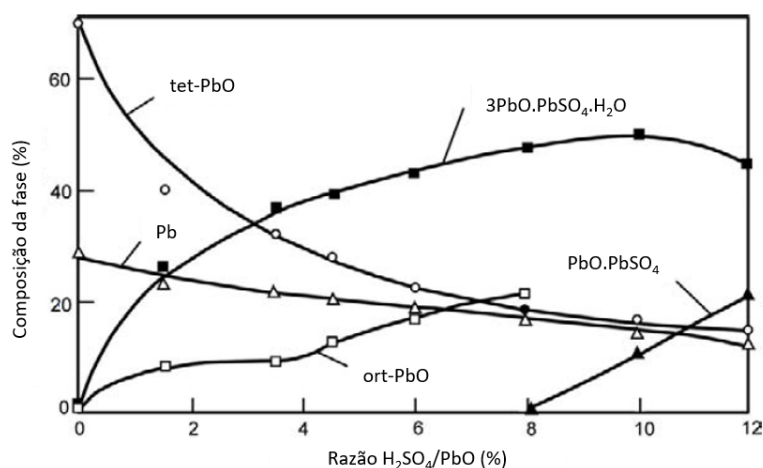
Os grãos de óxido de chumbo de dimensões maiores são armazenados em silos para posterior moagem e nova oxidação e o pó de óxido de chumbo é utilizado para produção de massa precursora. O óxido de chumbo produzido por este processo contém, em média, 20 a 35% de partículas de chumbo livre não oxidadas (Pavlov, 2011).

### 2.1.2.3 Produção de Massa Precursora

Este processo tem como objetivo produzir partículas de composição e tamanho definidos que formarão a massa precursora das placas positivas e negativas, a qual após os processos de empastação, cura e formação resultarão na massa ativa que comporá os eletrodos da bateria chumbo-ácido. As placas são caracterizadas por porosidade, área superficial, resistência da massa ativa e aderência à grade. A primeira característica, porosidade, é definida pelo tamanho das partículas que compõem a massa ativa. Partículas de tamanho adequado geram massa com porosidade adequada, o que garante alta superfície ativa, resistência adequada e ótima distribuição de poros, permitindo acesso de íons a todo volume da placa. As partículas cujos tamanhos são ideais para conferir as características necessárias à placa e que se tornarão adequadamente os eletrodos das baterias são o sulfato tribásico de chumbo ( $3\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O} - 3\text{BS}$ ) e o sulfato tetrabásico de chumbo ( $4\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4 - 4\text{BS}$ ).  $\text{PbO}$  e  $\text{Pb}(\text{OH})_2$  também são necessários para conferir à massa a resistência necessária (Pavlov, 2011).

No processo de preparação da massa, água é utilizada como agente de fusão de poros. Reações entre óxido de chumbo (o qual contém aproximadamente 70 a 80% de  $\text{PbO}$ ) e solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  formam 3BS e 4BS, de acordo com as condições de temperatura do sistema (Pavlov, 2011). A figura 3 apresenta a variação da composição da massa de acordo com a razão de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{PbO}$  utilizadas na confecção da massa.

**Figura 3 - Composição da massa precursora seca de acordo com a razão  $H_2SO_4/PbO$ .**



Fonte: Adaptado de Pavlov (2011).

#### 2.1.2.4 Empastação

A empastação consiste na passagem das grades por uma máquina, empastadeira, contendo a massa precursora para promover aderência da massa à placa. Em seguida, as placas passam por uma esteira com roletes que as deixam com espessura desejável e passam pelo forno/estufa para adequada secagem superficial das placas (Silva; Silva, 2018).

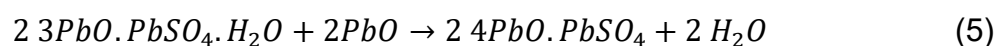
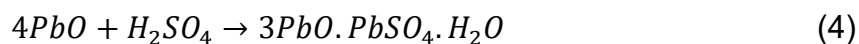
#### 2.1.2.5 Cura de Placas

O processo de cura de placas tem 5 funções principais: formação do esqueleto da massa curada, conversão de 3BS em 4BS a temperaturas acima de  $80^\circ C$ , oxidação do chumbo livre residual, oxidação da grade para formação de uma camada de corrosão em sua superfície onde a massa adere à placa e secagem da placa. O processo de cura é influenciado por parâmetros internos como composição de fase, densidade e teor de umidade da placa e fatores externos como temperatura, umidade relativa e vazão do ar circundante (Pavlov, 2011).

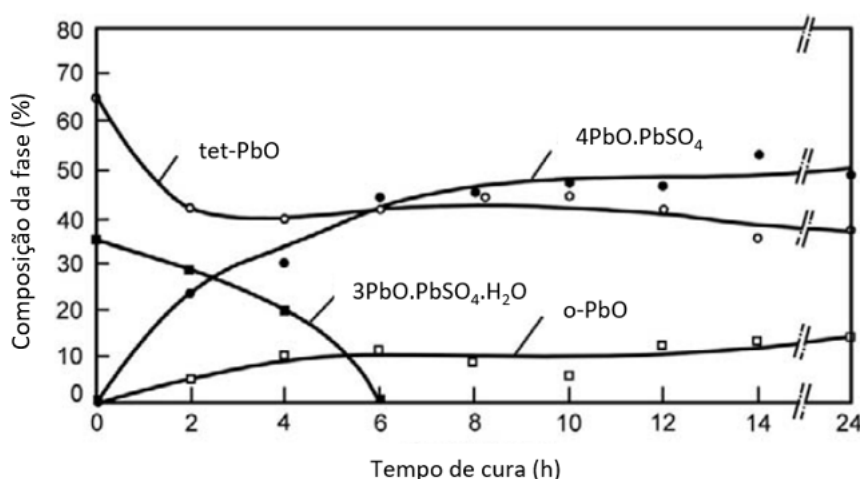
A formação de placas positivas ocorre via processo metassomático, ou seja, a matriz da placa curada é preservada e forma uma estrutura de massa ativa de dióxido de chumbo, enquanto durante a formação das placas negativas uma nova estrutura de massa ativa negativa é formada (Pavlov, 2011).

A formação do esqueleto da pasta curada se dá pelo processo de recristalização, onde partículas pequenas se dissolvem (em sua maioria partículas amorfas) e cristais grandes crescem. Para que o processo ocorra adequadamente, a umidade da placa deve estar entre 6 e 11% e para que isto seja garantido o processo ocorre em câmaras de cura com umidade relativa do ar controlada próxima a 100% (Pavlov, 2011).

As condições ambientais a que o processo de cura é conduzido definem se a placa será composta por 3BS ou por 4BS. As placas constituídas apenas por 3BS advêm de massas produzidas a temperaturas entre 30 e 60°C e processos de cura conduzidos na mesma faixa de temperatura. Já as placas constituídas por 4BS são obtidas quando a massa é preparada a temperaturas entre 80 e 95°C ou quando a massa é preparada a 50°C e o processo de cura é conduzido a temperaturas entre 80 e 95°C e umidade relativa próxima a 100% por 24 horas ou a temperaturas acima de 95°C por 2 a 3 horas com corrente de purga de água (Pavlov, 2011). As equações 4 e 5 apresentam as reações de produção de 3BS e de conversão de 3BS em 4BS, respectivamente, e a figura 4 apresenta a composição da massa curada a 93°C com corrente de água.



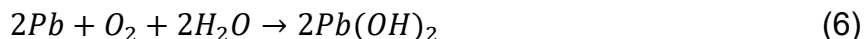
**Figura 4 - Composição da massa curada ao longo do tempo de cura**



Fonte: Adaptado de Pavlov (2011).

A oxidação do chumbo livre residual caracteriza-se por uma reação exotérmica na qual a água é o agente catalisador, porém, com o calor liberado pela reação a umidade contida na placa é perdida por evaporação. Como a maior taxa de oxidação

é obtida a umidades da massa entre 7 e 9%, o processo ocorre nas câmaras de cura a umidade e temperatura controladas para manutenção das condições ideais (Pavlov, 2011). A reação de oxidação do chumbo livre é apresentada pela equação 6.



No que diz respeito à formação da camada de corrosão, primeiramente um processo de segregação acontece, o qual leva à formação de uma fina camada ao longo dos limites de grão. Este processo ocorre até a superfície da grade e outros compostos são formados nos contornos de subgrãos. Ao observar a interface entre os grãos e a formação da camada de intergrãos vê-se que a última forma uma fase separada com alta afinidade por oxigênio, a qual será oxidada a taxa elevada durante a estocagem ao ar livre após a produção da grade e durante o processo de cura. A camada de corrosão formada em placas empastadas apresenta 2 subcamadas: CL<sub>1</sub> e CL<sub>2</sub>. A primeira é composta por partículas de PbO obtidas durante a oxidação do chumbo e a segunda é resultado da intercalação da água no interior das grades e subsequente hidratação do PbO em Pb(OH)<sub>2</sub> (Pavlov, 2011). A equação 6 também representa a reação de corrosão do chumbo e formação da camada de corrosão.

A secagem das placas ocorre utilizando ar quente e tem como finalidade que estas saiam do processo com umidade desejada para o bom manuseio e utilização nas etapas posteriores (Pavlov, 2011). Os dados psicrométricos do ar a altitude de Bauru, 526 metros (Bauru Prefeitura, 2022), podem ser obtidos a partir de sites como o de César (2011).

#### 2.1.2.6 Formação

O processo de formação visa transformar as massas precursoras positiva e negativa compostas por 3BS, 4BS, PbO e Pb em materiais ativos compostos por PbO<sub>2</sub> nas placas positivas e Pb nas placas negativas. Tal transformação é necessária uma vez que os materiais precursores não são capazes de gerar força eletromotriz (Pavlov, 2011).

### 2.1.3 Balanço de Energia

O balanço de energia de um sistema baseia-se na primeira lei da termodinâmica, a qual pode ser enunciada conforme Koretsky (2007) “a variação de energia do sistema tem que ser igual à energia transferida através de suas fronteiras com as vizinhanças.”. Calor, trabalho e energia associada à massa que flui para dentro e para fora de sistemas abertos são exemplos de formas como energia pode ser transferida entre sistema e vizinhança. Calor é transferido quando há gradiente de temperatura entre sistema e vizinhança, sendo transferido de forma espontânea da região de temperatura mais elevada para a região de temperatura mais baixa. Condução, convecção e radiação são os três modos pelos quais energia pode ser transferida graças a um gradiente de temperatura. Já o trabalho está associado, comumente, a algo útil realizado pelo ou sobre o sistema (Koretsky, 2007).

As três formas habituais de energia são energia cinética macroscópica, energia potencial macroscópica e energia interna. A primeira e a segunda são macroscópica e associam-se, respectivamente, ao movimento do sistema e à posição do sistema em campo potencial. Já a última está associada ao movimento, posição e configuração das ligações químicas moleculares das substâncias que compõem o sistema. Variações de energia interna podem ser percebidas macroscopicamente pela mudança de temperatura, mudança de fase e/ou mudança de estrutura química de um sistema. Mudanças de temperatura devido à variação de energia interna são chamadas de calor sensível, enquanto a mudança de fase pela mesma fonte é chamada de calor latente. O calor latente pode ser obtido a partir da variação de entalpia para mudança de fase, valor geralmente tabelado, enquanto o aquecimento de uma substância pode ser calculado a partir de sua variação de entalpia conforme equação 7 (Koretsky, 2007).

$$\dot{Q} = \dot{n}\Delta\hat{H} \quad [\text{kJ/h}] \quad (7)$$

Por sua vez, a variação de entalpia pode ser calculada a partir da equação 8 (Koretsky, 2007).

$$c_p \equiv \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p \quad [\text{kJ/mol.K}] \quad (8)$$

Sabe-se que entalpia corresponde a:

$$h \equiv u + Pv \quad [\text{kJ/kg}] \quad (9)$$

Integrando a equação 8, temos:



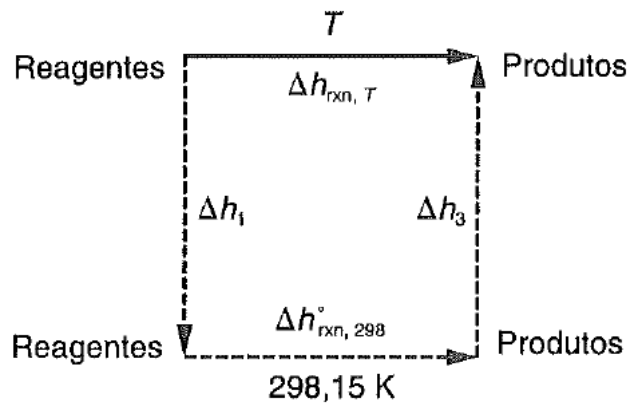
$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad [\text{kJ/kg}] \quad (10)$$

Como para a ocorrência de uma reação química calor é adicionado ou removido do sistema, podemos calcular a energia envolvida no processo a partir da entalpia também. O valor da entalpia de reação, em kJ/mol, pode ser calculado a partir da entalpia de formação dos reagentes e produtos como na equação 11 (Koretsky, 2007).

$$\Delta H_{rxn,298}^\circ = \sum_{produtos} \nu_i (\Delta H_{f,298}^\circ)_i - \sum_{reagentes} \nu_i (\Delta H_{f,298}^\circ)_i \quad (11)$$

Funções de estado são propriedades termodinâmicas cujos valores só dependem dos estados inicial e final do sistema. Exemplos de funções de estado são energia interna e volume. Pode-se criar caminhos hipotéticos para calcular variações de uma propriedade termodinâmica mantendo seu estado final e inicial para facilitar os cálculos. Esta ferramenta é amplamente utilizada para cálculo de entalpia de reação quando esta é encontrada tabelada apenas a temperatura de 25°C (298,15K) e a reação ocorre em temperaturas diferentes ou em sistemas cuja mudança de fase ocorre a pressões diferentes dos valores tabelados. A figura 5 apresenta o caminho para o cálculo de  $\Delta h_T$  à temperatura T tendo como base os dados de capacidade calorífica e de entalpia de reação a 298,15K (Koretsky, 2007).

Figura 5 - Caminho hipotético para cálculo de entalpia de reação.



Fonte: Koretsky (2007).

Por fim, o balanço de energia de um sistema aberto pode ser calculado a partir das equações 12 e 13, em kJ/h, (Koretsky, 2007).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{variação de energia} \\ \text{no sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{energia transferida das vizinhanças para} \\ \text{o sistema} \end{array} \right\} \quad (12)$$

$$\left( \frac{dU}{dt} + \frac{dE_k}{dt} + \frac{dE_p}{dt} \right)_{\text{sis}} = \sum_{\text{entrada}} \dot{n}_{\text{entrada}} (H + e_k + e_p)_{\text{entrada}} - \sum_{\text{saída}} \dot{n}_{\text{saída}} (H + e_k + e_p)_{\text{saída}} + \dot{Q} + \dot{W}_s \quad (13)$$

A conversão de número de mols, em mols, para massa, em kg, pode ser feita conforme a equação 14 (DIAS).

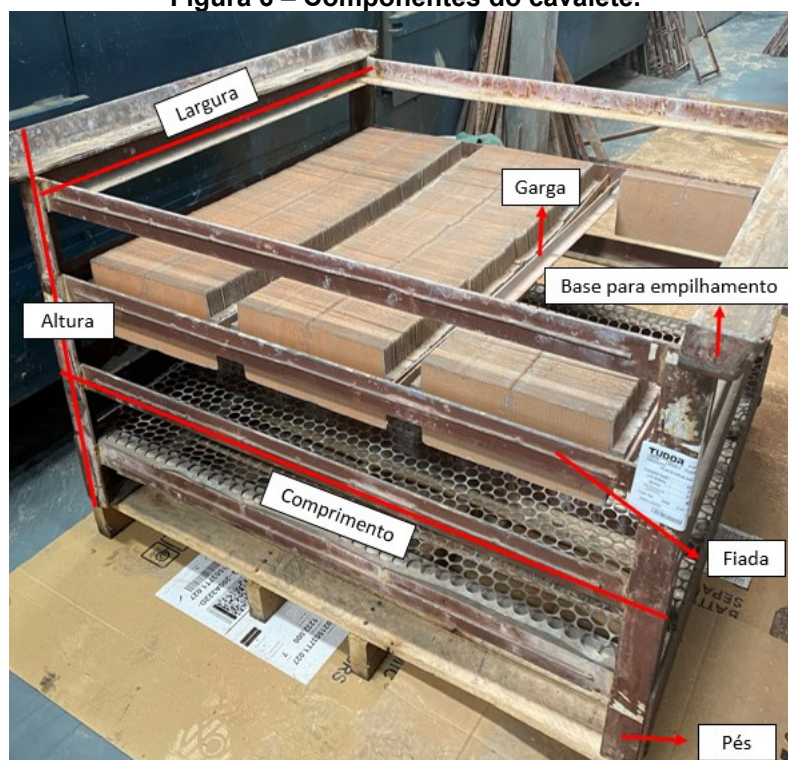
$$n = \frac{m}{MM} \quad (14)$$

## 2.2 Metodologia

### 2.2.1 Dimensionamento de Cavaletes

O dimensionamento dos cavaletes foi realizado com base nas medidas das placas fundidas fabricadas. Sendo assim, analisou-se quais modelos de placas apresentavam maiores dimensões de altura e comprimento e as tomou como base. Era sabido que utilizando os cavaletes antigos apenas 2 fiadas eram passíveis de serem preenchidas por conta da perda de umidade para o ambiente, portanto a altura foi calculada com base na existência de apenas 2 fiadas. Optou-se por manter a largura dos cavaletes inalterada para que houvesse a possibilidade de reforma dos cavaletes antigos, com alteração apenas da altura e comprimento, se necessário.

Manteve-se as medidas dos pés do cavalete, 25 cm, e a altura base superior para empilhamento, 6 cm, medidas estas que foram somadas à altura calculada. Incluiu-se 2 cm à medida de cada fiada, correspondentes à região disponível para circulação de ar e vapor e acomodação de cobertores úmidos cuja finalidade é manter a umidade das placas no nível desejado no carregamento dos cavaletes. No que diz respeito ao comprimento dos cavaletes, à medida calculada adicionou-se 3 cm para acomodação das gargas separadoras de fileiras de placas. A figura 6 mostra os componentes do cavalete.

**Figura 6 – Componentes do cavalete.**

Fonte: Autora (2022).

### 2.2.2 Processo de Cura de Placas

O processo de cura ocorre através de troca de energia e massa entre a placa contendo massa precursora (sistema) e o vapor saturado ou ar seco (vizinhança) alimentados na câmara de cura, a qual apresenta volume definido e imutável ao longo de todo processo. É sabido que o vapor saturado chega à câmara de cura a aproximadamente 4,2 bar de pressão e, com base na tabela de vapor encontra-se a temperatura deste vapor, 145,35°C. Já o ar seco que alimenta as câmaras não tem sua temperatura medida na linha, portanto, para fins de cálculo considerou-se que este apresenta temperatura igual à do ambiente da câmara de cura no ciclo de secagem, 95°C e assumiu-se que este ar ainda conteria uma umidade relativa residual de aproximadamente 1%. Este processo é dividido em enchimento, ciclos 1, 2 e 3 para placas fundidas positivas, ciclos 1, 2, 3 e 4 para placas fundidas negativas, secagem e complemento de oxidação (quando necessário). As condições a que estas etapas são realizadas são apresentadas na figura 7.

Figura 7 - Perfil de cura de placas.

PROGRAMA	ID	1º CICLO				2º CICLO				3º CICLO				4º CICLO			
		TEMPO (h)	TEMP (°C)	H <sub>2</sub> O (%)	FREQ (Hz)	TEMPO (h)	TEMP (°C)	H <sub>2</sub> O (%)	FREQ (Hz)	TEMPO (h)	TEMP (°C)	H <sub>2</sub> O (%)	FREQ (Hz)	TEMPO (h)	TEMP (°C)	H <sub>2</sub> O (%)	FREQ (Hz)
ENCHIMENTO	CARREGAR	90:00	65	95	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EXPANDIDA POSITIVA	EXP[+]	02:30	85	95	20	01:00	60	80	50	15:00	60	80	30	19:00	63	70	30
EXPANDIDA NEGATIVA	EXP[-]	02:00	85	95	20	01:00	63	70	50	24:00	63	70	30				
FUNDIDA POSITIVA	FUND[+]	02:30	85	95	20	01:00	60	80	50	10:00	60	80	30	14:00	63	70	30
FUNDIDA NEGATIVA	FUND[-]	02:00	85	95	20	01:00	63	70	50	24:00	63	70	30				
SECAGEM	SECAGEM	10:00	95	0	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
COMPLEMENTO OXIDAÇÃO	OXIDAÇÃO	07:30	63	70	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Empresa X.

Tendo em vista que a massa precursora na empresa X é confeccionada a uma razão  $H_2SO_4/PbO$  de aproximadamente 5%, a partir da figura 3 pode-se estimar que no início do processo de cura a massa seca é composta em 39% por  $PbO$ , 43% por 3BS, 1% por outros componentes e, por subtração, 17% por  $Pb$ . Sabe-se que o peso seco da massa é, em média, de 163,90 gramas, enquanto seu peso úmido é, em média, 270,46 gramas e o peso médio da grade é de 80,32 gramas. Subtraindo-se o peso da massa seca e da grade da massa total da placa úmida encontrou-se a massa de água contida nas placas. Multiplicando-se a massa da massa seca pelas porcentagens acima encontra-se a massa de cada componente,  $PbO$ , 3BS,  $Pb$ . O número de mols dos componentes no início do processo pode, então, ser calculado a partir da equação 14.

Desta forma, sabendo a composição de cada elemento da massa, é possível analisar as entradas e saídas de massa e energia no sistema em cada etapa do ciclo de cura. Uma vez que os ciclos 2 e 3 das placas fundidas positivas e negativas apresentam condições de temperatura e % $H_2O$  muito parecidos e as reações que ocorrem nestes são as mesmas, unificou-se os dois ciclos, considerando um valor médio de temperatura e % $H_2O$ . O ciclo 4 das placas fundidas positivas também foi incorporado pelos mesmos motivos.

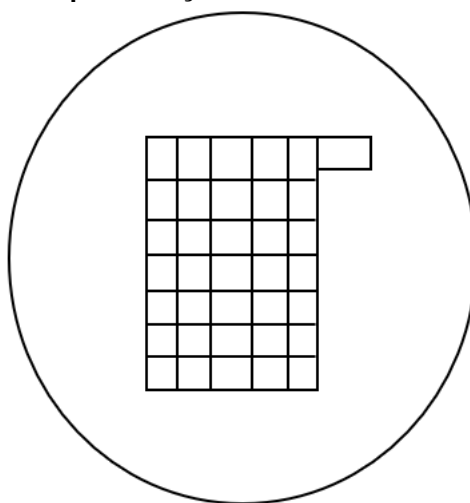
### 2.2.2.1 Enchimento

Nesta etapa do processo de cura os cavaletes são abastecidos nas câmaras de cura, ou seja, estas encontram-se abertas e vapor saturado é alimentado a fim de manter a temperatura em 65°C e a % $H_2O$  em 95%, conforme especificado na figura 7. O tempo total deste processo é de 3 a 4 horas. Tendo em vista que as placas alimentadas nos cavaletes estão a aproximadamente 35°C, segundo medição, o vapor

saturado tem como função aquecer as placas e devido à câmara de cura estar a 95% de umidade relativa, água não é perdida pelas placas.

Sendo assim, para construção do balanço de energia considerou-se que não há fluxo de entrada ou saída de massa no sistema. A figura 8 apresenta uma representação do sistema, placa, com sua fronteira, bordas da placa, e as vizinhanças, câmara de cura.

**Figura 8 – Representação do Sistema no Enchimento**



**Fonte: Autora (2022).**

Como há aquecimento, sabe-se que há variação da energia interna das placas, mas como estas estão paradas e não possuem energia associada ao campo gravitacional,  $E_K$  e  $E_P$  foram desconsideradas. Não há ocorrência de trabalho de eixo, então, através de tais simplificações da equação 16 obteve-se o seguinte balanço de energia para este ciclo:

$$\Delta U = Q \quad (15)$$

O calor envolvendo no processo diz respeito ao aquecimento das placas, então, calculou-se esta energia utilizando-se a equação 10 e as equações de  $c_p$  do Pb, PbO (Perry, H. R.; Green, D. W. (2019), 3BS (Aspen Plus® v12) e H<sub>2</sub>O (DIADEM® v1.2) apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1 – Equações de  $C_p$  dos compostos**

Composto	Equação $C_p$
H <sub>2</sub> O	$C_p = 276370 - 1090,1 \cdot T + 8,125 \cdot T^2 - 0,01412 \cdot T^3 + 0,0000093701 \cdot T^4$ (kJ/mol.K)
O <sub>2</sub>	$C_p = 29103 + 10040 \cdot ((2526,5/T)/\text{SINH}(2526,5/T))^2 + 9356 \cdot ((1153,8/T)/\text{COSH}(1153,8/T))^2$ (kJ/mol.K)
Pb(OH) <sub>2</sub>	$C_p = 0,045751$ (kJ/mol.K)
4BS	$C_p = 175,59 \cdot T + 236565$ (kJ/mol.K)
3BS	$C_p = 189,2 \cdot T + 184404$ (kJ/mol.K)
PbO	$C_p = 10,33 + 0,00318 \cdot T$ (kcal/mol.K)
Pb	$C_p = 5,77 + 0,00202 \cdot T$ (kcal/mol.K)

Fonte: Perry, H. R.; Green, D. W. (2019); (Aspen Plus® v12); (DIADEM® v1.2).

Somou-se os valores de energia de aquecimento de cada componente e dividiu-se este valor pela duração do ciclo, encontrando-se a taxa de energia por minuto e, assim, a taxa de energia por hora. Este valor, então, foi adicionado ao balanço de energia e obteve-se a variação de energia interna da placa.

Como a variação de energia interna em sólidos é aproximadamente o valor da variação da entalpia, adotou-se o valor da taxa de variação de energia interna da placa como a taxa de variação de sua entalpia. Esta taxa de variação de entalpia, por sua vez, é igual à taxa de variação de entalpia do vapor já que esta energia é fornecida por ele. Como o vapor encontra-se no estado de saturação, ao fornecer energia este condensa. A taxa de massa de vapor condensado, então, deve ser reposta por uma corrente de vapor que entra na câmara de cura para que o ambiente permaneça nas condições estabelecidas. Assim, a taxa de massa de vapor condensado que deve ser reposta pela corrente de vapor foi calculada conforme a equação 16 sabendo que a entalpia de condensação do vapor a 4,2 bar é de -2128,58 kJ/kg.

$$\Delta H_{placa} = m_{vapor\ condensado} \cdot H_{condensação} \quad (16)$$

Além da energia necessária para aquecer as placas e promover a reação química, em um primeiro momento é necessário aquecer a câmara e adequar sua UR. Na fase de enchimento a câmara está com todo seu volume preenchido por ar à condição ambiente. A temperatura e UR deste ar foi obtida com o auxílio de um termo-

higrômetro, 22°C e 35% de UR. Como para este ciclo a temperatura ideal é de 65°C e 95% de UR, vapor é injetado na câmara de cura para que estas condições sejam alcançadas. O balanço de energia que representa este processo e nos fornece a entalpia da mistura contendo ar a 65°C e 95% de UR e seu vapor é demonstrado pela equação 17.

$$m_{ar\ 22^{\circ}C} \cdot H_{ar\ 22^{\circ}C} + m_{vap} \cdot H_{vap} = m_{mist1} \cdot H_{mist1} \quad (17)$$

A massa de ar que preenche a câmara de cura no início do processo foi calculada com o uso do volume específico do ar sob suas condições de temperatura, umidade relativa e altitude com o auxílio do site de César (2011), assim como a massa de ar a 65°C e 95% de UR que a preencherá no final do processo de aquecimento. Sabe-se que a câmara de cura, de acordo com suas dimensões, possui um volume de 9,9457 m<sup>3</sup>, dividindo este valor pelo volume específico do ar obteve-se a massa de ar seco presente na câmara. Multiplicando este valor pela umidade absoluta do ar, encontrou-se a massa de vapor presente na câmara. Em seguida, subtraiu-se a massa de vapor contida no ar a 22°C e 35% de UR da massa de vapor contida no ar a 65°C e 95% de UR e encontrou-se a massa de vapor adicionada para o aquecimento da câmara e aumento de sua umidade. Substituindo estes valores à equação 17 e a entalpia do vapor saturado a 4,2 bar: 2740,72 kJ/kg (Koretsky, 2007), encontrou-se a entalpia da mistura. Os valores de volume específico e umidade absoluta do ar nas duas condições é apresentado na tabela 2.

**Tabela 2 – Propriedades do ar**

	Volume Específico (m <sup>3</sup> <sub>ar</sub> /kg <sub>ar seco</sub> )	Umidade Absoluta (kg <sub>vap</sub> /kg <sub>ar seco</sub> )
22°C e 35% de UR	0,902	0,0061
65°C e 95% de UR	1,365	0,2077

**Fonte: César (2011).**

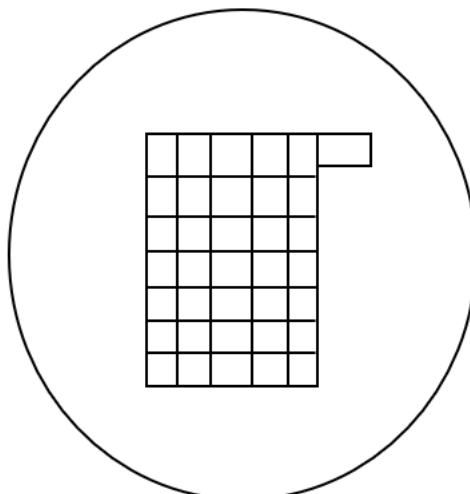
Por fim, a taxa de massa de vapor total necessária ao longo do processo é obtida somando-se a taxa de massa necessária para reposição do vapor condensado na câmara de cura e a massa de vapor necessária para que o ar da câmara aqueça de 22°C até 65°C e eleve sua umidade relativa de 35% para 95% e multiplicando-a pelo número de cavaletes presentes no ciclo.

### 2.2.2.2 1ºCiclo

Nesta etapa do processo de cura a câmara de cura é fechada e vapor saturado é alimentado a fim de manter a temperatura em 85°C e a %H<sub>2</sub>O em 95%, conforme especificado na figura 7. Há a formação de 4BS nas placas negativa conforme a equação 5, bem como o aquecimento das placas e a formação do esqueleto das placas por ligações intermoleculares entre os compostos. A reação de formação de 3BS (equação 4) não ocorre uma vez que consideramos que todo o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> disponível na massa foi consumido durante sua preparação. Como a energia de estabelecimento de ligações intermoleculares é significativamente menor quando comparada à energia de reação e de aquecimento, esta será desprezada. O tempo total deste processo é de 2 horas para placas fundidas negativas e 2:30 horas para placas fundidas positivas, mas para fins de cálculo, será utilizado como base o tempo de duração de 2:00 horas.

Portanto, para elaboração do balanço de energia considerou-se que não há fluxo de entrada ou saída de massa no sistema, considerando que a massa de H<sub>2</sub>O gerada pela reação de formação de 4BS absorvida pela placa. A figura 9 apresenta uma representação do sistema, placa, com sua fronteira, bordas da placa, e as vizinhanças, câmara de cura.

**Figura 9 – Representação do Sistema no Ciclo 1**



**Fonte: Autora (2022).**

Como há aquecimento e ocorrência de reação química, sabe-se que há variação da energia interna das placas e como estas estão paradas e não possuem energia associada ao campo gravitacional,  $E_K$  e  $E_P$  foram desconsideradas. Não há



ocorrência de trabalho de eixo, então, através de tais simplificações da equação 13 obteve-se o seguinte balanço de energia para este ciclo:

$$\Delta U = Q \quad (18)$$

O calor corresponde às energias de aquecimento dos componentes iniciais da massa (anteriormente à reação) e à energia de reação. A primeira foi calculada a partir da equação 10, já a segunda foi calculada a partir das entalpias padrões de formação dos compostos envolvidos na reação, conforme a equação 11. O valor da entalpia do 3BS foi calculada a partir da entalpia padrão de formação dos compostos envolvidos na reação 4 pelo mesmo processo. Já as entalpias padrão de formação do PbO, 4BS, H<sub>2</sub>O e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> foram obtidos a partir de Bode, H. e Sons, J. W. (1977) *apud* Pavlov (2011) e são apresentadas na tabela 3.

**Tabela 3 – Entalpia padrão de formação dos compostos envolvidos na formação de 4BS**

Composto	H <sub>f,298K</sub> <sup>o</sup> (kJ/mol)
3BS	-1912,58
PbO	-218,99
4BS	-1882,1
H <sub>2</sub> O	-285,83
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-813,99

Fonte: Autor (2022).

Sabe-se que o rendimento da reação é de aproximadamente 23% para tempo de cura de aproximadamente 2 horas a partir da figura 4. Dessa forma, multiplicou-se o número de mols iniciais de 3BS formados na masseira pelo rendimento para obter o número de mols de 3BS convertidos em 4BS. Pela estequiometria da reação encontrou-se o número de mols de 4BS formados e multiplicou-se o valor da energia desprendida na reação por este valor para encontrar a energia da reação com este rendimento. Como a reação não ocorre a 25°C, mas a 85°C criou-se um caminho hipotético de reação que envolve o resfriamento dos reagentes de 85°C para 25°C e o aquecimento dos produtos de 25°C a 85°C. Estes valores foram calculados conforme a equação 10 utilizando as equações de cp dos compostos apresentados na tabela 1.

Assim, somando as energias de aquecimento e resfriamento dos compostos no caminho hipotético e a energia envolvida na reação de formação de 4BS obteve-

se a energia total da reação para placas fundidas negativas. Somou-se a este valor a energia de aquecimento das placas anteriormente calculada. Dividindo-se este valor pela duração do ciclo, encontrou-se a taxa de energia por hora para placas negativas. Para as placas positivas apenas o valor da energia de aquecimento da placa foi dividido pela duração do ciclo para encontrar a taxa de energia.

Adicionando-se o valor de Q ao balanço de energia encontrou-se a taxa de variação de energia interna das placas positivas e negativas. Como a variação de energia interna em sólidos é aproximadamente o valor da variação da entalpia, adotou-se o valor de taxa de variação de energia interna da placa como sua taxa de variação de entalpia. Esta variação de entalpia, por sua vez, é igual à variação de entalpia do vapor já que esta energia é fornecida por ele. Como o vapor encontra-se no estado de saturação, ao fornecer energia este condensa. A massa condensada, então, deve ser repostada por uma corrente de vapor que entra na câmara de cura para que o ambiente permaneça nas condições estabelecidas. Assim, a taxa de massa de vapor condensado que deve ser repostada pela corrente de vapor foi calculado conforme a equação 16.

Como dito anteriormente, além da energia necessária para aquecer as placas e promover a reação química, em um primeiro momento é necessário aquecer a câmara e adequar suas UR. No ciclo 1 a câmara está com todo seu volume preenchido pela mistura de ar e vapor a 65°C e 95% de UR, condição do ar no ciclo anterior. Como para este ciclo a temperatura ideal é de 85°C e 95% de UR, vapor é injetado na câmara de cura para que estas condições sejam alcançadas. O balanço de energia que representa este processo e nos fornece a entalpia da mistura contendo ar a 85°C e 95% de UR e seu vapor é demonstrado pela equação 19.

$$m_{mist1} \cdot H_{mist1} + m_{vap} \cdot H_{vap} = m_{mist2} \cdot H_{mist2} \quad (19)$$

A massa de ar que preenche a câmara de cura no início do processo foi calculada anteriormente com o uso do volume específico. Da mesma forma obteremos a massa de ar a 85°C e 95% de UR que a preencherá no final do processo de aquecimento. Dividindo o volume total da câmara pelo volume específico do ar a 85°C e 95% de UR, obteve-se a massa de ar seco presente na câmara. Multiplicando este valor pela umidade absoluta do ar encontrou-se a massa de vapor presente na câmara. Em seguida, subtraiu-se a massa de vapor contida na mistura de ar e vapor a 65°C e 95% da massa de vapor contida no ar a 85°C e 95% de UR e encontrou-se a massa de vapor adicionada para o aquecimento da câmara e manutenção de sua

umidade. Substituindo estes valores e a entalpia do vapor saturado a 4,2 bar, à equação 19 encontrou-se a entalpia da mistura. Os valores de volume específico e umidade absoluta do ar a 85°C e 95% de UR são apresentados na tabela 4.

**Tabela 4 – Propriedades do ar a 85°C e 95% de UR**

	Volume Específico (m <sup>3</sup> <sub>ar</sub> /kg <sub>ar seco</sub> )	Umidade Absoluta (kg <sub>vap</sub> /kg <sub>ar seco</sub> )
85°C e 95% de UR	2,572	0,8546

**Fonte: César (2011).**

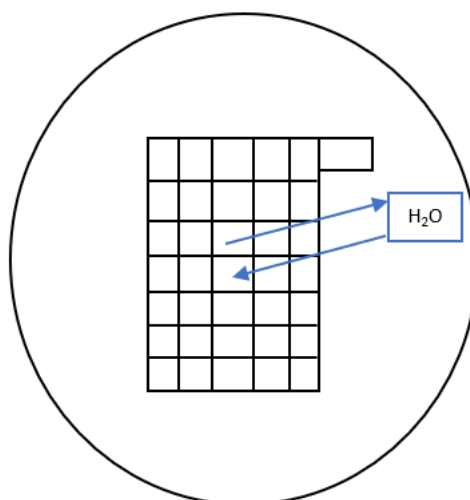
Por fim, a taxa de massa de vapor total necessária ao longo do processo é obtida somando-se a taxa de massa necessária para reposição do vapor condensado na câmara de cura e a massa de vapor necessária para que o ar da câmara aqueça de 65°C até 85°C e mantendo sua umidade relativa e multiplicando-a pelo número total de placas no ciclo.

#### 2.2.2.3 2°, 3° e 4°Ciclo

As etapas 2, 3 e 4 do processo de cura ocorrem em câmara de cura fechada com alimentação de ar quente a 1% de UR a fim de manter a temperatura em 61,5°C e a %H<sub>2</sub>O em 75%, conforme especificado na figura 7. Nesta fase ocorre o resfriamento das placas, a oxidação do chumbo livre presente nas mesmas e a oxidação das grades para formação da camada de corrosão. Como a quantidade de chumbo presente na grade que sofre oxidação é baixa, desconsiderou-se a energia associada a esta reação. A reação de oxidação do chumbo livre, por ser exotérmica, provoca vaporização da água presente na superfície da massa, a qual é repostada por vapor saturado contido no ambiente. A duração dos ciclos 2, 3 e 4 nas placas fundidas positivas e dos ciclos 2 e 3 nas placas negativas é de 25 horas totais.

Com base nos fenômenos descritos acima a formação do balanço de energia considerou que os fluxos de entrada ou saída de massa no sistema são os mesmos, bem como a entalpia do fluido, já que é o mesmo, assim, a energia associada ao fluxo de entrada e saída de massa foi anulada. A figura 10 apresenta uma representação do sistema, placa, com sua fronteira, bordas da placa, as vizinhanças, câmara de cura, e as correntes de entrada e saída de H<sub>2</sub>O.

**Figura 10 – Representação do Sistema nos Ciclos 2, 3 e 4**



**Fonte: Autora (2022).**

Como há resfriamento e a ocorrência de reação química, sabe-se que há variação da energia interna das placas e como estas estão paradas e não possuem energia associada ao campo gravitacional,  $E_K$  e  $E_P$  foram desconsideradas. Não há ocorrência de trabalho de eixo, então, através de tais simplificações da equação 13 obteve-se o seguinte balanço de energia para este ciclo:

$$\Delta U = Q \quad (20)$$

Conforme a equação 12 calculou-se a energia de resfriamento dos compostos presentes na placa. Já a energia padrão de reação foi calculada a partir das entalpias padrões de formação dos compostos, conforme a equação 11. O valor da entalpias padrão de formação do Pb, O<sub>2</sub> e Pb(OH)<sub>2</sub> foram obtidos a partir de Perry, H. R.; Green, D. W. (2019) e são apresentadas na tabela 5.

**Tabela 5 – Entalpias padrão de formação dos compostos da reação de oxidação**

Composto	$H_{f,298K}^{\circ}$ (kJ/mol)
Pb	0
O <sub>2</sub>	0
Pb(OH) <sub>2</sub>	-514,63

**Fonte: Perry, H. R.; Green, D. W. (2019).**

A partir destes dados o valor de energia desprendida no processo foi calculado. Sabe-se que o rendimento da reação é de aproximadamente 95,53% pela variação do teor de Pb da massa e a especificação final para tempo de cura de 25 horas. Dessa forma, calculou-se a energia da reação multiplicando o valor de energia

total pelo número de mols de  $\text{Pb}(\text{OH})_2$  formados a partir da reação com este rendimento.

Uma vez que a reação não ocorre a  $25^\circ\text{C}$ , mas a  $61,5^\circ\text{C}$  criou-se um caminho hipotético de reação que envolve o resfriamento dos reagentes de  $61,5^\circ\text{C}$  para  $25^\circ\text{C}$  e o aquecimento dos produtos de  $25^\circ\text{C}$  a  $61,5^\circ\text{C}$ .

A energia total da reação para placas fundidas foi calculada somando-se a energia de reação e a energia de aquecimento e resfriamento do caminho hipotético. Somando-se este valor com a energia inicial de aquecimento e dividindo pela duração do ciclo, encontrou-se a taxa de energia por hora.

Adicionando este valor ao balanço de energia obteve-se a taxa de variação de energia interna da placa. Esta variação, por se tratar de um sólido, pode ser aproximada como o valor de variação de entalpia da placa. Como dito acima, uma vez que ocorre resfriamento das placas e liberação de energia através da reação química, esta energia acaba vaporizando uma porção da água da superfície das placas. A massa de vapor produzido pode ser calculada igualando a variação de entalpia do sistema (placa) devido à queda de temperatura e à reação química com a entalpia de vaporização da água multiplicada pela massa vaporizada conforme a equação 21.

$$\Delta H_{placa} = m_{\text{H}_2\text{O vaporizado}} \cdot H_{\text{vaporização}} \quad (21)$$

Para manter o ambiente sob as condições adequadas, o vapor deve ser absorvido, ou seja, removido do sistema. A remoção do vapor gerado é feita através da injeção da corrente de ar a  $95^\circ\text{C}$  e 1% de umidade relativa, a qual absorve vapor até encontrar-se a  $61,5^\circ\text{C}$  (temperatura do ciclo) através de um processo adiabático, ou seja, isentálpico. Sabendo a massa de vapor absorvida por 1 kg de ar seco ao passar da condição de  $95^\circ\text{C}$  para a condição de  $61,5^\circ\text{C}$  obtida através da subtração da umidade absoluta em cada condição ( $0,0056 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$  a  $95^\circ\text{C}$  e 1% de UR e  $0,0186 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$  a  $61,5^\circ\text{C}$  e  $110,64 \text{ kJ/kg}$  de entalpia), pode-se calcular a massa de ar necessária para absorver a massa total de vapor gerado.

O gasto de vapor neste ciclo, então, corresponderá ao vapor necessário para aquecer a corrente de ar a atmosférico a  $22^\circ\text{C}$  e 35% de UR para  $95^\circ\text{C}$  e 1% de UR alimentada na câmara. Desta forma, deve-se calcular a vazão de vapor necessária para o aquecimento do ar ambiente até  $95^\circ\text{C}$  e redução da umidade relativa de 35% a 1%. Esta pode ser calculada através da equação 22, a qual relaciona a formação de ar a  $95^\circ\text{C}$  composto por sua massa seca e o vapor existente ao ar ambiente seco com sua respectiva massa de vapor e aquecido pelo vapor.

$$m_{ar\ 95^{\circ}C\ seco} \cdot H_{ar\ 95^{\circ}C\ seco} + m_{vap\ no\ ar\ 95^{\circ}C} \cdot H_{vap} = m_{ar\ amb} \cdot H_{ar\ amb} + (m_{vap} + m_{vap\ ar\ amb}) \cdot H_{vap} \quad (22)$$

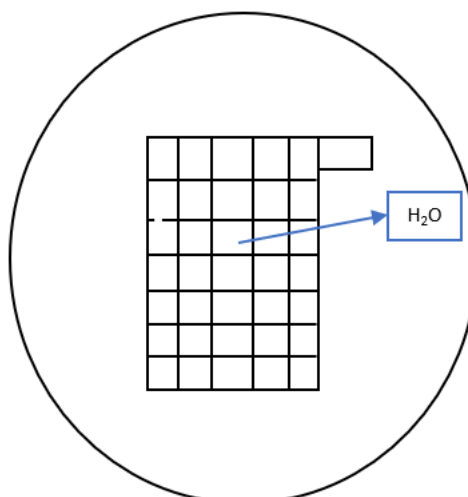
Multiplicando a massa de vapor necessária para aquecer 1 kg de vapor de 22°C e 35% de UR a 95°C e 1% de UR pela massa de ar a 95°C e 1% de UR requerido, encontra-se a massa de vapor total necessária.

#### 2.2.2.4 Secagem

A etapa de secagem do processo de cura ocorre em câmara de cura fechada com alimentação de ar quente a fim de manter a temperatura em 95°C e a %H<sub>2</sub>O em 0%, conforme especificado na figura 7. Nesta fase ocorre o aquecimento das placas e a evaporação da água presente nas mesmas. A duração da secagem é de 7:30 horas totais.

Para a construção do balanço de energia considerou-se que há fluxo de saída de vapor no sistema, ou seja, energia de fluxo associada. A figura 11 apresenta uma representação do sistema, placa, com sua fronteira, bordas da placa, as vizinhanças, câmara de cura, e a corrente de saída de H<sub>2</sub>O.

**Figura 11 – Representação do Sistema na Secagem**



**Fonte: Autora (2022).**

Como há aquecimento, sabe-se que há variação da energia interna das placas, mas como estas estão paradas e não possuem energia associada ao campo gravitacional,  $E_K$  e  $E_P$  foram desconsideradas. Não há ocorrência de trabalho de eixo, então, através de tais simplificações da equação 13 obteve-se o seguinte balanço de energia para este ciclo:

$$\Delta U = \sum_{saída} n.H + Q \quad (22)$$

A energia de vaporização da água foi calculada a partir da entalpia de vaporização da água a 95°C obtida a partir de Koretsky (2007): 2270,2 kJ/kg. Somando este valor à energia de aquecimento e dividindo o valor pela duração da etapa temos a taxa de energia da etapa. Este valor foi adicionado ao balanço de energia através do termo Q.

A energia de fluxo foi calculada multiplicando-se a massa de H<sub>2</sub>O evaporada pela entalpia do vapor saturado, conforme a equação 19. Adicionando-se este valor ao balanço de energia obteve-se a taxa de variação de energia interna das placas promovida pelo ar seco das vizinhanças. Como a variação de energia interna em sólidos é aproximadamente o valor da variação da entalpia, adotou-se o valor de taxa de variação de energia interna da placa como sua taxa de variação de entalpia. Esta variação de entalpia, por sua vez, é igual à variação de entalpia do ar quente já que esta energia é fornecida por ele. A quantidade de ar quente a ser inserida no sistema poderia ser calculada com base na capacidade de absorção do ar com informações de umidade absoluta do seu estado final, como feito no ciclo 2, 3 e 4, porém, como não se sabe a condição final deste vapor o cálculo será realizado igualando a taxa de variação de entalpia do sistema à taxa de entalpia do ar quente, similarmente ao realizado nas etapas de enchimento e ciclo 1 com o vapor.

Como dito anteriormente, além da energia necessária para secar as placas, em um primeiro momento é necessário aquecer a câmara e adequar sua UR. No ciclo 2, 3 e 4 a câmara está com todo seu volume preenchido pela mistura de ar e vapor a 61,5°C e 75% de UR. Como para este ciclo a temperatura ideal é de 95°C e 0% de UR (que para fins de cálculo aproximaremos a 1% de UR), a mistura de ar e vapor presente na câmara deve ser purgada e a câmara deve ser alimentada com ar quente a 95°C e 1% de UR. A quantidade de ar a 95°C e 1% de umidade relativa injetada para tal feito é calculada com base no seu volume específico, 1,124 m<sup>3</sup><sub>ar</sub>/kg<sub>ar seco</sub>. Dividindo o volume da câmara pelo volume específico do ar obtêm-se a vazão de ar necessária.

A taxa de massa de ar quente total necessária ao longo do processo é obtida somando-se a taxa de massa necessária para vaporizar a água contida nas placas e a massa de ar necessária para preencher a câmara. Utilizando a relação da massa de vapor necessária para aquecer ar ambiente e gerar ar quente obtêm-se o consumo

de vapor para este ciclo. Este valor deve, ainda, ser multiplicado pelo número total de placas no interior de um ciclo para corresponder à quantidade total de vapor.

Sabe-se que cada cavalete acomoda cerca de 5165 placas e que cada câmara de cura possui capacidade para acomodar 12 cavaletes. Multiplicando a taxa de vapor requerido em cada etapa por sua duração e pela quantidade total de placas em um ciclo encontra-se a demanda total de vapor para cada etapa. Somando estes valores encontra-se a demanda total de vapor para o processo.

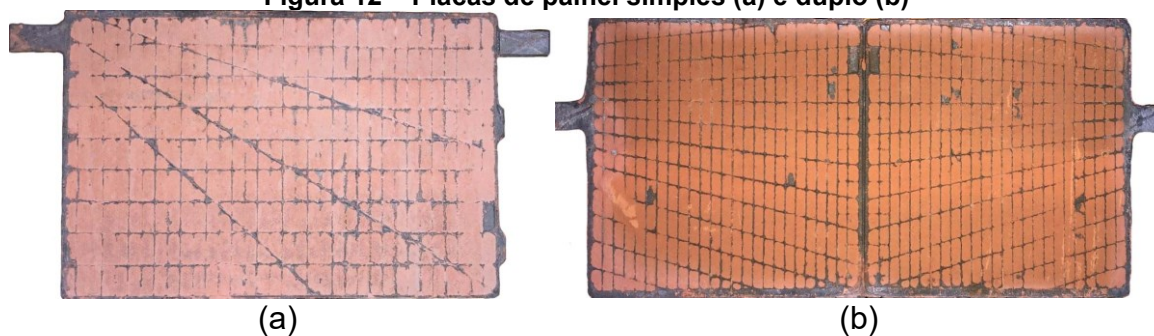


### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Dimensionamento de Cavaletes

De acordo com o dimensional dos modelos de placa produzidos constatou-se que o modelo A era o que apresentava maior comprimento para as placas de painel simples (cada fiada deste tipo de placas é composta por 4 fileiras de placas),  $27,6 \pm 0,03$  cm, e o modelo B era o que apresentava maior comprimento para as placas de painel duplo (cada fiada deste tipo de placas é composta por 3 fileiras de placas),  $16,45 \pm 0,03$  cm. As placas do tipo duplas são aquelas cuja confecção é feita com 2 placas fundidas uma ao lado da outra e em sua utilização estas são destacadas e usadas individualmente. A figura 12 (a) apresenta uma placa de painel simples e a figura 12 (b) uma placa de painel duplo. O modelo A era também o que apresentava maior altura,  $16,0 \pm 0,03$  cm. Sendo assim, o comprimento total do cavalete para acomodação das 4 fileiras de placas simples era de 110,52 cm e 98,88 cm para acomodação das três fileiras de placas duplas, sem considerar a medida das gargas. Estes valores foram obtidos utilizando-se o maior comprimento de placa tolerado. Então, utilizou-se a medida requerida pelas quatro fileiras de placas simples como parâmetro e adicionou-se a medida das gargas, resultando em comprimento total mínimo final do cavalete de 113,53 cm.

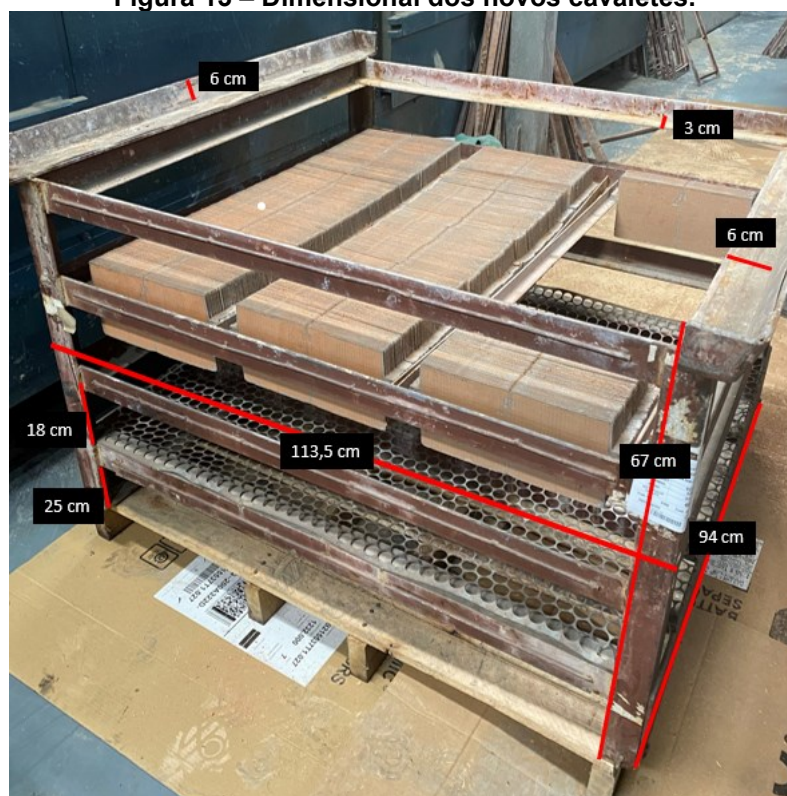
Figura 12 – Placas de painel simples (a) e duplo (b)



Fonte: Autora (2022)

Por fim, a altura ideal calculada somando-se as alturas das placas em 2 fiadas, os pés, a base de empilhamento de cavaletes e a sobra para circulação de ar e adição do cobertor foi de 67 cm. A figura 13 mostra esquematicamente as dimensões calculadas para o cavalete.

**Figura 13 – Dimensional dos novos cavaletes.**



**Fonte: Autora (2022).**

Através de medição da câmara de cura determinou-se que sua altura útil (altura com capacidade de acomodar cavaletes) é de 3,30 metros e sua largura útil é de 3,25 metros. Dessa forma, pode-se acomodar acomodadas 3 fileiras de 3 cavaletes de cura de placas tracionárias em cada câmara de cura, uma vez que a altura dos cavaletes atuais é de 85 cm e a largura é de 94 cm, totalizando 9 cavaletes. Com a altura dos novos cavaletes, 67 cm, 4 cavaletes poderão ser acomodados em cada fileira e uma vez que a largura dos cavaletes foi mantida inalterada, mantêm-se 3 fileiras, totalizando 12 cavaletes por ciclo de cura.

Com a utilização dos cavaletes atuais pode-se curar 46485 placas por ciclo de cura, enquanto com os novos cavaletes poderão ser curadas 61980 placas por ciclo de cura. A utilização dos novos cavaletes, então, torna possível a cura adicional de 15495 placas por processo de cura. A produção mensal de placas tracionárias é em média de 228406 placas, tomando como base a produção dos meses de outubro, novembro e dezembro de 2021. Sendo assim, para curar a produção mensal de placas tracionárias faz-se necessário 5 ciclos de cura acomodando cada qual 9 cavaletes atuais. Com o uso dos novos cavaletes redimensionados faz-se necessário 4 ciclos

de cura acomodando 12 cavaletes e com capacidade para acomodar mais 67514 placas. Desta forma, utilizando os novos cavaletes é possível passar o mesmo número de placas pelo processo de cura utilizando uma câmara a menos e acomodando mais placas, ou seja, com possibilidade de expansão da produção mesmo utilizando uma câmara de cura a menos.

### 3.2 Processo de Cura de Placas

Pela massa da grade calculou-se o número de mols de Pb que a compõe: 0,3876 mols. A composição da massa precursora calculada é apresentada na tabela 6.

**Tabela 6 – Composição (em mols) da massa precursora**

$n_{PbO}$	0,2864
$n_{3BS}$	0,0711
$n_{Pb}$	0,1345
$n_{H_2O}$	1,4578

**Fonte: Autora (2022).**

#### 3.2.1 Enchimento

Os valores de energia de aquecimento dos compostos de 35 até 65 °C são apresentados na tabela 7. A energia de aquecimento do Pb foi calculada com base na soma do número de mols de chumbo presente na massa e na grade.

**Tabela 7 – Energia de aquecimento dos compostos na etapa de enchimento**

Composto	Energia (kJ)
Pb	0,4212
PbO	0,4085
3BS	0,5174
H <sub>2</sub> O	3,2859

**Fonte: Autora (2022).**

O gasto energético calculado foi de 3,0887 kJ/h para a etapa de enchimento do processo de cura, portanto, a energia envolvida no ciclo completo foi de 4,63305 kJ. De acordo com a equação 17, o gasto energético é igual ao valor da variação de entalpia da placa, assim, dividindo a variação de entalpia da placa pela entalpia do

vapor saturado encontra-se uma demanda de vapor de 1,4510 gramas por placa, valor que multiplicado pelo número médio de placas em cada cavalete, 5165 placas, e pela capacidade acomodação de cavaletes redimensionados da estufa, 12, resulta em uma demanda de vapor de 89,9358 kg/h. A massa de vapor necessária para aquecer o sistema da temperatura ambiente até 65°C é de 1,4461 kg, somando este valor à demanda de vapor advinda do aquecimento das placas obtemos uma necessidade total de 91,3819 kg de vapor por hora no processo. Já a demanda de vapor para operação total do processo é de 319,8366 kg. Como o número total de câmaras de cura possuídas pela indústria X é 16, caso todas estivessem ligadas no mesmo ciclo ao mesmo tempo a demanda total de vapor seria de 1462,11 kg/h. Tendo em vista que a produção média de vapor por hora na indústria X é de 1450 kg/h, a demanda de vapor calculada não pode ser fornecida para o funcionamento de todas as câmaras de cura ao mesmo tempo com o novo número de placas curadas.

Porém, o fato acima não ocorre, já que de acordo com a produção mensal de placas tracionárias apenas 4 ciclos de cura se fazem necessários, os quais demandam 365,5276 kg/h de vapor, valor produzido pela indústria. Estes não funcionam concomitantemente, mas se funcionassem demandariam uma produção adicional de 12,1102 kg/h de vapor. Caso queira-se operar as 16 estufas concomitantemente para cura de placas tracionárias algumas alternativas de geração de vapor seriam possíveis como expandir a produção de vapor da caldeira: a troca da caldeira por uma com maior capacidade de vapor ou adição de outra caldeira de para uso concomitante ou ainda criação de uma rede de integração energética que reaproveitasse a energia do ar purgado no ciclo de secagem e nos demais ciclos por análise minuciosa das perdas de calor.

### 3.2.2 1° Ciclo

A energia de aquecimento dos compostos presentes na massa de 65°C a 85°C é apresentada na tabela 8.

**Tabela 8 – Energia de aquecimento dos compostos na etapa 1**

Composto	Energia (kJ)
Pb	0,2830
PbO	0,2743
3BS	0,3515
H <sub>2</sub> O	2,1966

Fonte: Autora (2022).

A partir das entalpias de formação dos compostos envolvidos na reação de formação do 4BS obteve-se uma energia de reação de -72,72 kJ/mol. Multiplicando-se este valor número de mols de 4BS formados, valor apresentado na tabela 9 junto ao número de mols finais após subtração/adição do número de mols gastos/formados dos outros componentes, obteve-se a energia de -1,1897 kJ.

**Tabela 9 – Número de mols final ao ciclo 1**

Composto	Número de mols
4BS	0,0164
H <sub>2</sub> O	1,4741
3BS	0,0548
PbO	0,2700
Pb	0,1345

Fonte: Autora (2022).

A energia envolvida no caminho hipotético de reação é apresentada na tabela 10.

**Tabela 10 – Energia do caminho hipotético do ciclo 1**

Composto	Energia (kJ)
3BS	-0,2389
PbO	-0,0467
4BS	0,2888
H <sub>2</sub> O	0,0738

Fonte: Autora (2022).

Assim, a taxa de energia do ciclo foi de 1,5527 kJ/h para placas fundidas positivas e 0,9963 kJ/h para placas fundidas negativas. Já a energia do ciclo completo foi de 3,1054 kJ para placas fundidas positivas e 1,9927 kJ para placas fundidas

negativas. Assim, a taxa média de energia requerida é de 1,2745 kJ/h que, dividida pela entalpia de condensação do vapor saturado a 4,2 bar, nos fornece uma demanda de vapor de 0,5988 kg de vapor por placa. Multiplicando pelo número de placas médio em um cavalete encontramos uma demanda de 3,0927 kg de vapor. Multiplicando, ainda, este valor pelo número total de novos cavaletes suportados por câmara de cura obtemos uma demanda energética de 37,1119 kg/h. A demanda de vapor calculada para aquecer o sistema até a temperatura desejada na primeira hora do processo é de 1,7913 kg. Somando estes valores temos que a demanda de vapor total por hora de processo é de 38,9032 kg/h. Já a demanda de vapor para o processo completo é de 77,8064 kg. Como o número total de câmaras de cura possuídas pela indústria X é 16, caso todas estivessem ligadas no mesmo ciclo ao mesmo tempo a demanda total de vapor seria de 622,4514 kg/h. Tendo em vista que a produção média de vapor por hora na indústria X é de 1450 kg/h, a demanda de vapor calculada pode ser fornecida pela indústria com o uso da caldeira atual. Atualmente apenas 4 ciclos são suficientes para a cura das placas necessárias, resultando até em um excedente de placas que poderiam ser curadas. A demanda de vapor caso as 4 câmaras de cura operem ao mesmo tempo é de 155,6128 kg/h.

### 3.2.3 2°, 3° e 4° Ciclo

Na tabela 11 são apresentadas as energias de resfriamento dos componentes das placas de 85°C para 61,5°C.

**Tabela 11 – Energia de resfriamento ciclos 2, 3 e 4.**

Composto	Energia (kJ)
Pb	-0,3323
PbO	-0,3037
3BS	-0,3176
H <sub>2</sub> O	-2,6092
4BS (-)	-0,1143

**Fonte: Autora (2022).**

A partir dos dados de entalpia de formação dos compostos verificou-se que o valor de energia despreendida na reação de oxidação de um mol de chumbo livre é de -228,8 kJ/mol. De acordo com o rendimento da reação e o número de mols de chumbo presentes na placa inicialmente, a energia despreendida foi de -29,3921 kJ para a

formação de 0,1285 mol de  $\text{Pb}(\text{OH})_2$ . O número final de mols de cada composto após os ciclos 2, 3 e 4 é apresentado na tabela 12.

**Tabela 12 – Número de mols final ao ciclo 1**

Composto	Número de mols
Pb	0,0060
$\text{H}_2\text{O}$	1,3397
3BS	0,0548
4BS	0,0163
PbO	0,2700

Fonte: Autora (2022).

Os valores de energia de aquecimento e resfriamento envolvidos no caminho hipotético de reação são apresentados na tabela 13.

**Tabela 13 – Energia do caminho hipotético dos ciclos 2, 3 e 4**

Composto	Energia (kJ)
Pb	-0,1258
$\text{O}_2$	-0,0690
$\text{H}_2\text{O}$	-0,3688
$\text{Pb}(\text{OH})_2$	0,0059

Fonte: Autora (2022).

Dessa forma, a energia total da reação para placas fundidas foi de -29,9499 kJ. Somando-se com a energia inicial de aquecimento e dividindo pela duração do ciclo para encontrar a energia por hora obtêm-se -1,3451 kJ/h. A energia total destes ciclos foi de -33,6272 kJ. Multiplicando a taxa de energia pelo número total de placas em um cavalete obtêm-se o total de 6947,3855 kJ/h que vaporizarão água da superfície das placas. Dividindo este valor pela entalpia de vaporização a 4,2 bar temos que 3,2638 kg/h de vapor serão gerados. A partir da umidade absoluta sabe-se que 1 kg de ar a 95°C e 1% de UR absorve 0,013 kg de vapor, assim, 251,0661 kg/h de ar seco serão necessários para absorver toda a massa de vapor. Uma vez que pela equação 21 obtêm-se que para aquecer 1 kg de ar seco a 22°C e 35% a 95°C e 1% de UR de umidade relativa são necessários 0,02610 kg de vapor por hora, obtêm-se uma necessidade de vapor de 7 kg/h. Sabendo que pelo valor específico do ar a 61,5°C e 75% de UR temos 8,1656 kg de ar seco preenchendo o volume da câmara e 1,0305 kg de vapor neste ar, enquanto na condição do ciclo anterior 3,30466

kg de vapor são encontrados do ar, 2,2742 kg de vapor devem ser removidos da câmara para que esta se encontre na condição ideal do ciclo.

Pela relação citada acima, aonde 1 kg de ar a 61,5°C e 110,94 kJ/kg de entalpia absorvem 0,013 kg de vapor por kg de ar, 174,9356 kg de ar devem ser injetados na câmara. Multiplicando este valor pela quantidade de vapor necessária para aquecer cada kg de ar até 95°C e 1% de UR encontra-se uma demanda de 4,5662 kg de vapor, que somada com a demanda para remoção da energia da reação e resfriamento das placas totaliza 11,5663 kg/h. Já a demanda de vapor para o processo completo é de 289,1564 kg. Caso todas as 16 estufas estejam operando ao mesmo tempo haverá uma demanda de 185,0601 kg/h de vapor. Tendo em vista que a produção média de vapor por hora na indústria X é de 1450 kg/h, a demanda de vapor calculada pode ser fornecida utilizando-se a caldeira atual. Atualmente apenas 4 ciclos são suficientes para a cura das placas necessárias, resultando até em um excedente de placas que poderiam ser curadas. A demanda de vapor caso as 4 câmaras de cura operem ao mesmo tempo é de 46,26503 kg/h.

### 3.2.4 Secagem

Na tabela 14 são apresentadas as energias de aquecimento dos componentes das placas de 61,5°C para 95°C.

**Tabela 14 – Energia de aquecimento na etapa de secagem**

Composto	Energia (kJ)
Pb	0,3578
PbO	0,4336
3BS	0,4545
H <sub>2</sub> O	3,3839
4BS (-)	0,1635
Pb(OH) <sub>2</sub>	0,1969

**Fonte: Autora (2022).**

Uma vez que a massa de água evaporada é 22,7514 gramas, a energia de vaporização calculada foi de 48,4282 kJ. Somando este valor à energia de aquecimento e à energia de fluxo, 62,3552 kJ, e dividindo o valor pela duração da etapa temos que a taxa de energia da etapa é de 15,4365 kJ/h. Dividindo este valor



pela entalpia do ar a 95°C e 1% de UR obtêm-se uma demanda de 0,1225 kg de ar a 95°C e 1% de UR por placa. Multiplicando este valor pela quantidade total de placas em uma câmara de cura cheia encontra-se uma demanda de 7593,9917 kg/h de ar a estas condições. Multiplicando, então, este valor por 0,02610 kg de vapor, quantidade de vapor necessária para aquecer 1 kg de ar ambiente, encontra-se uma demanda de 198,2031 kg/h de vapor.

Para preencher a câmara de cura com vapor a 95°C e 1% de UR, de acordo com o volume específico do ar a estas condições, são necessários 8,8485 kg de ar. Multiplicando por 0,0261 kg, massa de vapor necessária para fornecer 1 kg de ar a 95°C e 1% de UR a partir do ar ambiente, obtêm-se que 0,2309 kg de vapor é necessário. Somando este valor à demanda de vapor calculada acima encontra-se uma demanda total de vapor de 198,4341 kg/h. Já a demanda de vapor para o processo completo é de 1488,256 kg. Tendo em vista que são 16 câmaras de cura, caso todas estejam ligadas ao mesmo tempo, 3174,945 kg/h de vapor serão necessários.

Uma vez que a produção média de vapor por hora na indústria X é de 1450 kg/h, a demanda de vapor calculada não pode ser fornecida, necessitando de produção adicional de vapor de 1724,95 kg/h. O fato acima não ocorre, já que de acordo com a produção mensal de placas tracionárias apenas 4 ciclos de cura se fazem necessários, os quais demandam uma corrente de vapor de 793,7363 se operados ao mesmo tempo. Estes não funcionam concomitantemente, mas se funcionassem demandariam uma produção adicional de 1724,95 kg/h de vapor. Caso queira-se operar as 16 estufas concomitantemente algumas alternativas de geração de vapor seriam possíveis como expandir a produção de vapor da caldeira: a troca da caldeira por uma com maior capacidade de vapor ou adição de outra caldeira de para uso concomitante ou ainda criação de uma rede de integração energética que reaproveitasse a energia do ar purgado no ciclo de secagem e nos demais ciclos por análise minuciosa das perdas de calor.

Somando-se a quantidade de vapor total requerida em todos os ciclos do processo de cura utilizando os novos cavaletes tem-se demanda de 2175,055 kg de vapor por câmara de cura, curando 61980 placas em cada ciclo (capacidade por ciclo utilizando os cavaletes atuais).

## 4 CONCLUSÃO

A fim de redimensionar os cavaletes existentes para que estes possam ser preenchidos em tempo hábil para as placas encontrarem-se em condição de umidade relativa adequada, analisou-se o dimensional das placas tracionárias produzidas pela indústria X. Assim, chegou-se nas seguintes dimensões de cavalete: altura 61 cm, comprimento 113,52 cm e largura 94 cm. Para obter-se cavaletes sob estas dimensões é possível reformar os cavaletes já existentes ou ainda os substituir.

Utilizando-se as dimensões das câmaras de cura usadas pela indústria X constatou-se que 12 cavaletes com as novas dimensões podem ser acomodados em cada ciclo de cura, 3 unidades a mais quando comparado ao número de cavaletes atuais suportados pelas câmaras de cura. Tal diferença leva à necessidade de um processo de cura a menos para curar a média de produção de placas tracionárias atuais e à possibilidade de curar 15495 placas a mais utilizando ainda um ciclo a menos.

Pela análise das reações químicas e trocas de energia ocorridas em cada etapa do ciclo de cura encontrou-se uma demanda de vapor total de 319,8366 kg para a etapa de enchimento, 77,80643 kg de vapor para o ciclo 1, 289,1564 kg de energia para os ciclos 2, 3 e 4 e 1488,2560 kg de vapor para o ciclo de secagem, totalizando 2175,055 kg de vapor para cura de 12 cavaletes contendo 5165 placas. A demanda total de vapor para curar a média de produção mensal de placas é de 8700,22 kg. A operação das 4 câmaras de cura necessárias para cura da produção mensal de placas pode ser realizada concomitantemente uma vez que a produção de vapor da indústria é suficiente. Porém, caso esta produção seja ampliada e deseje-se utilizar as 16 câmaras disponíveis na indústria para cura de placas tracionárias a produção de vapor não será suficiente. Dessa forma, através da análise da diferença de energia necessária utilizando os dados aqui fornecidos pode-se estudar a melhor alternativa para ampliação da produção de vapor: troca da caldeira, aquisição de caldeiras complementares ou assim por diante.

Os cálculos realizados para análise da demanda de vapor necessitaram do uso de considerações uma vez que a pressão durante o processo de cura não é medida, bem como as vazões de ar quente e vapor de entrada e saída na câmara e a temperatura deste ar quente. Sendo assim, para obtenção de cálculos ainda mais

realísticos é recomendada a instalação de instrumentos de medição na linha e na câmara de cura, principalmente para futuras ampliações de produção.

## REFERÊNCIAS

- ASPENTECH. **Aspen Plus**. Disponível em:  
<https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspem-plus>.
- BAURU PREFEITURA. **Bauru Conheça a Cidade** – Dados Geográficos. Disponível em: <https://www2.bauru.sp.gov.br/bauru.aspx?m=2>. Acesso em 23 mai. 2022.
- BERGMAN, T. L., LAVINE, A. S.. **Incopera fundamentos de transferência de calor e massa**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- BLOG MOVIMAK. **Bateria tracionária: entenda o que é e para que serve!**. 2019. Disponível em: <https://movimak.com.br/bateria-tracionaria-entenda-o-que-e-e-para-que-serve/>. Acesso em: 09 mai. 2022.
- CARNEIRO, R. L.; MOLINA, J. H. A.; ANTONIASSI, B.; MAGDALENA, A. G.; PINTO, E. M.. **Aspectos essenciais das Baterias Chumbo-Ácido e Princípios Físico-Químicos e Termodinâmicos do seu Funcionamento**. Rev. Virtual Quim., 2017, 9(3), 889-911. Disponível em:  
<http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/CarneiroNoPrelo.pdf>. Acesso em: 7 mai. 2022.
- CÉSAR, L.. **Cálculo das Propriedades Psicrométricas do Ar**. 2011. Disponível em: <<http://www.agais.com/toolbox/psicrometria3.php>>. Acesso em: 23 mai. 2022.
- DESIGN INSTITUTE FOR PHYSICAL PROPERTIES (DIPPR). **Diadem**. Disponível em: <https://www.aiche.org/dippr/dippr-pricing-ordering>
- DIAS, D. L.. **Número de mol**. Brasil Escola. Disponível em:  
<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/numero-mol.htm>. Acesso em: 12 de maio de 2022.
- KORETSKY, M. D.. **Termodinâmica para engenharia química**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- PAVLOV, D. **Lead-acid batteries: science and technology**. Elsevier, 2011. ISBN: 978-0-444-52882-7
- PERRY, H. R.; GREEN, D. W.. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 9. ed. New York: Mc Graw Hill Education, 2019.
- RAIFORD, M. **O vasto mundo das baterias**. [Entrevista concedida a] Brasil Energia, online, 2021. Disponível em:  
<https://weseek.com.br/viewnews/ViewMateria.html?materialId%3D59446186%26canalId%3D486699%26clienteId%3DP9ybjMtObrI%3D%26newsletterId%3DZ1f34IBEOiM%3D#>. Acesso em: 10 mai. 2022.
- SILVA, J. F.; SILVA, I. A.. **Acompanhando o processo de fabricação de bateria tracionária para melhor aproveitamento da m.prima**. 18° Congresso Nacional de Iniciação Científica, 2018. Disponível em: <https://conic-semesp.org.br/anais/files/2018/trabalho-1000000448.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2022.

TUDOR BATERIAS. **Tracionárias 2021-2022**. 2022. Disponível em:  
[https://www.tudor.com.br/assets/upload/cat\\_logo\\_tracion\\_ria\\_2021\\_2022.pdf](https://www.tudor.com.br/assets/upload/cat_logo_tracion_ria_2021_2022.pdf).  
Acesso em 13 jun. 2022.