



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**MARIA EUGÊNIA PIUVEZAM DE ALBUQUERQUE BASTOS**

**REDUÇÃO DO ÍNDICE DE ORELHA OXIDADA EM PLACAS DE BATERIAS  
AUTOMOTIVAS: UM ESTUDO DE CASO EM UMA ESTUFA INDUSTRIAL  
SEM CONTROLE**

**JOÃO PESSOA**

**2022**

**MARIA EUGÊNIA PIUVEZAM DE ALBUQUERQUE BASTOS**

**REDUÇÃO DO ÍNDICE DE ORELHA OXIDADA EM PLACAS DE BATERIAS  
AUTOMOTIVAS: UM ESTUDO DE CASO EM UMA ESTUFA INDUSTRIAL  
SEM CONTROLE**

Trabalho Final de Curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Arioston Araújo de Morais Júnior.

**JOÃO PESSOA**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

B327r Bastos, Maria Eugenia Piuvezam de Albuquerque.

Redução do índice de orelha oxidada em placas de baterias automotivas: um estudo de caso em uma estufa industrial sem controle / Maria Eugenia Piuvezam de Albuquerque Bastos. - João Pessoa, 2022.

75 f. : il.

Orientação: Arioston Araújo de Moraes Júnior.  
TCC (Graduação) - UFPB/de Tecnologia.

1. Oxidação. 2. Placas de baterias de chumbo-ácido.  
3. PDCA. 4. Estufa. I. Moraes Junior, Arioston Araújo de. II. Título.

UFPB/CT

CDU 66.01 (043.2)

**MARIA EUGÊNIA PIUVEZAM DE ALBUQUERQUE BASTOS**

**“REDUÇÃO DO ÍNDICE DE ORELHA OXIDADA EM PLACAS DE  
BATERIAS AUTOMOTIVAS: UM ESTUDO DE CASO EM UMA ESTUFA  
INDUSTRIAL SEM CONTROLE”.**

Trabalho final de curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

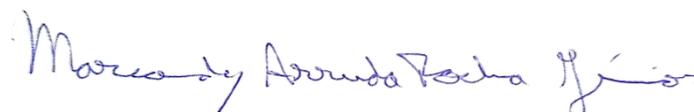
**Aprovado em 01 de dezembro de 2022.**

**BANCA EXAMINADORA**



---

**Prof. Dr. Arioston Araújo de Moraes Júnior**  
(Orientador - UFPB)



---

**Eng. Químico Marcondes Arruda Rocha Júnior** (Avaliador Externo – Moura  
Baterias S.A.)



**Profª Fabíola Dias S. Curbelo**  
Mat. 2453534

---

**Profª. Dra. Fabíola Dias da Silva Curbelo** (Avaliadora Interna– UFPB)

*Dedico esse trabalho a minha família e aos meus amigos que me acompanharam durante esses cinco anos de curso, colaborando para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.*

## AGRADECIMENTOS

Não teria como iniciar os agradecimentos sem citar a minha família, meu maior alicerce e maior incentivador do meu sucesso, assim como agradecer a Deus pelo dom da vida. Para iniciar, irei começar agradecendo a minha mãe, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Marcia Regina Piuvezam, que antes de ser profissional é mãe, agradeço não só por tudo que ela fez e faz por mim, mas por ser a minha principal inspiração de profissional, de mãe e de pessoa. E agradeço principalmente por sempre ser meu porto seguro.

Agradeço também ao meu Pai, Luiz Henrique de Albuquerque Bastos, que também é uma inspiração para mim, um pai que faz de tudo pela sua família, que por mais que distante geograficamente se fez presente em todos os momentos, que desde a minha infância me incentivou a ir atrás dos meus objetivos.

A minha irmã, Helena Christina Piuvezam de Albuquerque Bastos, meus mais sinceros agradecimentos, sua inteligência e dedicação me inspiram. Obrigada principalmente por nunca hesitar em tirar minhas dúvidas em física.

Seria impossível citar os nomes de todas as pessoas que me ajudaram ao longo dessa trajetória, mas mais impossível ainda não agradecer as seguintes pessoas:

Aos meus amigos do curso meus sinceros agradecimentos, mas gostaria de agradecer em especial a: Maria Eduarda Rocha, Beatriz Sales, Brenna Mendes, Renata Meira, João Pedro Santos, Brunno Gadelha e Ana Vithoria de Moraes.

A minhas amigas de infância meus agradecimentos por serem uma das minhas principais incentivadoras e por acompanharem toda a minha trajetória. Aos meus amigos que adquiri durante essa jornada universitária, agradeço por deixar meus dias mais leves.

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao Grupo de Estudo Avançados em Química Analítica (GEAQA) da UFPB. Obrigada Prof. Dr. Wallace Duarte Fragoso por me escolher desde o início da graduação a fazer parte do grupo que foi essencial para o meu desenvolvimento pessoal e profissional, que sem dúvidas abriu inúmeras oportunidades para mim. Também, não poderia deixar de agradecer o meu Orientador Prof. Dr. Arioston Araújo de Moraes, por todo apoio durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Gostaria de agradecer ao Grupo Moura pela oportunidade de trabalho e possibilitar o desenvolvimento do presente projeto. Gostaria de agradecer primeiramente a Marcondes Rocha, Nayane Brasil, Wandson Ferreira, Germano Filho e Hiago Felipe obrigada por todo o apoio, vocês foram essenciais no meu desenvolvimento e o do presente trabalho. Gostaria de agradecer a Produção de Placas da Moura, a Manutenção

Placas da Moura e ao time de Engenharia de Processo, sem eles esse trabalho não seria possível. Agradeço também aos meus amigos de Belo Jardim-PE, por serem minha família quando a minha estava distante.

Agradeço a Universidade Federal da Paraíba (UFPB) por todas as oportunidades ao longo dessa trajetória. E a todos aqueles que contribuíram para a realização desse trabalho e a conclusão desse curso, eu deixo os meus sinceros agradecimentos.

Por fim, gostaria de deixar meus agradecimentos a toda minha família, mas em especial a minha avó Narcisa Christina de Albuquerque Bastos, que foi uma das minhas principais incentivadoras, que eu tanto admiro. Eu tenho certeza de que onde quer que ela esteja, ela está me acompanhando nessa etapa. Obrigada vó por sempre acreditar em mim.

*“Nós somos o resultado dos livros que lemos, das viagens que fazemos e das pessoas que amamos.”*

**Airton Ortiz**

*“As palavras sempre ficam. Lembre-se sempre do poder das palavras. Quem escreve constrói um castelo, e quem lê passa a habitá-lo.”*

**Markus Zusak**

*“Na vida, não existe nada a se temer, apenas a ser compreendido.”*

**Marie Curie**

## RESUMO

Anualmente, as indústrias, em especial a automotiva, naval, aeronáutica e de construção civil, enfrentam prejuízos gerados pelo processo de oxidação. Esse problema gera perda financeira de produto, de maquinário etc. As indústrias de baterias de chumbo-ácido enfrentam problemas de oxidação na orelha da placa da bateria. Esse fato prejudica de forma direta no produto, podendo causar o desligamento da bateria, dessa forma há a necessidade de retrabalho das placas, gerando prejuízos financeiros. No presente trabalho foi realizado um estudo de caso dessa problemática em uma indústria automotiva de baterias de chumbo-ácido no agreste Pernambucano. Com o intuito de encontrar a causa raiz foi utilizada a ferramenta de análise PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) seguindo a filosofia de melhoria contínua (*Kaizen*). Na etapa de planejamento do ciclo PDCA foi observado que a oxidação da orelha da placa acontece no processo de cura das placas, nas estufas industriais, majoritariamente, nas que não possuem controle. Com o objetivo de analisar as variáveis que influenciavam no problema sem prejudicar a produção, foram realizados testes em uma estufa em escala piloto. Nessas análises foi possível observar a influência da umidade durante o processo de cura, das composições dos tipos de cavaletes, além de observar se a composição da liga pode influenciar na oxidação da orelha da placa. Dessa forma, com os resultados obtidos constatou-se que a umidade possui forte influência na problemática. Logo, foi proposto uma solução de diminuir a umidade em torno de 10-15% no final da cura. Com essa tratativa os resultados foram satisfatórios em escala piloto, e assim replicados em uma estufa sem controle em escala industrial, instalando um exaustor. Desse modo, foi possível reduzir o problema e propor uma solução possível de ser implementada na indústria, com o principal objetivo de diminuir as perdas ocasionadas pela oxidação da orelha da placa.

**Palavras-chaves:** Oxidação. Placas de baterias de chumbo-ácido. PDCA. Estufa.

## ABSTRACT

Every year industries, especially automotive, shipbuilding, aeronautics, and civil construction, face losses caused by the oxidation process, this problem generates financial, product, machinery, etc. losses. Lead-acid battery industries face problems of oxidation on the battery plate lug. This fact directly harms the product and may cause the battery to shut down, thus requiring the rework of the plates, and causing financial losses. In the present work, a case study of this problem was carried out in an automotive industry of lead-acid batteries in the rural region of Pernambuco. To find causes of the problem, the PDCA analysis tool (Plan, Do, Check, Act) was used, following the philosophy of continuous improvement (*Kaizen*). In the planning stage of the PDCA cycle, it was observed that the oxidation of the plaque lug occurs in the curing process of the plate, in industrial curing chambers, mostly, in those that do not have control. To analyze the variables that influenced the problem without harming production, tests were carried out in a pilot-scale curing chamber. In these analyses, it was possible to observe the influence of humidity during the curing process, on the composition of the types of plates carries, in addition to observing whether the composition of the alloy can influence the oxidation of the plate lug. Thus, with the results obtained, it was found that humidity has a strong influence on the problem. Therefore, a solution was proposed to decrease the humidity by around 10-15% at the end of curing. With this approach, the results were satisfactory on a pilot scale, and thus replicated in an uncontrolled curing chamber on an industrial scale, installing an exhaust fan. In this way, it was possible to reduce the problem and propose a possible solution to be implemented in the industry, with the main objective of reducing the losses caused by the oxidation of the plate lug.

**Keywords:** Oxidation. Lead-acid battery plates. PDCA. Curing Chamber.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fundação da Acumuladores Moura em Belo Jardim, 1957. ....	19
Figura 2 - Cronologia da bateria. ....	21
Figura 3 - Modelo esquemático do processo de descarga de uma bateria ácido. ....	23
Figura 4 - Representação dos componentes da Bateria de Chumbo-Ácido. ....	24
Figura 5 - Fluxograma de produção de baterias chumbo-ácido. ....	25
Figura 6 - Representação da grade de chumbo utilizada nas placas da bateria. ....	27
Figura 7 - Componentes da placa da bateria de chumbo-ácido. ....	29
Figura 8 - Principais processos que ocorrem durante a cura da placa. ....	30
Figura 9 - Representação do ciclo PDCA. ....	37
Figura 10 - Desenho esquemático para comparação entre microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura. ....	41
Figura 11 - Representação do impacto das placas oxidadas no processo de montagem das baterias. ....	43
Figura 12 - Reação Global de oxirredução entre o Fe e o Pb. ....	49
Figura 13 - Multímetro utilizado para os testes. ....	50
Figura 14 - lote de placa com a orelha oxidada. ....	52
Figura 15 - Orelha oxidada por gotejamento. ....	52
Figura 16 - imagem da bobina que apresentou oxidação em algumas partes. ....	53
Figura 17 - Cavalete de protótipo com divisória de PP e com uma placa de ferro. ....	55
Figura 18 - Diferença da orelha entre as placas que curaram uma encostada no Fe e outra encostada na divisória de PP. ....	56
Figura 19 - Placa de ferro após o processo de cura. ....	57
Figura 20 - cavalete modificado para o teste. ....	58
Figura 21 - Comparação das orelhas que curaram em partes diferentes do cavalete. ....	58
Figura 22 - Medição do multímetro da diferença de potencial do molho de placas e do cavalete. ....	59
Figura 23 - Gráfico de temperatura e umidade relativa do ar da estufa “A” quando não foi observado a oxidação da orelha das placas. ....	60
Figura 24 - Gráfico de temperatura e umidade relativa do ar da estufa “A” quando foi observado a oxidação da orelha das placas. ....	60
Figura 25 - Gráfico de temperatura e umidade simulando um exaustor ligado nas últimas horas de cura. ....	62

Figura 26 - Gráfico da incidência de orelha oxidada por carga e por estufa.....	63
Figura 27 - parede da estufa “A”. .....	64
Figura 28 - Gráfico de temperatura e umidade com o exaustor ligado nas últimas horas de cura.....	65
Figura 29 - Gráfico de temperatura e umidade com sem o exaustor ligado nas últimas horas de cura.....	66
Figura 30 - Gráfico comparativo da temperatura da placa e temperatura da estufa durante o processo de cura.....	67
Figura 31 - Gráfico da % de carga que oxidava na estufa A antes e pós a implementação do exaustor.....	68
Figura 32 - Resultados do MEV da orelha que oxidou por consequência das condições do ambiente. ....	69
Figura 33 - Resultado do MEV da orelha que oxidou por consequência de gotejamento. ....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Brainstorm das possíveis causas do problema de oxidação.....	45
Tabela 2 - Planejamento fatorial completo de 3 níveis para os parâmetros da estufa. ...	47
Tabela 3 - Planejamento fatorial completo de 3 níveis para os parâmetros da estufa (em %, oC e Hz). .....	47
Tabela 4 - Placas no final da cura. ....	56
Tabela 5 - Observação da orelha da placa com uma hora de diferença de análise. ....	61

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	18
<b>2.1. Objetivo geral</b> .....	18
<b>2.2. Objetivos Específicos</b> .....	18
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	19
<b>3.1. Acumuladores Moura S.A</b> .....	19
<b>3.2. Acumuladores elétricos</b> .....	20
3.2.1. Cronologia da bateria .....	20
3.2.2. Baterias de chumbo-ácido .....	22
3.2.3. Componentes da bateria de chumbo-ácido.....	23
3.2.4. Processo produtivo da bateria.....	24
3.2.4.1. Produção de óxido de chumbo.....	25
3.2.4.2. Produção das grades.....	26
3.2.4.3. Produção da massa.....	28
3.2.4.4. Empaste das grades .....	29
3.2.4.5. Cura das placas .....	30
3.2.4.5.1. Oxidação de Pb livre .....	30
3.2.4.5.2. Corrosão da grade .....	31
3.2.4.5.3. Recristalização.....	32
3.2.4.5.4. Dissolução-precipitação .....	32
3.2.4.6. Secagem das placas.....	33
3.2.4.7. Montagem da Bateria .....	33
3.2.4.8. Formação e acabamento .....	33
<b>3.3. Filosofia <i>Kaizen</i></b> .....	34
<b>3.4. Ferramentas de Gestão PDCA</b> .....	36
<b>3.5. Corrosão/Oxidação</b> .....	39
<b>3.6. Microscopia Eletrônica de Varredura</b> .....	41
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	42
<b>4.1. Direcionador</b> .....	42
<b>4.2. Identificação do problema</b> .....	42
4.2.1. Montagem .....	42
4.2.2. Retrabalho .....	43
4.2.3. Processo produtivo de placas.....	44
4.2.4. Análise das estufas.....	44
4.2.5. Estufa teste .....	45

4.2.6.	Prototipagem .....	46
4.2.7.	Composição da liga.....	48
4.2.8.	Composição dos cavaletes.....	48
4.2.9.	Umidade da estufa. ....	50
4.2.10.	Microscopia eletrônica de varredura.....	51
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
<b>5.1</b>	<b>Composição da liga .....</b>	<b>53</b>
5.1.1	Teste de composição da bobina .....	53
5.1.2	Testes de liga em orelhas de placa que curaram na mesma estufa .....	54
5.1.3	Teste de composição em ligas diferentes, mas em mesma condição de cura.....	54
<b>5.2</b>	<b>Composição dos cavaletes .....</b>	<b>55</b>
5.2.1	Testes realizados na estufa de teste verificando a influência da composição do cavalete. 55	
<b>5.3</b>	<b>Umidade da estufa durante o processo de cura. ....</b>	<b>59</b>
5.3.1	Estudo da influência da umidade utilizando a estufa de protótipo.....	61
5.3.2	Replicação dos ensaios em escala industrial. ....	62
5.3.3	Testes de qualidade para a ação proposta.....	66
<b>5.4</b>	<b>Microscopia eletrônica de varredura .....</b>	<b>68</b>
5.4.1	MEV da orelha que oxidou pela estufa. ....	69
5.4.2	MEV da orelha que oxidou por gotejamento.....	70
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>72</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>73</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXO.....</b>	<b>76</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As ligas metálicas estão presentes, majoritariamente, em todos os setores industriais, em especial nos segmentos automobilístico, naval, aeronáutico e de construção civil. Diante disso, a corrosão de metais deve ser evitada, com o intuito de preservar os metais e diminuir o prejuízo para o setor industrial.

A corrosão é um problema crucial em todo o mundo causado por processos eletroquímicos das reações de oxirredução, no qual geram problemas ambientais e afeta, principalmente, as indústrias, acarretando perdas de materiais, e causando prejuízos financeiros, por consequência, dos elevados custos com a compra de equipamentos anticorrosivos e produtos capazes de desacelerar tal processo químico (INBEC, 2019).

A Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO) estima que o processo de corrosão seja responsável por, aproximadamente, de 3 % do PIB anual (2018), isto é R\$ 280 bilhões. Segundo a mesma instituição, se as medidas de proteção contra corrosão fossem devidamente aplicadas, a economia poderia ser de pelo menos R\$ 112 bilhões (ALKIN, 2021).

A oxidação, portanto, tem como uma de suas principais consequências, na indústria, corrosão de equipamentos metálicos. Além disso, há corrosões causadas pelas reações de oxirredução (oxidação) nas indústrias que afetam não só os equipamentos metálicos, como também o próprio produto que é produzido, como é o caso da oxidação das orelhas das placas de chumbo em empresas de bateria de chumbo-ácido. As placas de chumbo na bateria são de suma importância para o funcionamento das baterias, haja vista que elas proporcionam a reação eletroquímica que viabiliza a passagem de corrente.

Neste contexto, esse problema, que as indústrias de baterias de chumbo-ácido enfrentam, gera um retrabalho para o processo de produção das placas. Haja vista, que as placas que apresentam oxidação da orelha não podem seguir para o processo produtivo e, assim, elas devem ser lixadas para serem utilizadas sem causar danos a bateria. Com esse processo de retrabalho acrescentado no processo produtivo da bateria, há inúmeras perdas, como perda por máquina parada, já que o operador teve que exercer a função de lixar as orelhas das placas, perda da hora do operador e dependendo do grau da corrosão pode ocasionar *scrap* (descarte).

Logo, o presente trabalho buscou reduzir o índice de orelha oxidada em placas em uma empresa de baterias de chumbo ácido do agreste pernambucano, com o principal objetivo de reduzir os danos gerados pela problemática. O estudo foi realizado dentro da própria indústria.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Este trabalho teve como objetivo geral desenvolver um método de análise para identificar a principal causa raiz que gera a oxidação da orelha da placa, com o intuito de propor uma solução que reduza o índice do problema e, assim, poder implementar a solução dentro da indústria de baterias de chumbo-ácido reduzindo as perdas.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, contou-se com os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma metodologia para a análise do problema para a identificação da causa raiz;
- Usar o PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) para cada ação do projeto;
- Evidenciar se, com as melhorias propostas, é possível reduzir de fato o índice de orelha oxidada.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Acumuladores Moura S.A

A acumuladores Moura S.A. nasceu no ano de 1957 no agreste Pernambucano, mais especificamente, na cidade de Belo Jardim, a 180 km da capital, Recife. A empresa foi fundada pelos Engenheiros Químicos Edson Mororó Moura e sua esposa Maria da Conceição Moura (ACUMULADORES MOURA S/A, 2012).

Figura 1- Fundação da Acumuladores Moura em Belo Jardim, 1957.



Fonte: Site oficial da Acumuladores Moura.

Acumuladores Moura, apesar de ter iniciado em uma época remota e em uma pequena cidade, o seu crescimento foi exponencial até chegar ao patamar que alcançou nos dias de hoje. No início da década de 60, a empresa adotou um intenso programa de transferência de tecnologia junto ao maior fabricante mundial de baterias da época, a inglesa *Chloride*. Em 1979, iniciou-se a formação da Rede de Depósitos Moura (RDM). A RDM é responsável pela distribuição de baterias a nível nacional e internacional, tornando-se a maior do país na área de baterias automotivas (MOURA, 2015).

A sua trajetória é marcada por eventos importantes como: fundação da Metalúrgica Moura em 1966, na década de 1980 o início do fornecimento de baterias a duas das principais 18 montadoras presentes no mercado brasileiro, a Fiat em 1984 e a Volkswagen em 1988. Fatos, também marcantes nos anos 80, foram a entrada no mercado Norte-Americano com o início das exportações, em 1983, o lançamento da bateria para

veículos movidos a álcool, em 1984, e a inauguração da fábrica de Itapetininga (SP), em 1986 (ACUMULADORES MOURA S/A, 2012).

No início da década de 90, a Moura estabeleceu outra importante parceria tecnológica: a *Moll Batteries*, considerada pela Volkswagen AG e Audi, o seu melhor fornecedor de baterias mundialmente. Por conta desta parceria, a empresa estava apta a começar a fornecer seus produtos para a montadora Volkswagen do Brasil, em 1991. Outro importante parceiro tecnológico é a multinacional *GNB Technologies*, fornecedor da Ford Inglaterra e Ford EUA e detentora da patente mundial para a fabricação de baterias com a chamada “Liga Ag”, tendo a Acumuladores Moura S.A. exclusividade no Brasil. As suas mais recentes parceiras são a *Exide Corporation* (Índia) e a *East Penn Manufacturing Company* (EUA). (Grupo Moura Baterias Automotivas, 2012).

A Acumuladores Moura (ACMO) compõe o Grupo Moura. Sendo este contemplado por mais de 80 (oitenta) distribuidoras comerciais, 6 (seis) plantas fabris, 1 (um) centro de distribuição e 18 (dezoito) *holdings*. Dentre os quais destacam-se: Instituto Tecnológico Edson Mororó Moura (ITEMM), a Transportadora Bitury, e o Instituto Conceição Moura. O Grupo Moura conta hoje com mais de quatro mil colaboradores (ACUMULADORES MOURA S/A, 2022).

### **3.2. Acumuladores elétricos**

Baterias são conjuntos de acumuladores elétricos recarregáveis, interligados convenientemente, construídos e utilizados para receber, armazenar e liberar energia elétrica por meio de reações químicas. Para as baterias de chumbo ácido, esta reação envolve chumbo e ácido sulfúrico (ABNT, 1987).

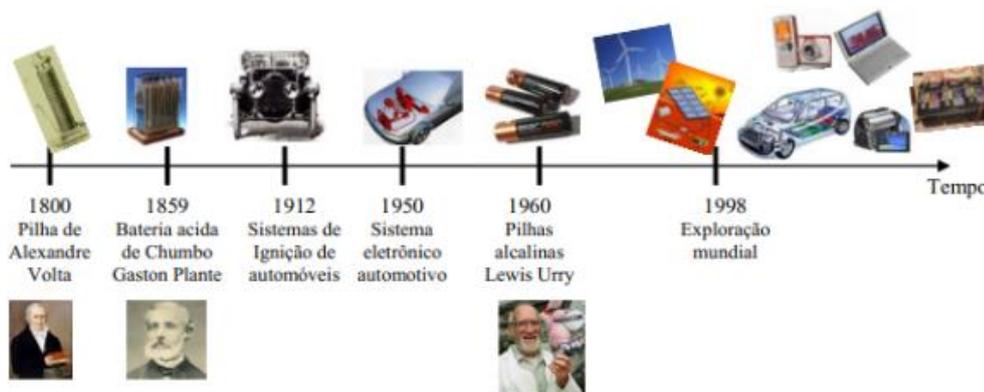
Atualmente, existem inúmeros tipos de baterias no mercado com diferentes sistemas químicos. No entanto, existem quatro principais tecnologias: chumbo (veículos com motor de combustão interna, *startstop* e híbridos), níquel (veículos híbridos), lítio (veículos híbridos, híbridos *plug-in* e elétricos) e sódio (veículos híbridos *plug-in* e elétricos). No presente trabalho, o foco são as baterias de tecnologia de chumbo-ácido.

#### **3.2.1. Cronologia da bateria**

As baterias automotivas que, atualmente, são utilizadas para partida de motores a combustão em veículos automotivos, surgiram a partir de estudos e observações de pesquisadores na área de eletroquímica ao longo da história. Como uma possível definição, bateria pode ser um conjunto de pilhas, tem-se que o seu surgimento advém do estudo de pilhas eletroquímicas até chegar no conceito que tem-se nos dias de hoje.

Assim, o primeiro acumulador elétrico foi desenvolvido em 1800, por Alessandro Volta, um químico e físico italiano que criou a pilha não recarregável. Esta descoberta deu início a uma série de descobertas e estudos que desenvolveram as baterias atuais (PAVLOV, 2011). A figura 2 resume a evolução das baterias ao longo do tempo.

Figura 2 - Cronologia da bateria.



fonte: LEÃO, 2009.

Outro marco importante na história dos acumuladores elétricos, foi a descoberta da reação reversível ideal, em que o principal princípio proporciona que as baterias funcionem da forma recarregável. Essa descoberta foi feita pelo francês Raymond Gaston Planté, que possibilitou o desenvolvimento da pilha de chumbo-ácido. As células de *planté* eram formadas por duas folhas de chumbo (Pb) separadas por flanela, em  $H_2SO_4$  diluídas. A passagem de corrente convertia a superfície de uma das placas em Dióxido de Chumbo ( $PbO_2$ ) e a outra em Chumbo (Pb). (CHAN, 2000)

Na primeira metade do século XX, foi inventada a partida elétrica que gerou um aumento na demanda de baterias. Logo, as baterias começaram a ser aplicadas a ignição de automóveis (1912) que, mais tarde, tornou-se responsável pelo gerenciamento eletrônico do veículo e a descoberta da pilha em pastilha pelos alemães Schlecht e Ackermann (1932).

Na II Guerra Mundial, surgiu a necessidade de portabilidade de baterias para a comunicação, aviação e transmissores, assim como era necessário baterias de alta capacidade e de serviço pesado para tanques e veículos de assalto. Além disso, naquela época, as baterias geravam energia para iluminação de abrigos, hospitais, navios etc. Dessa forma, após a II Guerra, houve a popularização do uso das baterias (ACUMULADORES MOURA S/A, 2012).

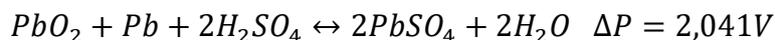
### 3.2.2. Baterias de chumbo-ácido

Uma bateria consiste em um conjunto de geradores que utiliza as reações eletroquímicas possíveis de serem eletricamente invertidas. Logo, esse fato significa que os seus reagentes químicos podem ser reconvertidos até quantidades muito próximas às iniciais por intermédio da passagem de uma corrente elétrica que flui no seu interior. Por isso, estas baterias podem ser recarregadas, tendo assim ciclos de vida longos.

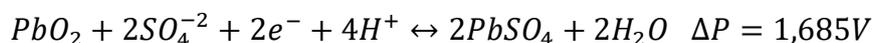
Dessa forma, as baterias de chumbo-ácido, que são acumuladores elétricos recarregáveis, possuem a composição básica de: chumbo, ácido sulfúrico e materiais plásticos. O chumbo está presente na forma de chumbo metálico, ligas de chumbo, dióxido de chumbo e sulfato de chumbo. O ácido sulfúrico se encontra na forma de solução aquosa com concentrações variando de 27% a 37% em volume.

Nesse tipo de acumulador de chumbo-ácido, a reação eletroquímica de redução produz sulfato de chumbo, a partir de dióxido de chumbo, e a reação de oxidação que envolve a conversão do chumbo em sulfato de chumbo. Desse modo, o funcionamento desse tipo de bateria se baseia na seguinte reação:

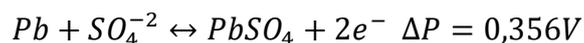
Reação total:



Reação no eletrodo positivo:



Reação no eletrodo negativo



Nas equações acima, a reação direta indica a descarga e a inversa à carga, delta P representa o potencial elétrico da reação (CARNEIRO et al, 2017).

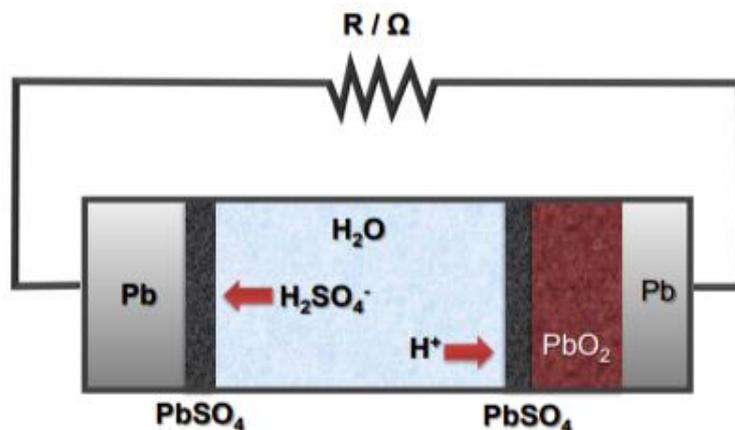
Sendo assim, na bateria existe um ânodo de chumbo e um cátodo de dióxido de chumbo. O ânodo da bateria é a placa negativa de chumbo esponjoso e o cátodo é a placa positiva de dióxido de chumbo.

Após serem submersas as placas positiva e negativa, na solução de ácido sulfúrico, obtém-se como resultado, a geração de uma tensão de, aproximadamente, 2,1 V. Dessa forma, ao se conectar com um circuito elétrico, surge uma corrente elétrica e, após a descarga estes elementos, podem retornar às condições iniciais mediante uma recarga fazendo circular uma corrente elétrica no sentido contrário ao da descarga (YANG, 2014).

À medida que a energia elétrica se esgota, a tensão da célula diminui, pois o ácido sulfúrico é consumido para produzir o sulfato de chumbo e no processo de carga, ocorre

a reação inversa. A figura 3 apresenta um modelo de processo de descarga de uma bateria ácido (CARNEIRO et al, 2017).

Figura 3 - Modelo esquemático do processo de descarga de uma bateria ácido.



Fonte: CARNEIRO et al, 2017

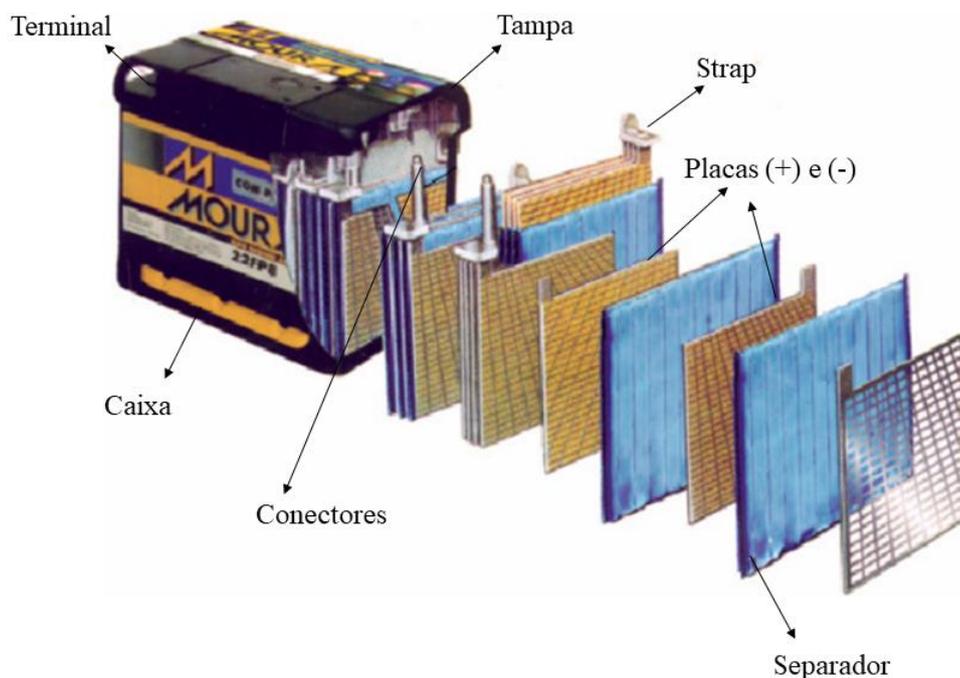
### 3.2.3. Componentes da bateria de chumbo-ácido

Os acumuladores de chumbo ácido são compostos por:

- Placas: As placas são os materiais ativos da bateria. Desse modo, para que seja possível acontecer a reação eletroquímica reversível responsável pelo acúmulo e condução da corrente elétrica, é necessário que tenha o cátodo que é a placa positiva que é de óxido de chumbo ( $PbO$ ) e a placa negativa a de chumbo esponjoso.
- Separadores: são envelopes constituídos de polietileno, cuja principal função é evitar que as placas positivas e negativas adjacentes entrem em contato entre si, evitando o curto-circuito. Além disso, os separadores ajudam a reter a massa que desprende da grade.
- Caixa: As caixas são de polipropileno (PP) com seis células usadas para armazenar os elementos e o eletrólito. Cada célula possui um elemento individual formado por placas positivas e negativas, e estes elementos são isolados do elemento adjacente pela parede plástica.
- Tampa: possui o objetivo de garantir a estanqueidade da bateria. As tampas são do mesmo material da caixa (PP), possuem orifícios para inspeção visual do interior da bateria e para os postes.
- Conectores: tem como função proporcionar a interligação dos elementos da bateria para formação do circuito.

- Terminais: possibilitam a interligação da bateria ao circuito externo, do automóvel.
- *Straps*: é responsável pela união em paralelo das placas da mesma polaridade.
- Solução: a solução na bateria de chumbo-ácido é indispensável para que ocorra as reações eletroquímicas. A solução usada nesse tipo de bateria é a de ácido sulfúrico, a qual garante uma boa condutividade de íons e é parte integral nas reações que ocorrem durante o processo de carga e descarga. A solução é feita de ácido sulfúrico e água.

Figura 4 - Representação dos componentes da Bateria de Chumbo-Ácido.



Fonte: Acumuladores Moura S.A, adaptado pelo autor.

#### 3.2.4. Processo produtivo da bateria

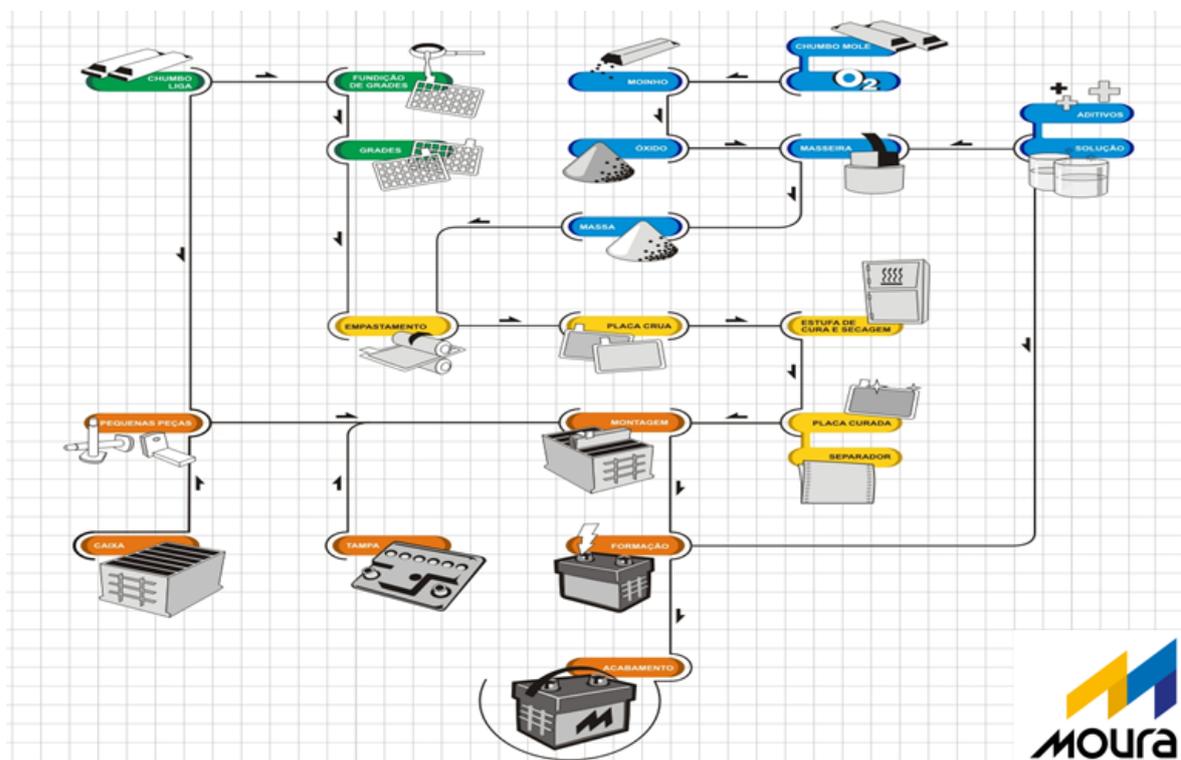
As características desejáveis para uma bateria dependem da sua aplicação. Para uma bateria automotiva, a função principal é a de fornecer a alta corrente elétrica por um curto período (vários segundos ou mesmo alguns minutos) necessária para que o motor de partida possa girar o motor de combustão do veículo e dar início ao funcionamento dele. Além disso, o acumulador fornece eletricidade para que diversos dispositivos elétricos funcionem, mesmo com o motor desligado. O acumulador de um automóvel

deve ser capaz de operar em condições diversas de temperatura, além de poder operar sem necessidade de manutenção contínua, e idealmente deve dispensar qualquer manutenção (FLAMARION, 1993).

Por questões comerciais, é de extrema importante que uma bateria de chumbo-ácido se mantenha em estado de carga por alguns meses, para que não haja necessidade de recarga frequente durante a armazenagem em depósitos.

Portanto, devido à necessidade de manter as características nas baterias de chumbo ácido, a sua produção é de extrema importância para atender esses requisitos, e seu processo produtivo vai ser descrito no presente trabalho. Abaixo segue seu fluxograma de produção para baterias de chumbo-ácido:

Figura 5 - Fluxograma de produção de baterias chumbo-ácido.



Fonte: Acumuladores Moura S.A, adaptada pelo autor.

#### 3.2.4.1. Produção de óxido de chumbo

De acordo com o fluxograma de produção das baterias (Figura 5), existem dois pontos iniciais na produção do acumulador: uma parte do chumbo mole e outro com o chumbo de liga. A partir do chumbo mole é feito o óxido de chumbo que é produzido nos moinhos.

O óxido de chumbo é o principal composto nos eletrodos positivo e negativo. Ele é produzido utilizando como matéria prima chumbo mole que segue para os moinhos, podendo ser produzido por dois processos diferentes o de Barton e o de Atrito. No moinho de atrito, o chumbo é adicionado em pedaços dentro do moinho. O choque entre os diversos pedaços gera calor e provoca a quebra do chumbo em partes cada vez menores. Durante esse processo, o chumbo vai se oxidando. Já o óxido de Barton é produzido em um reator, onde o chumbo fundido é adicionado e misturado dentro do reator, continuamente.

Desse modo, o pó de chumbo produzido pelos moinhos é uma mistura de chumbo livre (Pb) com óxido de chumbo (PbO), e ambos os processos de produção irão produzir partículas que podem ter de 20 a 30 % em massa de chumbo livre (PALMER, 2008).

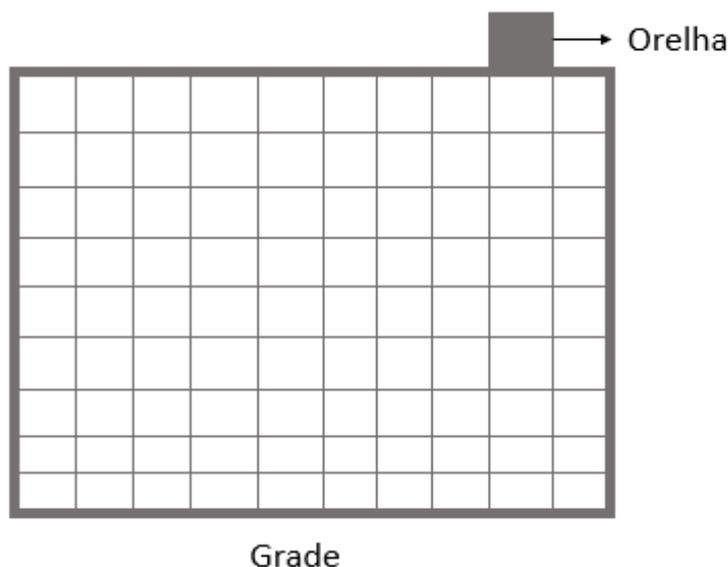
#### 3.2.4.2. Produção das grades

Como já citado, existem dois pontos iniciais para a produção dos acumuladores de energia de chumbo ácido:

- Utilizando o chumbo mole, para produzir o pó de óxido de chumbo;
- Utilizando o chumbo de liga, para produzir as grades e as pequenas peças que compõem a bateria.

As grades de chumbo, que são produzidas pelo chumbo de liga, possuem a função de suporte mecânico e condução de eletricidade. O chumbo de liga é utilizado para a sua produção, pois permite uma processabilidade não encontrada no chumbo puro. Ao se introduzir elementos de liga, as propriedades físicas e químicas do chumbo são alteradas. Principalmente, devem ser consideradas as alterações em suas propriedades mecânicas, para garantir boa processabilidade ao mesmo tempo que boa rigidez, sua resistência à corrosão, e sua influência no consumo de água do acumulador (FLAMARION, 1993).

Figura 6 - Representação da grade de chumbo utilizada nas placas da bateria.



Fonte: Autor.

Devido à diferença entre os processos eletroquímicos que ocorrem nas placas positiva e negativa, tem sido muito comum a utilização de diferentes ligas para as diferentes placas. Dessa forma, existem ligas de chumbo com diferentes concentrações de cálcio, estanho, prata, antimônio, arsênio e selênio (FLAMARION, 1993).

A produção das grades pode ser dividida em dois diferentes métodos: o método de queda do chumbo fundido por gravidade em moldes e o método de produção contínua de grades. No primeiro método, a liga fundida é manualmente ou automaticamente colocada dentro do molde. Este molde consiste em duas metades com a imagem gravada da grade, o qual está fechado, para remover ou ejetar a grade. O preenchimento da grade ocorre por gravidade. Os moldes são equipados com sistemas de aquecimento e ventilação (PAVLOV, 2011).

No método de produção contínua de grades, as grades são produzidas e empastadas como uma fita sem fim. Um exemplo de método de produção contínua é o que usa Pb expandido. Neste método, uma folha de Pb enrolada é esticada e expandida para formar uma fita sem fim de grades. Outro método de produção contínua de grades, é o método de fundição contínua para grade (“*Continuous Grid Casting*”). Nele, o metal fundido é colocado numa sapata de fundição que desliza sobre um tambor rotatório. A sapata de fundição tem uma forma adaptada ao contorno da superfície do tambor e é levemente

pressionada contra o tambor. Cavidades são cortadas na superfície do tambor que formam a imagem da grade. Essas cavidades são preenchidas com Pb líquido, fornecido pela sapata de fundição. O sistema de resfriamento na sapata de fundição leva a uma rápida solidificação do Pb nas cavidades (PAVLOV, 2011).

#### 3.2.4.3. Produção da massa

A produção da massa é realizada nas masseiras, que são misturadores que vão receber a adição do óxido, ácido, água e aditivos, com o principal intuito de produzir a massa para o empaste das grades e, assim, obter as placas.

A partir do óxido é que se produz as massas positiva e negativa que são empastadas às grades. As massas positiva e negativa se diferem em sua produção pela exceção de alguns aditivos. Desse modo, o preparo das duas massas possui em comum a adição do óxido, solução de ácido sulfúrico, água e fibra. A função da fibra é de dar consistência mecânica para evitar queda de massa após o empastamento. O ácido sulfúrico irá reagir com óxido e produzir sulfatos de chumbo. A função da água é basicamente garantir a plasticidade, densidade e a umidade de massas necessárias para um bom empastamento e cura nas etapas subsequentes, mas exerce também influência sobre o tipo de sulfato formado. O comportamento físico desta massa, quando submetido a estresses e o comportamento químico durante os processos de secagem e cura, ainda são objeto de estudo para melhorar a eficiência das baterias chumbo-ácido (FLAMARION, 1993).

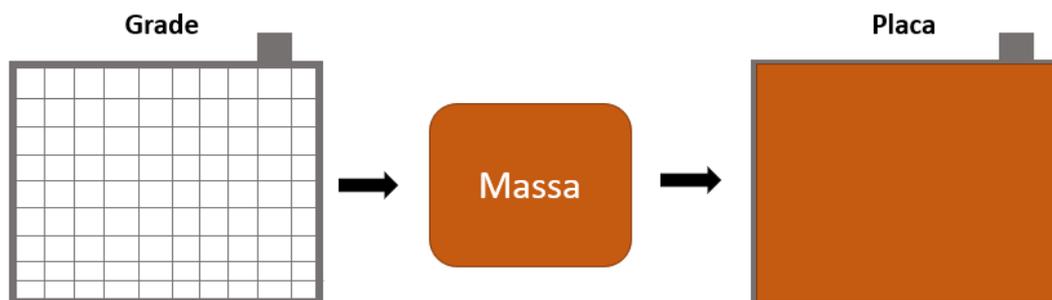
A composição da massa é dependente de alguns fatores, são eles: quantidade de ácido sulfúrico, temperatura, aditivos e tempo de mistura. Na masseira, ocorre o processo de formação de estrutura cristalinas, as quais são importantes e possuem um papel fundamental no desempenho e vida da bateria.

Dessa forma, massas preparadas a temperaturas inferiores a 60°C e com 10% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> contém na sua maioria cristais tribásicos (3PbO·PbSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O), as massas com 8 a 12% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> contém cristais monobásico (PbO·PbSO<sub>4</sub>). O material ativo obtido por uma massa produzida com 0% de teor de sulfato tem uma capacidade muito baixa, independente da temperatura usada para sua produção. O material ativo com predominância de cristais tetrabásicos (4PbO·PbSO<sub>4</sub>) têm um ciclo de vida maior, porém a sua capacidade inicial é menor do que o valor nominal. Já os cristais tribásicos, dão uma capacidade inicial igual ou muito próxima da inicial, porém elas tendem a ter uma vida menor do que as massas predominantemente tetrabásicas (J. JUNG, 2015).

#### 3.2.4.4. Empaste das grades

Após a produção da massa, esta deve seguir imediatamente para o empastamento, pois a massa está sofrendo transformações que irão alterar suas propriedades e deseja-se que estas transformações ocorram somente nas placas já empastadas. A placa da bateria é um conjunto formado pela grade e pela massa, como pode ser observado na figura 7.

Figura 7 - Componentes da placa da bateria de chumbo-ácido.



Fonte: Autor.

O processo de empaste das grades é responsável por cobrir toda a grade com a massa produzida através de máquinas ou até de forma manual. Este processo deve ser feito sobre pressão, devido à alta viscosidade da massa, e feito de um lado da grade ou em ambos os lados (empaste bilateral). Após o empaste da grade, ela segue para o *divider*, onde é cortada em peças individuais chamadas de placa. (PALMER, 2008).

A qualidade do empastamento, sem levar em consideração qualquer problema de maquinário, irá depender da plasticidade e densidade da massa. Portanto, esses dois parâmetros devem ser ajustados para garantir um bom empastamento. É importante que, a massa tenha uma fluidez suficiente para penetrar pela parte inferior da grade. Um bom empastamento resulta em placas uniformes e sem falhas. A uniformidade das placas é importante para a etapa de montagem e para o desempenho da bateria. A quantidade de massa na placa irá determinar seu desempenho elétrico (FLAMARION, 1993).

Após o empaste das placas, elas seguem para o túnel de secagem, o qual possui o principal intuito de realizar uma pré-secagem nas placas, retirando sua umidade superficial. Esta etapa deve garantir que as placas estejam secas o suficiente para evitar que umas fiquem aderindo às outras, e úmidas o suficiente para garantir que as placas sejam curadas adequadamente. O ideal é que as placas estejam secas somente em sua superfície exterior e que retenham a umidade em seu interior.

As placas secas superficialmente, após passar o túnel de secagem, vão para o final de linha e seguem para o processo de cura e secagem das placas.

#### 3.2.4.5. Cura das placas

A cura das placas é um processo crítico na fabricação de baterias e afeta a qualidade, vida útil da bateria e produtividade. O domínio e o conhecimento desse processo químico fazem a diferença para os fabricantes de acumuladores de energia de chumbo-ácido.

O processo de cura compreende fundamentalmente a aderência massa/grade por meio da oxidação da grade, dissolução de pequenas partículas (amorfas), crescimento de cristais, coesão entre as partículas da massa, além da oxidação do chumbo livre presente na massa (PAVLOV, 2011).

As placas entram em estufas que, para poderem proporcionar um bom processo de cura, devem ter temperaturas altas, mas não tão altas para que sequem as placas. Logo, com o intuito de proporcionar a cura das placas sem perder totalmente a sua umidade interna, a umidade relativa do ar dentro da estufa deve permanecer alta durante o processo.

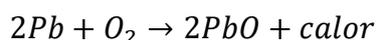
Figura 8 - Principais processos que ocorrem durante a cura da placa.



Fonte: autor.

##### 3.2.4.5.1. Oxidação de Pb livre

No processo da cura, ocorre a transformação do chumbo metálico em óxido de chumbo (PbO). Este processo ocorre através de uma reação fortemente exotérmica:



Durante a preparação da massa, parte do óxido de chumbo reage com o ácido formando sulfatos de óxido básicos. Como o tempo de mistura é curto, somente uma pequena parte do chumbo metálico é oxidado. Logo, uma quantidade significativa, em

trono de 20-30%, de Pb livre permanece na massa. Esse chumbo metálico tem que ser oxidado durante o processo de cura da placa.

Dessa forma, por consequência de a reação de oxidação de chumbo livre ser extremamente exotérmica, o calor liberado é suficiente para dar início ao processo de cura. Logo, é importante que no pó de óxido de chumbo possua uma quantidade de chumbo livre para que haja a liberação de calor, que vai ser suficiente para iniciar a cura, sendo essencial para o processo de cura e contribuindo para um menor gasto energético nas estufas.

Em adição, o calor produzido nessas reações exotérmicas contribuirá para evaporar a água residual do material ativo das placas, precipitando nos poros da pasta como resíduos sólidos os hidratos de chumbo solúvel, que constituirão pontos de união entre os cristais para permitir a livre passagem de corrente elétrica nos ingredientes ativos (FLAMARION, 1993).

Como já citado, para uma boa cura, é importante temperatura e umidade relativa do ar alta. Desse modo, é importante que haja o controle desses parâmetros de processo. Dessa forma, existem estufas que possuem esse controle e, por consequência, da reação de Pb livre ser altamente exotérmica, há a possibilidade de se utilizar estufas sem controle.

Nas estufas que não possuem o controle de umidade e temperatura, elas possuem esses parâmetros altos, por consequência da reação exotérmica, como a reação libera calor faz com que a água presente das placas evapore e, assim, a umidade relativa do ar sobe, favorecendo a cura. Logo, o presente trabalho possui como foco o processo de cura em estufas sem controle.

#### 3.2.4.5.2. Corrosão da grade

A corrosão da grade é um dos mais importantes processos que acontece durante o processo de cura. A corrosão é responsável pela boa adesão da massa ativa a grade. O óxido de chumbo formado pela corrosão da grade é depositado na superfície da grade e cresce para a massa, formando uma forte ligação entre a massa e a grade, o que garante uma forte adesão massa/grade. (PAVLOV, 2011).

- Adesão

A adesão massa/grade é determinada pela força necessária para tirar a massa da grade. Durante as primeiras horas a força de adesão é fraca, o que indica que no início da cura

apenas uma corrosão limitada acontece, porque o processo de corrosão é lento. Quando o processo de oxidação do chumbo acaba, a força de adesão aumenta em quatro vezes, e assim ao final da cura a pasta estará bem aderida a massa.

#### 3.2.4.5.3. Recristalização

Durante o processo de cura de placas, ocorre a recristalização de cristais, processo pelo qual pequenas partículas, na maioria das vezes amorfas, se dissolvem os cristais crescem em tamanho de acordo com a equação de Ostwald-Freundlich. Para que isso aconteça, o teor de umidade da pasta deve estar entre 6 e 11%. Para manter o teor de umidade da placa durante o processo de cura, a umidade relativa (UR) do ar na câmara de cura deve ser mantida a um nível de 100%. O processo de recristalização resulta no aumento da força da massa (PAVLOV, 2011).

O processo de recristalização acontece nas primeiras horas, aumentando lentamente a força da coesão. A recristalização de sulfatos básicos, que ocorre sempre a temperaturas altas na presença reduzida de água contida na pasta.

#### 3.2.4.5.4. Dissolução-precipitação

O início da cura das placas parte dos compostos de chumbo que se dissolvem. E, durante o processo, as placas secam e, então, os compostos dissolvidos se concentram e se precipitam, formando substâncias fortemente ligadas entre os cristais remanescentes na massa. Desta forma, os cristais individuais são interconectados e, portanto, a resistência da massa é melhorada. (PAVLOV, 2011).

As partículas da massa são interligadas através de suas camadas hidratadas ou através dos finos filmes líquidos formados entre elas. Para melhorar a dureza e resistência das placas, elas são submetidas à secagem e visam reduzir a teor de umidade para 0,2-0,1%.

A secagem da massa ocorre em dois estágios: durante o primeiro estágio, a água que enche os capilares é menos fortemente ligada às partículas e evapora primeiro. Grandes poros vazios são formados. Mais adiante a secagem, a água das finas camadas líquidas entre as partículas também evaporam e a placa encolhe. A única fase líquida que permanece na pasta está na forma de anéis, líquido em cunha. Este último é retido pelas forças de superfície. Na segunda etapa de secagem, a água da cunha também evapora, como resultado do que os hidróxidos de chumbo contidos na cunha líquido precipitar entre as partículas e interligá-los em uma massa porosa contínua. (PAVLOV, 2011).

#### 3.2.4.6. Secagem das placas

Após a cura das placas, elas continuam nas estufas e seguem para o processo de secagem. O principal objetivo da secagem das placas é reduzir a umidade das placas o máximo possível para que estas sigam para o processo de montagem. Logo, para que as placas sequem é de extrema importância um ambiente com altas temperaturas e baixa umidade.

#### 3.2.4.7. Montagem da Bateria

Com a placa curada e seca, elas seguem para o processo de montagem. Essa etapa consiste em agrupar as placas negativa e positiva, colocando-se entre elas o separador. É importante que nesse processo não haja distorções geométricas, com o intuito de evitar curto-circuito na bateria. As placas possuem também pontos onde serão feitas as soldas que ligarão os diferentes grupos de placas, chamadas de orelhas ou bandeiras. Essas orelhas devem estar perfeitamente limpas, para garantir uma boa soldagem e, conseqüentemente, um bom contato elétrico e suporte mecânico.

Nesse estágio, as placas estão prontas para serem montadas. Por montagem, entende-se a soldagem das orelhas, colocação dos elementos nas caixas (elementos são grupos alternados de placas positivas e negativas, com separadores entre elas), soldas entre elementos (solda *inter-cell*), e selagem da tampa (FLAMARION, 1993).

#### 3.2.4.8. Formação e acabamento

A formação é onde ocorre a reação eletroquímica que irá alterar a estrutura de ambas as placas positivas e negativas. A placa positiva vai se transformar em dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ) e a placa negativa em chumbo esponjoso (Pb). Nessa etapa, o acumulador será enchido com uma solução de ácido sulfúrico e, então, seus terminais serão ligados a um retificador que irá passar uma corrente elétrica que produzirá as transformações eletroquímicas (FLAMARION, 1993).

Para este processo, é utilizado normalmente uma densidade de eletrólito de  $1240 \text{ g.L}^{-1}$  que resultará, após a formação, em uma densidade de  $1260\text{-}1270 \text{ g.L}^{-1}$  (PALMER, 2008).

Antes da bateria receber energia, é comum na indústria mergulhar as placas em solução de ácido sulfúrico durante 0,5-2 horas, esse processo é conhecido como *soaking time* (PAVLOV, 2011). Neste processo, o óxido de chumbo e os sulfatos básicos reagem e causam a mudança química e morfológica da placa curada (PALMER, 2008).

Após a formação, o acumulador de energia já está carregado e tem a capacidade de dar partida em um carro. Entretanto, antes de entregar a bateria ao cliente, é necessário passar pelo processo de acabamento. O acabamento é o processo em que a bateria passa pelos ajustes finais, como a equalização do eletrólito, colocar o rótulo da bateria e passar por testes que garantam a sua qualidade.

### **3.3. Filosofia *Kaizen***

Uma interessante estratégia adotada por algumas empresas são as ferramentas de melhoria contínua e dentre elas a filosofia *Kaizen*, que possui como principal objetivo a eliminação de desperdícios com base no bom senso, no uso de soluções baratas que se apoiem na motivação e criatividade dos colaboradores para melhorar a prática de seus processos (BRIALES, 2005).

O sistema de produção japonês, tal como é estruturado atualmente, surgiu nos vinte e cinco anos após à Segunda Guerra Mundial, na Toyota Motor. Seu idealizador, Taiichi Ohno, criou o método chamado de Sistema Toyota de Produção (toyotismo). O modelo é considerado um novo formato empresarial designado sob diversas formas, variando em função da ênfase dada por diferentes autores, em determinado aspecto, ou da origem das inovações, como produção de alta performance, fabricação enxuta, produção enxuta, automação flexível, *just in time*, kanban e toyotismo, que são as mais conhecidas. O Sistema Toyota centra-se na produtividade em função dos resultados a serem alcançados, prevê a adoção de uma filosofia básica que evita o desperdício: muda, em japonês, e que promove o melhoramento contínuo: *Kaizen* (CIMBALISTA, 2002).

A filosofia *Kaizen* se popularizou no Japão pelo trabalho do engenheiro Taiichi Ohno, com o intuito de reduzir os desperdícios gerados durante os processos produtivos fabris, prezando sempre pela melhoria contínua do processo e do produto (YASUDA, 1989).

Em japonês, *Kaizen* significa “melhoria contínua”. A melhoria nesse caso envolve todos, desde a gerência até o operacional, e exige relativamente pouca despesa. A filosofia kaizen pressupõe que o nosso modo de vida esteja relacionado a vida profissional, social ou doméstica e em todos esses âmbitos deve-se concentrar esforços de melhoria constante (MASAAKI, 1997).

Mesmo que as melhorias obtidas pelos *kaizens* sejam consideradas pequenas e graduais, o processo kaizen traz resultados significativos ao longo do tempo. O conceito

dessa filosofia explica o motivo pelo qual as empresas não podem permanecer letárgicas por muito tempo no Japão. Já a gestão ocidental está mais conectada com inovação. A inovação é notável. O *kaizen*, por outro lado, geralmente é discreto e sutil. Porém, a inovação é pontual, e seus resultados podem ser problemáticos, visto que o processo de *kaizen*, baseado em abordagens de bom senso e baixo custo, garante o processo gradual que compensa no longo prazo, e é uma abordagem de baixo risco. Os gestores sempre podem retornar ao modo antigo, sem incorrer em grandes custos (MASAAKI, 1997).

Tornar uma organização mais eficaz pressupõe conhecer bem seus processos, seus gargalos e suas pessoas, só então será possível implantar um sistema de gestão com eficiência. Dentre os sistemas mundialmente conhecidos, a filosofia *Kaizen* recebe destaque. Esse fato ocorre porque esta filosofia é pautada na eliminação do desperdício, aplicando soluções baratas, sustentadas na motivação e criatividade dos colaboradores para tornar melhor a execução de suas atividades de rotina (BRIALES, 2005).

Na literatura, seja ela oriental ou ocidental, o significado da palavra *Kaizen* implica em melhorar continuamente. De acordo com Imai (2014), para consolidar a estratégia *Kaizen*, deve-se implementar certos conceitos e sistemas básicos como:

- *Kaizen* e gestão;
- Processos *versus* resultados;
- Seguir os ciclos planejar-executar-verificar-agir (PDCA) e padronizar-executar-verificar-agir (SDCA).
- Colocar a qualidade em primeiro lugar;
- Observar fatos e dados;
- O próximo processo é o cliente.

Para Neagoe e Klein (2009), as sugestões de melhorias são o meio pelo qual todos os funcionários podem contribuir com o desenvolvimento da empresa. Como a filosofia visa melhoria contínua, cada sugestão pode complementar uma ideia sugerida anteriormente e assim proporcionar uma empresa melhor. Quando este fluxo é crescente, ele se torna uma grande força e, é por isso que o *Kaizen* se tornou uma ferramenta de gestão tão poderosa.

Dessa forma, as vantagens e benefícios da filosofia são inúmeras e, quando bem aplicadas e geridas, podem trazer resultados para toda a organização. Bons resultados geram investimento, capacitações e dedicação a causa. O princípio do *Kaizen* é implantar

uma pequena melhoria por vez e visando exclusivamente uma única melhoria por vez com baixo investimento. Entretanto, com o engajamento dos envolvidos, o volume de sugestões será elevado, o que requer da empresa uma preparação financeira e de alocação de pessoas que possuam habilidade para atender a demanda de execução (YASUDA, 1989).

Implementar a filosofia *Kaizen* em uma organização requer um aspecto fundamental para se obter sucesso. É necessário possuir uma estrutura de gestão que possa avaliar as ideias, redirecioná-las caso se faça necessário, capacitar os colaboradores orientando e revisando as propostas para fortalecer a filosofia e a sua importância (NEAGOE; KLEIN, 2009).

### **3.4. Ferramentas de Gestão PDCA**

O ciclo planejar-executar-verificar-agir (PDCA, *Plan, Do, Check, Act*), é uma ferramenta de gestão que possui como principal objetivo melhorar e controlar os processos e produtos de forma contínua. Também conhecido como ciclo de Shewhart ou ciclo de Deming, pois foi apresentado em 1930, por Waltera Shewhart, como um ciclo aplicável sobre a administração da qualidade, mas somente ao longo dos anos 50, através de William Edwards Deming e suas palestras no Japão, que o Ciclo PDCA tornou-se amplamente conhecido no mundo (ALVES, 2015).

Desse modo, o ciclo PDCA é uma ferramenta de gestão que tem como foco auxiliar na solução de problemas e tomada de decisões no ambiente industrial. Esta ferramenta consiste na implementação de um conjunto de etapas sequenciais que vão desde o planejamento do ciclo e a identificação do problema, até a sistematização da solução que deve ser atribuída no caso de reincidência do problema.

O ciclo do PDCA possui etapas cíclicas, ou seja, a última etapa se conecta com a primeira e, assim, continuamente até que o resultado esperado com a adoção do ciclo seja atingido. E, assim, possui atividades planejadas e recorrentes, para melhorar os resultados e/ou atingir as metas estabelecidas, logo, não possui um fim predeterminado. Tem por princípio tornar mais claros e ágeis os processos envolvidos na execução da gestão, identificando as causas dos problemas e as soluções para os mesmos e está dividido em quatro etapas principais:

Figura 9 – Representação do ciclo PDCA.



Fonte: ALVES, 2015.

1) *Plan* (Planejamento): é uma das etapas mais importante do ciclo, tem início com a definição de um plano, baseado em diretrizes ou políticas da empresa. Nesta fase, escolhe-se um processo ou problema a ser sanado. Esta fase, segundo Campos (2004), é subdividida em cinco etapas:

a) *Identificação do problema*: é realizado quando a empresa se depara com um resultado (efeito) indesejado, provindo de um processo (conjunto de causas). O problema é todo e qualquer alteração da condição desejada. Para o direcionamento dos esforços, a identificação deve ser baseada e fundamentada em fatos e dados. Portanto, deve-se analisar o histórico do problema.

b) *Observação*: nesta fase, é de extrema importância a observação ir além dos números e indicadores levantados. Logo, se faz necessário ir ao local onde o problema foi identificado, ouvir os envolvidos, tomar nota de todas as informações coletadas e aplicar a ferramenta do 5W1H (principais perguntas que devem ser feitas e respondidas ao investigar e relatar um fato).

c) *Análise do fenômeno*: análise detalhada do problema detectado e suas características, por meio de fatos e dados coletados.

d) *Análise do processo (causas)*: essa etapa possui o objetivo de levantar as possíveis causas. Deve-se analisar e correlacionar as hipóteses levantadas para checar se há relação entre elas e escolher as mais prováveis com base em fatos e dados.

e) Plano de Ação: é o produto da etapa P (*Plan*). Após observar as causas deve-se definir ações que sejam eficazes na solução do problema. Para um plano de ação mais robusto, é recomendável se guiar pelo 5W1H;

2) Do (Execução): Implementação do plano de ação, executar o processo, fazer o produto. Coletar dados para mapeamento e análise. Esta etapa, segundo Campos (2004), se subdivide em duas:

a) Treinamento: quando o plano é divulgado para todos os envolvidos antes da execução;

b) Execução da ação: quando o plano é executado. Durante essa execução devem ser feitas verificações periódicas a fim de manter o controle e eliminar possíveis dúvidas que possam ocorrer ao longo da execução. Nessa etapa é importante registrar todas as ações mesmo as que não obtiveram o resultado dentro do esperado, com o principal intuito de alimentar a próxima etapa do ciclo PDCA.

3) *Check* (Verificar): é a análise ou verificação dos resultados alcançados e dados coletados. Pode ocorrer concomitantemente com a realização do plano, quando se verifica se o trabalho está sendo feito da forma devida, ou após a execução quando são feitas análises estatísticas dos dados e verificação dos itens de controle. Nesta fase, podem ser detectados erros ou falhas. Caso os resultados negativos persistam, significa que a solução pensada não foi a ideal e deve-se retornar ao processo de observação.

4) *Act* (Padronizar e agir): A última fase do PDCA é a da realização das padronizações das alterações de processo realizadas. Esta é a etapa que se dedica a perduração do resultado alcançado. Quando os resultados são atingidos e validados, é importante que haja padronização das melhorias implantadas através de documentos da própria organização que sirvam para formalizar o novo padrão estabelecido. Após a criação ou alteração dos padrões, o passo seguinte é a capacitação dos envolvidos e, por fim, acompanhar a execução dos novos padrões. No entanto, essa etapa também pode ser utilizada para a realização das ações corretivas, ou seja, a correção das falhas encontradas no passo anterior e sugestões para um próximo ciclo PDCA.

Para auxiliar o método, são utilizadas ferramentas de acordo com a complexidade do problema que variam de ferramentas básicas até avançadas. Deste modo, é possível utilizar a ferramentas como: Ishikawa, Análise dos 5 porquês, 5G, 5W1H e demais

ferramentas que fundamentam uma melhor análise e definição da causa raiz para a solução do problema.

### 3.5. Corrosão/Oxidação

Pela literatura, corrosão é definido como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos. Essa deterioração oriunda da interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso (GENTIL, 2011).

Sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, ela está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e o desempenho deles deixam de atender a sua finalidade original. No seu todo, esse fenômeno é de extrema importância na vida moderna, que não pode prescindir dos metais e suas ligas (GENTIL, 2011).

Os problemas de corrosão são frequentes e ocorrem nas mais variadas atividades, como por exemplo nas indústrias química, petrolífera, petroquímica, naval, de construção civil, automobilística, nos meios de transportes aéreo, ferroviário, metroviário, marítimo, rodoviário e nos meios de comunicação, como sistemas de telecomunicações, na odontologia (restaurações metálicas, aparelhos de prótese), na medicina (ortopedia) e em obras de arte como monumentos e esculturas (GENTIL, 2011). Dessa forma, é de extrema importância a compreensão do fenômeno de corrosão/oxidação, pois as perdas econômicas que atingem essas atividades são significativas e podem ser classificadas em diretas e indiretas.

Segundo Gentil (2011), são perdas diretas:

- a) Os custos de substituição das peças ou equipamentos que sofreram corrosão, incluindo-se energia e mão de obra;
- b) Os custos e a manutenção dos processos de proteção (proteção catódica, revestimentos metálicos e não metálicos, pinturas etc.).

Já as perdas indiretas são mais difíceis de avaliar, mas é possível totalizar custos mais elevados que as perdas diretas e nem sempre podem ser quantificados. De acordo com Gentil (2011), são perdas indiretas:

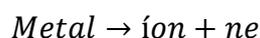
- Paralisações acidentais;
- Perda de produto como perdas de óleo, soluções, gás ou água através de tubulações corroídas até se fazer o reparo;
- Perda de eficiência;
- Contaminação de produtos;
- Superdimensionamento nos projetos.

Além disso, é possível verificar que materiais considerados bastante resistentes à corrosão podem ser facilmente corroídos quando se usa um meio corrosivo específico. Deste modo, ao estudar esse fenômeno sempre tem que levar em consideração o material metálico, o meio corrosivo e as condições de operação (GENTIL, 2011).

A corrosão é, na maioria dos casos, um processo espontâneo, advindo por reações químicas e eletroquímicas que se passam na superfície do metal e obedecem a princípios bem estabelecidos. Logo, a corrosão nos metais acontece como consequência do processo de oxidação.

A oxidação, geralmente, ocorre com a presença de oxigênio, e em materiais diferentes entre si. Essa diferença está relacionada com o potencial de redução, o qual indica a tendência do material em relação à redução e oxidação; quanto maior ou menor for o potencial, maiores as chances de sofrer, respectivamente, redução e oxidação.

Dessa forma, a oxidação é a perda de elétrons por uma espécie química e redução é o ganho de elétrons por uma espécie química. Logo, é possível apresentar a equação geral de oxidação dos metais da seguinte forma:



Em que: “n” corresponde ao número de elétrons perdidos pelo metal, e “e” corresponde aos elétrons.

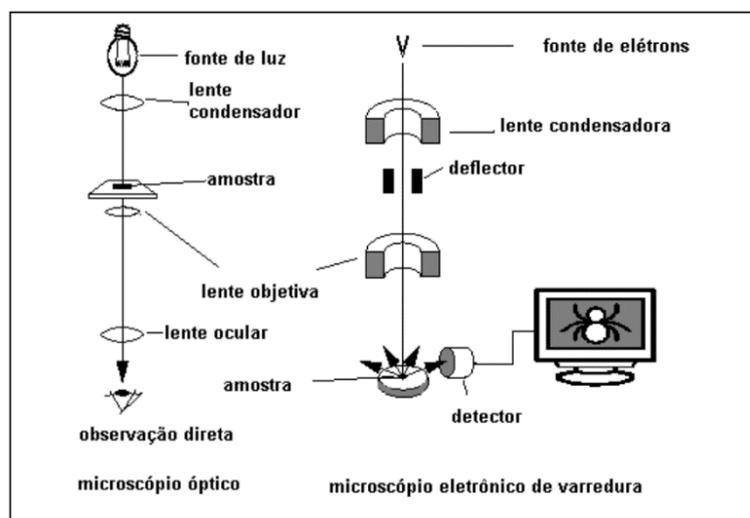
Nas indústrias de baterias de chumbo ácido, em específico no processo de empaste das placas, durante a cura há um ambiente propício a oxidação da massa. Quando não há o devido controle dos parâmetros de temperatura e umidade pode ocorrer a oxidação do chumbo da orelha da placa, causando problemas na solda do *strap* da bateria, podendo ocasionar o desligamento da bateria.

### 3.6. Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é utilizada em diversas áreas, e o uso dessa técnica está cada vez mais frequente, haja vista que pode fornecer informações com detalhes precisos. Essa técnica consegue proporcionar imagens com aumento de até 300.000 vezes (DEDAVID, 2007).

Desse modo, o MEV é um tipo de microscopia que utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional, o que permite solucionar o problema de resolução relacionado com a fonte de luz branca (DEDAVID, 2007).

Figura 10 - Desenho esquemático para comparação entre microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: DEDAVID, 2007.

O MEV possibilita obter rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida. E, assim, a principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas. Valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução de até que 1 nm (NAGATANI et al. 1987).

Outra característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo. Permite, também, o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica (DEDAVID, 2007)

## 4. METODOLOGIA

Esta seção tem como objetivo apresentar a metodologia utilizada para a realização deste trabalho. Em relação ao método científico, Gil (1999) afirma que: “O método científico é conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos adotados para se atingir o conhecimento”. E para o desenvolvimento do presente trabalho foi utilizada a filosofia *Kaizen* associado a metodologia PDCA, visando garantir a melhoria contínua enquanto há redução de gastos e aumento de qualidade/produzividade.

### 4.1. Direcionador

Com base nos relatórios internos da fábrica, é possível observar que, nos dados de retorno de baterias que apresentaram falha, o defeito que tem grande incidência é o de baterias que apresentaram falha na COS (*cast on strap*), que é o processo de solda dos *straps* do elemento. Quando há a análise dos principais fatores que podem gerar esse tipo de defeito o que é mais recorrente é o *strap* negativo com orelha partida e corroída. Os principais fatores que podem gerar essa falha no *strap* são: orelha oxidada, orelha suja e orelha empenada.

Quando foram analisados os dados de não conformidades (NCs) fornecidos pelo Controle de Qualidade da fábrica, tem-se que o defeito de orelha oxidada dentre todas as NCs é o que mais é recorrente, representando aproximadamente 30% de todas as falhas do setor de fabricação de placas da indústria. Com isso, foi verificado a necessidade de observação do problema e assim poder propor uma solução de engenharia para sanar essas recorrências, haja vista a problemática gerada pela oxidação da orelha das placas.

### 4.2. Identificação do problema

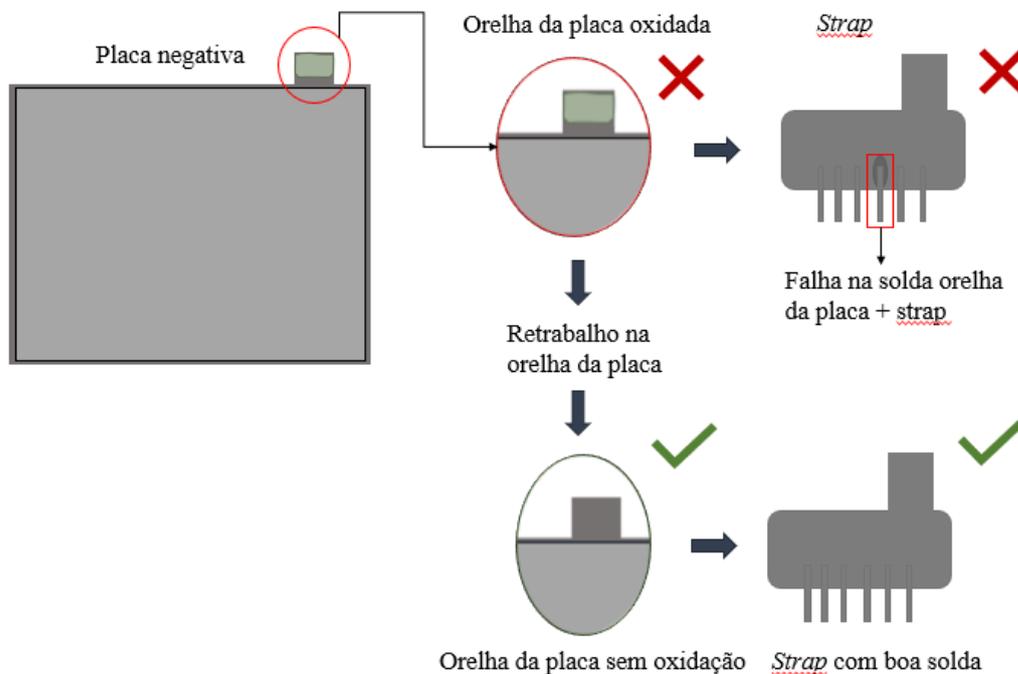
#### 4.2.1. Montagem

As placas possuem pontos onde são feitas as soldas que ligam os diferentes grupos de placas, chamadas de orelhas. Essas orelhas devem estar perfeitamente limpas para garantir uma boa soldagem e, conseqüentemente, um bom contato elétrico e suporte mecânico.

Quando a orelha da placa apresenta oxidação e segue para o processo de montagem da bateria, especificamente no processo de COS, no qual as orelhas das placas são fundidas ao *strap*, caso a orelha não esteja no padrão de qualidade há uma falha na solda do *strap*. No caso das placas que apresentarem oxidação na orelha, é esperado a falha na solda, haja vista que os óxidos possuem uma estabilidade química muito alta,

que é demonstrada pelos seus pontos de fusão, que são muito elevados em comparação com o ponto de fusão do próprio metal ou liga metálica.

Figura 11 - Representação do impacto das placas oxidadas no processo de montagem das baterias.



Fonte: Autor.

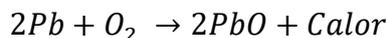
Logo, com a falha na solda do *strap*, pode haver o seu rompimento e assim ocasionar a falha da bateria. Com isso, há a necessidade do retrabalho dessas placas, para que essas placas não cheguem na montagem com esse defeito.

#### 4.2.2. Retrabalho

Para ilustrar as perdas com o retrabalho, foram utilizados valores estimados. Dessa maneira, para retrabalhar as placas que possuem oxidação da orelha, é necessário mais de um operador para retrabalhar um cavalete, que possui em média 7.000 placas. O tempo para terminar o retrabalho em um cavalete é em torno de uma hora e meia. Ressalta-se que, durante um mês são encontradas no inventário de placas na área de retrabalho mais de 2 milhões de placas que apresentaram o defeito de oxidação da orelha, representando em média 80% dos defeitos observados nessa área, gerando uma perda média de mais de R\$ 20.000,00 mensais apenas de retrabalho. Dessa forma, evidenciando a necessidade de solucionar o problema.

#### 4.2.3. Processo produtivo de placas

Como já citado, após o empaste as placas seguem para a estufa para realizar a cura, onde vai ocorrer a adesão massa/grade a partir da reação de oxidação do chumbo metálico. A transformação do chumbo metálico em óxido de chumbo (PbO) ocorre através de uma reação fortemente exotérmica:



Esta reação é a chave para todas as reações de cura, logo a reação é espontânea e se inicia ao final do empaste e continua nas estufas de cura e secagem. As estufas proporcionam o ambiente ideal para o processo de oxidação, haja vista que possuem temperaturas e umidades elevadas o que favorecem a oxidação.

Existem dois tipos de estufas, as controladas e as sem controle. Nas estufas controladas, a temperatura e a umidade do ambiente são controladas com o intuito de controlar a reação de cura, já nas estufas sem controle não há esse controle de temperatura e umidade. Com isso, a umidade e a temperatura do ambiente das estufas sem controle são oriundas da própria reação exotérmica de oxidação, haja vista que as placas saem do empaste com umidade acima de 8% e a reação espontânea de oxidação é exotérmica.

Com isso, o equilíbrio térmico entre a temperatura relativa da estufa e as placas aquecidas pela reação fazem com que a temperatura do ambiente aumente e favoreça com que a umidade relativa do ar aumente devido a evaporação da água que estava presente na massa das placas. Logo, por não possuir um controle há um ambiente propício para ocorrer a oxidação, e que pode favorecer além da oxidação da massa, também a oxidação da orelha. Dessa maneira, são nessas estufas sem controle que ocorre, majoritariamente, o fenômeno de oxidação da orelha das placas e foram estas as escolhidas para realizar o presente trabalho.

#### 4.2.4. Análise das estufas.

Como historicamente as estufas que apresentam de forma majoritária o problema de oxidação são as sem controle, foi realizado um estudo para verificar quais eram as estufas que mais apresentavam cargas oxidadas. Com o auxílio da produção, foi adicionado um checklist (anexo 01) ao processo de cura com o intuito de monitorar o problema, e poder definir qual estufa seria o modelo para a resolução do problema e verificar se há influência da posição dos cavaletes dentro da estufa.

O monitoramento foi iniciado no dia 8 de março de 2022 e os dados foram coletados até o dia 04 de abril de 2022. O monitoramento foi realizado com o intuito de acompanhar as ocorrências de oxidação da orelha da placa por estufa, com o principal objetivo de definir a estufa modelo para realizar as tratativas e possibilitar que no futuro seja possível replicar as ações nessa estufa para as outras.

#### 4.2.5. Estufa teste

A corrosão é um processo em que há um ataque que provoca a perda e a degradação de material, que pode ser provocado pela atmosfera a que são submetidos ou em meio químico, líquido ou gasoso. As reações químicas entre os elementos metálicos e os não-metálicos resultam na mudança dos metais em vários compostos químicos, os mais frequentes são os óxidos e os sais. A velocidade de ataque da corrosão no metal está diretamente ligada com o tipo de metal ou à liga metálica e à atmosfera em que está sujeito (CHIAVERINI, 1998).

Logo, por consequência das placas que curam em estufas não controladas estarem em um meio altamente corrosivo e sem controle, faz com que existem vários fatores que possam estar provocando além da reação esperada da cura (oxidação massa/grade), a oxidação da orelha.

Em outras tratativas realizadas com o objetivo de sanar o problema na fábrica, para tentar solucionar esse problema crônico de oxidação da orelha, o método utilizado foi observar o problema e, em seguida, realizar testes diretamente nas estufas industriais que apresentaram a problemática.

No presente trabalho, primeiramente foi realizado um brainstorm para verificar quais variáveis poderiam influenciar no problema, como ilustrado na tabela 1. Após o brainstorm, foi possível verificar que inúmeros fatores no processo de empaste poderiam contribuir para que acontecesse a oxidação da orelha da placa.

Tabela 1 - Brainstorm das possíveis causas do problema de oxidação.

Item	Causa
1.	Falta de controle da Umidade
2.	Falta de condições básicas das estufas

3.	Comunicação entre as estufas
4.	Composição da liga
5.	Composição do cavalete
6.	Tempo para encher a estufa
7.	Tempo do processo de cura
8.	Umidade das placas no final de linha
9.	Concentração do óleo fluxo

Fonte: autor.

Desse modo, como há inúmeros fatores que podem favorecer o processo de oxidação das orelhas, ao invés de atuar de forma direta nas estufas industriais, foi utilizada uma estufa protótipo que simula uma industrial. Com esse método, foi possível realizar inúmeros testes, analisando as variáveis de forma individual, além de proporcionar os testes sem que houvesse perda significativa de produção.

#### 4.2.6. Prototipagem

Tendo em vista o número de variáveis que podem favorecer o problema de oxidação, foi necessário utilizar a estufa de teste para analisar de forma individual as possíveis causas e, assim, poder encontrar uma solução.

Com isso, o primeiro passo foi utilizar a estufa teste, que possui controle de umidade, temperatura e recirculação de ar e realizar um planejamento experimental para tentar encontrar os parâmetros que simule um ambiente altamente corrosivo, no qual qualquer lote de placa que entre dentro dessa estufa oxide a orelha. E, assim, poder obter um ambiente que é possível observar o fenômeno de oxidação e analisar de forma individual a influência dos fatores levantados pelo Brainstorm.

Para realizar o planejamento experimental, foi utilizado o programa minitab, a ferramenta *Design of Experiments* (DOE). Para montar o planejamento experimental foram considerados os seguintes parâmetros de controle da estufa: umidade, temperatura e recirculação do ar e, assim, foi possível obter o planejamento ilustrado pela tabela 2.

Tabela 2 - Planejamento fatorial completo de 3 níveis para os parâmetros da estufa.

Experimento	Umidade Relativa	Temperatura	Recirculação do ar
1	-1	1	1
2	1	-1	-1
3	-1	-1	-1
4	-1	-1	1
5	1	-1	1
6	1	1	-1
7	1	1	1
8	-1	1	-1

Fonte: autor

O planejamento experimental acima é um planejamento fatorial completo de 3 níveis, onde “-1” representa o menor valor do parâmetro e “1” representa o maior valor do parâmetro. Para a umidade relativa da estufa: (-1) representa 75% de umidade e (1) 96% de umidade da estufa. Para a temperatura relativa do ar da estufa: (-1) representa 30 °C e (1) representa 50 °C. Para a recirculação do ar na estufa: (-1) representa 25 Hz e (1) 35 Hz. Com isso, foi possível realizar os seguintes experimentos.

Tabela 3 - Planejamento fatorial completo de 3 níveis para os parâmetros da estufa (em %, °C e Hz).

Experimento	Umidade Relativa (%)	Temperatura (°C)	Recirculação do ar (Hz)
1	75	50	35
2	96	30	25
3	75	30	25
4	75	30	35
5	96	30	35
6	96	50	25
7	96	50	35
8	75	50	25

Fonte: autor.

Com os experimentos realizados, foi possível obter os parâmetros que proporcionaram um ambiente, no qual qualquer placa que entrasse na estufa para curar iria oxidar também a orelha. Com isso, os parâmetros da estufa que favoreceram a oxidação da orelha foram temperatura e umidade alta. O experimento que proporcionou a oxidação de 100% dos testes foi o experimento 6, com umidade relativa de 96%, temperatura de 50 °C e recirculação de 25 Hz. Esses parâmetros foram os utilizados em todos os testes de verificação.

#### 4.2.7. Composição da liga.

Atualmente, existem inúmeros tipos de grade e de massa, e isso varia de acordo com o tipo de bateria, para cada tipo de acumulador elétrico vai necessitar de um tipo específico de placa positiva e negativa. Com isso, foi levantado a hipótese no *brainstorm* que a composição da liga da grade poderia influenciar na oxidação da orelha da grade, pois existem placas com diferentes grades e a composição muda de acordo com o tipo de placa.

Para verificar se a composição das ligas das grades teria ou não influência, foram levadas amostras da mesma placa, porém de lotes diferentes para análise de composição da liga, utilizando um espectrômetro de via sólida. Essas análises foram realizadas no laboratório da fábrica.

Os testes foram feitos em um lote que havia apresentado oxidação e o outro lote não havia. Também foram levadas amostras de um mesmo cavalete que apresentou placas com orelha oxidada e placas com a orelha sem apresentar oxidação, e assim poder verificar se a composição da liga era ou não a mesma.

Além disso, foram realizados testes de uma mesma bobina de chumbo, usada para fazer grades, que apresentou oxidação em algumas partes.

Com o ambiente propício a oxidação criado na estufa de teste, foi possível fazer inúmeros testes com diferentes tipos de placas, os quais as ligas eram diferentes em sua composição. E, assim, observar se havia tipos de ligas que quando expostos a esse ambiente eram ou não mais propícios a oxidação. E, também, observar a influência dos aditivos na grade no fenômeno de oxidação.

#### 4.2.8. Composição dos cavaletes.

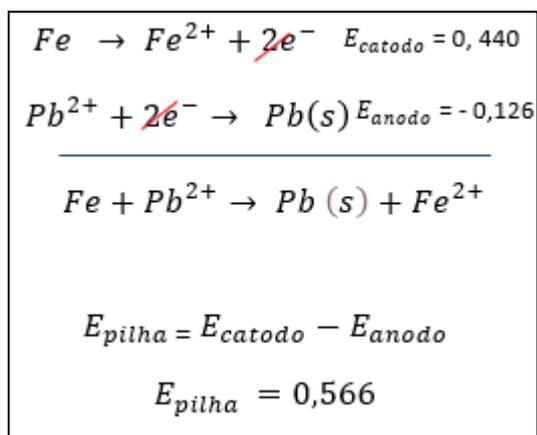
Na empresa, são utilizados dois tipos de cavalete para realizar a movimentação e armazenamento das placas, são eles os cavaletes convencionais que são de aço carbono

1220 (99% de ferro) e os cavaletes com divisórias que possuem divisórias de polipropileno (PP).

Após o processo de empaste das grades, as placas seguem para o cavalete após passarem pelo túnel de secagem e assim elas encostam diretamente nas divisórias dos cavaletes, que podem ser de aço carbono ou então polipropileno. Esse fato fez com que fosse levantado a hipótese de se os cavaletes poderiam ou não ter influência na problemática da oxidação da orelha.

De acordo com a teoria de proteção catódica com anodos de sacrifício ou galvânicos para proteção, tem-se a formação de pilha galvânica na qual o catodo é o material a ser protegido. Observa-se que, em troca da corrosão desses metais tem-se a proteção (GENTIL, 2011). No caso das placas, elas são formadas basicamente de chumbo e óxido de chumbo, e ao final do empaste elas vão para um cavalete de 99% de ferro e seguem para um ambiente propício a oxidação. Tendo em vista que, o chumbo possui um baixo potencial de oxidação comparado ao do ferro, tem-se que na estufa o ferro poderia estar atuando como um metal de sacrifício. O ferro que é o metal mais ativo na tabela de potencial de eletrodo, quando comparado ao chumbo, funcionaria como anodo da pilha galvânica, isto é, cede elétrons, sendo, portanto, corroído e o chumbo estaria atuando como o catodo, e assim pode proporcionar a seguinte reação, ilustrada na figura 12.

Figura 12 - Reação Global de oxirredução entre o Fe e o Pb.



Fonte: autor

Como alguns dos cavaletes de aço carbono apresentam saturação de corrosão e em alguns casos são utilizados os cavaletes com divisórias de polipropileno, foi possível realizar um estudo se de fato os cavaletes estavam atuando para retardar o processo de oxidação das orelhas das placas.

Utilizando a estufa de teste, foi possível realizar inúmeros testes em escala piloto colocando no cavalete de escala piloto uma placa de ferro e uma divisória de polipropileno. Dessa forma, foi possível observar nas condições que proporcionam a oxidação, como as placas reagem na parte que estão encostadas no ferro e no polipropileno e, assim, conseguir simular as duas condições de cavaletes existentes na fábrica.

Foram realizados, também, testes na estufa de escala industrial. Para isso, foi inserido em uma estufa industrial um cavalete de aço carbono lixado pela metade com o intuito de deixá-lo apenas no aço carbono sem oxidação e sem tinta, enquanto o lado não lixado estaria saturado de oxidação e assim poder observar a diferença das placas em cada lado. Outro teste para verificar se de fato os cavaletes estavam agindo como metal de sacrifício, foi medir se existia uma diferença de potencial no sistema cavalete e placas, para isso foi utilizado um multímetro, como o ilustrado na figura 13.

Figura 13 - Multímetro utilizado para os testes.



Fonte: autor

#### 4.2.9. Umidade da estufa.

A ação corrosiva da atmosfera depende fundamentalmente dos fatores: umidade relativa; substâncias poluentes, particulados e gases; temperatura; tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica. (GENTIL, 2009)

A influência da umidade na ação corrosiva da atmosfera é acentuada, pois sabe-se que o ferro em atmosfera de baixa umidade relativa praticamente não sofre corrosão: em umidade relativa em torno de 60% o processo corrosivo é lento, mas acima de 70%

ele é acelerado. A umidade relativa pode ser expressa pela relação entre o teor de vapor d'água encontrado no ar e o teor máximo que pode existir no mesmo, nas condições consideradas ou, então, pela relação entre a pressão parcial de vapor d'água no ar e a pressão de vapor d'água saturado, na mesma temperatura; ela é expressa em porcentagem. (GENTIL, 2009)

Logo, no sistema estufa/placas tem-se que, no processo de cura a umidade relativa do ar chega a valores próximos a 100% de umidade, haja vista que umidade alta é um fator muito importante para garantir uma cura bem-feita. Tendo em vista esse fato, a umidade foi levantada no *brainstorm* como um fator de influência na oxidação da orelha.

Desse modo, foi utilizada a estufa teste para poder fazer prototipagens de curas com diferentes umidades e verificar qual a influência da umidade na oxidação da orelha das placas. Como foi definido, os valores dos parâmetros da estufa que juntos proporcionaram um ambiente em que qualquer placa que entrasse para curar nessa estufa oxidasse as orelhas, foi possível fixar as variáveis de temperatura e recirculação do ar e assim observar diferentes porcentagem de umidade relativa do ar e a sua influência na oxidação das orelhas.

Foram realizados testes utilizando o mesmo tipo de placa para curar com os parâmetros de cura: temperatura da estufa à 50 °C, a recirculação a 25 Hz e o único parâmetro que teve alteração foi a umidade. Foram realizados testes diminuindo a umidade da estufa ao final da cura e, assim, verificar o impacto tanto na cura, quanto na solução do problema.

#### 4.2.10. Microscopia eletrônica de varredura

Com o objetivo de analisar o material presente na orelha oxidada, observando sua morfologia e poder identificar a sua composição química. Para isso, foi feito a microscopia eletrônica de varredura para 2 amostras, uma amostra em que houve oxidação por contato e a outra de um lote de placas que todas as placas oxidaram.

A oxidação por contato de água acontece de forma natural em placas dentro da estufa, que entram em contato com o gotejamento de água (Figura 15), geralmente a primeira placa do molho é acometida por esse processo. Na figura 14, tem-se um exemplo de orelha oxidada pelo ambiente, no qual proporciona a oxidação de todo o lote de placas e não somente a primeira placa.

Figura 14 - lote de placa com a orelha oxidada



Fonte: autor

Figura 15 - Orelha oxidada por gotejamento



Fonte: autor

Dessa forma, foram coletadas 2 amostras no estoque de placas e realizada a microscopia de varredura (MEV). As amostras foram levadas para o Instituto de Tecnologia Edson Mororo Moura, que possui parceria com a Universidade Federal de Pernambuco, que foi o local para onde essas amostras foram levadas para realizar o experimento. O equipamento utilizado foi o Mira 3 da Tescan e os testes foram realizados com uma aceleração de 15 Kv e a distância média de trabalho do equipamento foi de 10 mm.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Composição da liga

Como descrito na metodologia, um dos pontos de investigação da causa raiz do problema de oxidação foi com relação a influência da composição da liga utilizada na placa. Com isso, foram realizados testes, os quais foram descritos abaixo:

- Teste de composição de uma mesma bobina de chumbo que apresentou partes oxidadas;
- Testes de composição em placas do mesmo modelo e lote que apresentaram oxidação e que não apresentaram;
- Utilizando a estufa de teste foi posto para curar placas de modelos diferentes e ligas diferentes para verificar a tendência da liga para oxidar.

#### 5.1.1 Teste de composição da bobina

No processo de expansão das grades, as ligas de chumbo que, a priori, estão embobinadas passam pela máquina pelo processo de expansão até ficar no molde da grade da placa.

Foi encontrada no estoque uma bobina reprovada que apresentou oxidação, logo foi retirada uma amostra da parte que apresentou oxidação e uma amostra da parte que não apresentou oxidação.

Figura 16 - imagem da bobina que apresentou oxidação em algumas partes.



Fonte: autor

Os resultados da composição realizados pela análise do espectrômetro, não apresentaram diferenças significativas entre as amostras (com e sem oxidação). Portanto, evidenciou que a composição da bobina estava homogênea, e que possivelmente, a

composição da liga não influencia de forma direta no processo de oxidação. Porém, é necessário fazer testes de composição para tipos diferentes de ligas e em lotes de placas que oxidaram e não oxidaram para ver se há uma tendência com relação a composição da liga presente na orelha.

#### 5.1.2 Testes de liga em orelhas de placa que curaram na mesma estufa

Tendo em vista o resultado anterior, para realmente comprovar se de fato a composição da liga que compõe a orelha influencia ou não no fenômeno de oxidação da orelha, foi realizado um teste utilizando o espectrômetro para avaliar a orelha de placas do mesmo lote.

Foi observado que, em um mesmo cavalete, foi possível encontrar placas que oxidaram a orelha e placas que não oxidaram. Dessa maneira, para verificar se havia diferença na composição da liga, foram coletadas amostras de orelhas dos molhos de placas que apresentaram oxidação e dos que não apresentaram, com o intuito de observar se havia diferença na composição da liga e, assim, observar a concentração de algum composto que pudesse indicar uma tendência nas placas que oxidaram e se havia diferença na liga com as placas que não oxidaram.

Esse teste foi realizado em 3 lotes de placas diferentes, comparando o mesmo tipo de placa, em que a única diferença foi a presença de oxidação na orelha. Os resultados foram inconclusivos, pois a composição da liga da orelha para as condições de oxidação e não oxidação foram as mesmas. E, assim, indicando fortemente que não há algum composto presente na liga que possa favorecer a oxidação. Dessa forma, a composição da liga, aparentemente não é a causa raiz do problema. Logo para poder concluir se de fato a composição da liga possui influência no problema foram realizados outros testes de liga conforme descritos nos tópicos abaixo.

#### 5.1.3 Teste de composição em ligas diferentes, mas em mesma condição de cura.

Como foi descrito na metodologia, utilizando a estufa de protótipos, foi possível criar um ambiente corrosivo, no qual todas as placas que entram para curar na estufa oxidavam a orelha. Desse modo, foram realizados experimentos utilizando placas de modelos distintos, as quais possuem ligas de grade diferentes e, assim, poder verificar a influência da composição da liga no processo de oxidação.

Para esses testes, foram colocados na estufa dois modelos de placas diferentes e foi observado se ambas oxidavam, ou se alguma não apresentou oxidação mesmo em um

ambiente altamente corrosivo. O teste foi realizado em triplicata e, em todos os testes, foi possível observar a oxidação de todas as placas, independente do modelo. E, assim, fortalecendo a teoria que a composição da liga da grade não possui forte influência no processo de oxidação da orelha.

## 5.2 Composição dos cavaletes

Em estudos anteriores realizado pela empresa, foi constatado que as orelhas das placas oxidavam com mais frequência em cavaletes de divisórias de polipropileno (PP) que em cavaletes de aço carbono (99% ferro). Deste fato, foi levantada a hipótese de que, possivelmente, os cavaletes de aço carbono poderiam estar atuando como metal de sacrifício e, assim, retardando o processo de oxidação das orelhas.

### 5.2.1 Testes realizados na estufa de protótipo para verificar a influência da composição do cavalete.

Utilizando a estufa protótipo e os parâmetros que criaram um ambiente altamente corrosivo, foi utilizado um cavalete de protótipo de divisórias de PP e nesse mesmo cavalete foi colocado uma chapa de ferro, para colocar metade das placas na parte do PP sem contato com o ferro e a outra metade das placas encostadas na placa de ferro, conforme ilustra a figura 17.

Figura 17 - Cavalete de protótipo com divisória de PP e com uma placa de ferro.



Fonte: autor

Com isso, foram realizados sete testes utilizando o mesmo tipo de placa, utilizando parâmetros de cura que proporcionavam a oxidação da orelha, onde quatro molhos de

placas foram colocados na parte da divisória de PP e outros quatro molhos foram colocados em contato da placa de ferro. Durante a cura dessas placas, foram utilizados os parâmetros corrosivos, as placas durante a cura foram acompanhadas de cinco em cinco horas para observar a oxidação.

Durante um certo tempo de cura, foi possível observar que as placas que curaram na parte do PP começaram a apresentar oxidação primeiro que as que estavam encostadas no Fe, esse fato é possível observar na figura 18.

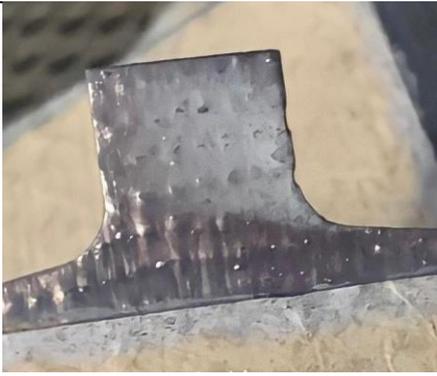
Figura 18 - Diferença da orelha entre as placas que curaram uma encostada no Fe e outra encostada na divisória de PP.



Fonte: Autor.

Entretanto, ao final da cura, foi possível observar que ambas acabaram oxidando, como ilustra na tabela abaixo:

Tabela 4 - Placas no final da cura.

Orelha da placa encostada na divisória de PP.	
---	--

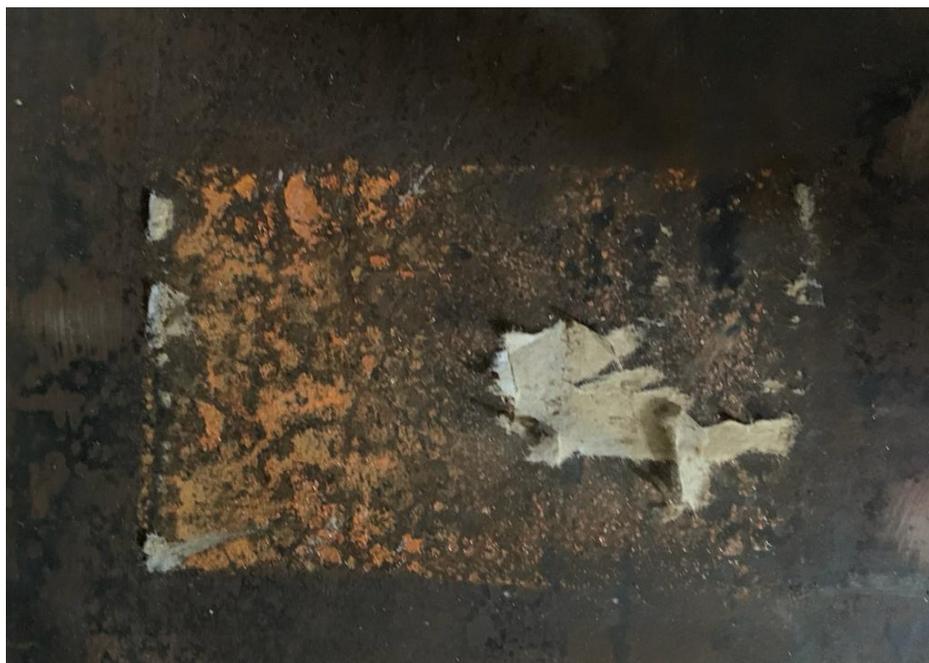
Orelha da placa encostada no Fe.



Fonte: autor.

Como observado na tabela 4, ambas as placas oxidaram, entretanto, as placas que estavam em contato com o Fe oxidaram de forma mais branda. Outra forma de verificar se de fato o Fe estava agindo como metal de sacrifício, foi observar que na placa de ferro a parte onde as placas estavam em contato direto oxidou mais intensamente que o resto da placa, como pode-se observar na figura 19.

Figura 19 - Placa de ferro após o processo de cura.



Fonte: autor.

#### 5.2.2 Testes realizados na estufa industrial verificando a influência da composição do cavalete.

Após os testes em escala de protótipo, foi replicado o que foi observado na estufa de protótipo em escala industrial, com o intuito de verificar se de fato o comportamento

se repete. Portanto, foi selecionado um cavalete de aço-carbono com saturação de oxidação e foi solicitado a manutenção que metade do cavalete fosse lixada para retirar a camada oxidada e a tinta, conforme ilustrado na figura 20.

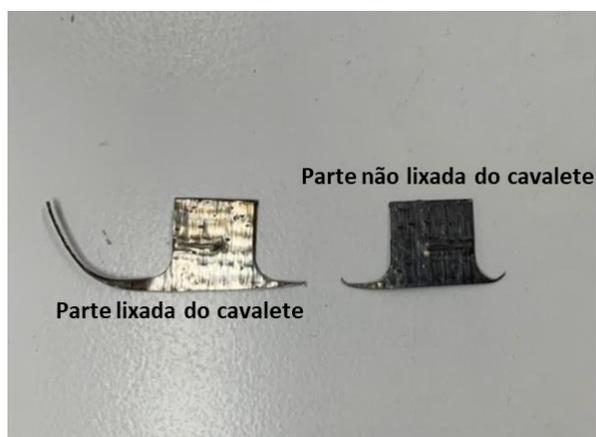
Figura 20 - cavalete modificado para o teste



Fonte: autor.

Na figura 20, o lado direito foi a parte lixada. Após a intervenção da manutenção, o cavalete voltou para a produção e seguiu o processo normal até o final da cura. Ao finalizar a cura, foi retirado esse cavalete e observado se houve diferenças entre as placas que estavam em contato direto do aço carbono e as placas que estavam no lado já saturado de oxidação. As placas que estavam na parte lixada do cavalete não apresentaram nenhum sinal de oxidação, já as placas do lado não lixado apresentaram início de oxidação nas orelhas, como ilustrado na figura 21.

Figura 21 - Comparação das orelhas que curaram em partes diferentes do cavalete.



Fonte: Autor.

Por fim, com o intuito de evidenciar de fato que houve uma reação de oxirredução entre o ferro e a liga de chumbo presente na orelha, foi utilizado um multímetro para verificar se existe uma diferença de potencial entre o molho de placa e o cavalete de aço-carbono. Com isso, foi possível verificar que existe uma diferença de potencial de potencial de 0,49 V, conforme ilustra a figura 22.

Figura 22 - Medição do multímetro da diferença de potencial do molho de placas e do cavalete



Fonte: Autor.

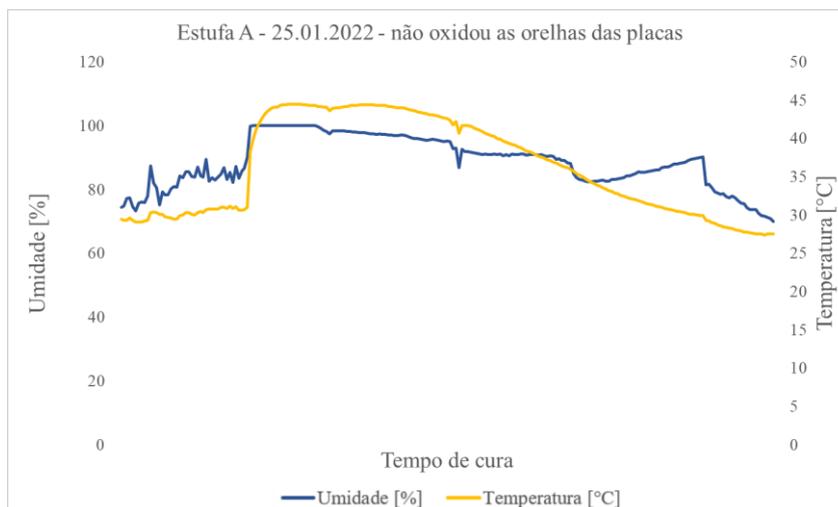
Entretanto, essa diferença de potencial ficou variando entre as medições, acreditou-se que foi por consequência do processo. Logo, o resultado não foi conclusivo, mas evidenciou fortemente que existe uma diferença de potencial.

### **5.3 Umidade da estufa durante o processo de cura.**

Outra variável estudada para verificar a influência no problema de oxidação das orelhas da placa foi a umidade da estufa durante o processo de cura. No início da análise da problemática, foram acompanhadas a temperatura e a umidade relativa do ar das estufas sem controle utilizando um termo-higrômetro, com o intuito de observar as condições do ambiente, quando ocorreria ou não o problema de oxidação.

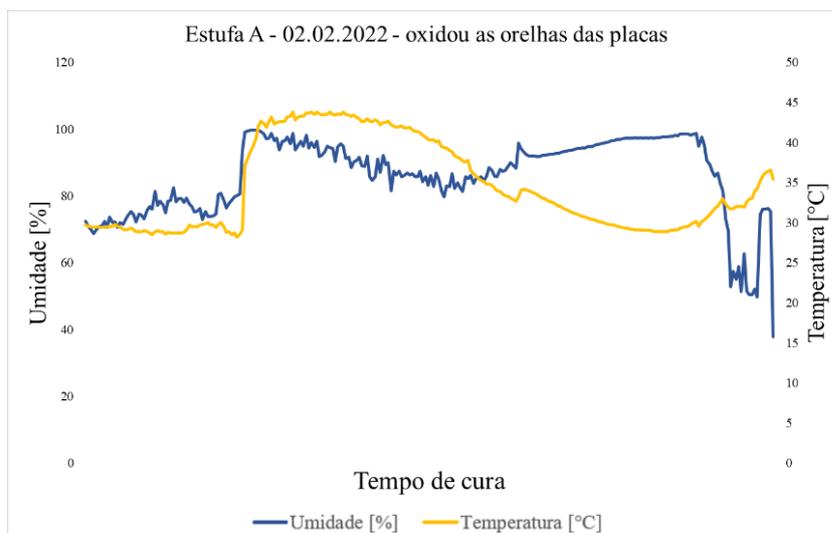
Com essas análises, foi possível observar um padrão, quando a umidade relativa do ar presente na estufa, nas últimas horas de cura, aumentasse acontecia a oxidação da orelha, esse fenômeno é possível de observar na comparação dos gráficos abaixo. Na figura 23, é possível observar que nas últimas horas de cura não houve aumento de umidade e nesse lote não foi observado a problemática. Já no gráfico da figura 24 observou-se um declínio da umidade ao longo do tempo, mas nas últimas horas a umidade voltou a subir e foi nesse caso que o lote de placas oxidou.

Figura 23 - Gráfico de temperatura e umidade relativa do ar da estufa “A” quando não foi observado a oxidação da orelha das placas.



Fonte: autor.

Figura 24 - Gráfico de temperatura e umidade relativa do ar da estufa “A” quando foi observado a oxidação da orelha das placas.



Fonte: autor.

Tendo em vista o padrão da umidade observada quando há a oxidação da orelha nas estufas, o parâmetro estudado foi também a umidade.

Nos gráficos referentes a umidade e temperatura da estufa o eixo X não possui os valores, pois o tempo é sigilo industrial.

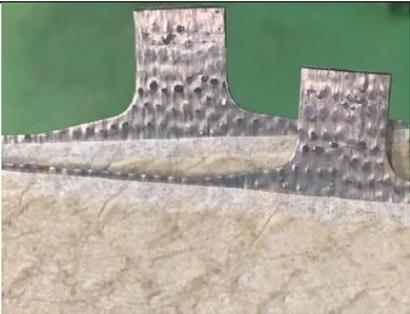
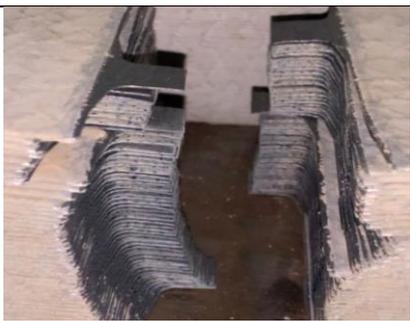
### 5.3.1 Estudo da influência da umidade utilizando a estufa de protótipo.

Como já citado na metodologia, foram realizados testes utilizando a estufa de protótipo com o intuito de conseguir simular um ambiente altamente corrosivo, no qual qualquer tipo de placa que curasse naqueles parâmetros oxidasse. Com o DOE realizado nesse experimento, foi possível verificar que os parâmetros que proporcionam essa problemática são: temperatura e umidade relativa do ar altas.

Durante o processo de validação dos parâmetros, que proporcionavam um ambiente altamente corrosivo, foi observado também como acontecia o processo de oxidação da orelha. Para isso, após um certo tempo de cura a estufa foi aberta de hora em hora com o intuito de verificar se existia um padrão com relação ao tempo que a orelha começava a apresentar oxidação.

Ao realizar esses testes abrindo a estufa de hora em hora, foi possível observar que a oxidação da orelha acontecia de forma muito rápida. Haja vista, que em uma coleta com diferença de uma hora, foi encontrado oxidação em todas as placas e na coleta antecedente nenhuma havia oxidado. Logo, em um intervalo de uma hora, o processo de oxidação acontece de forma rápida, esse padrão foi observado em todos os testes. Consequentemente, foi possível determinar o tempo exato que acontece a oxidação da orelha, ela ocorre em um intervalo de 15 - 25 h de cura. Na tabela 5, é possível observar o que foi explicitado nesse parágrafo.

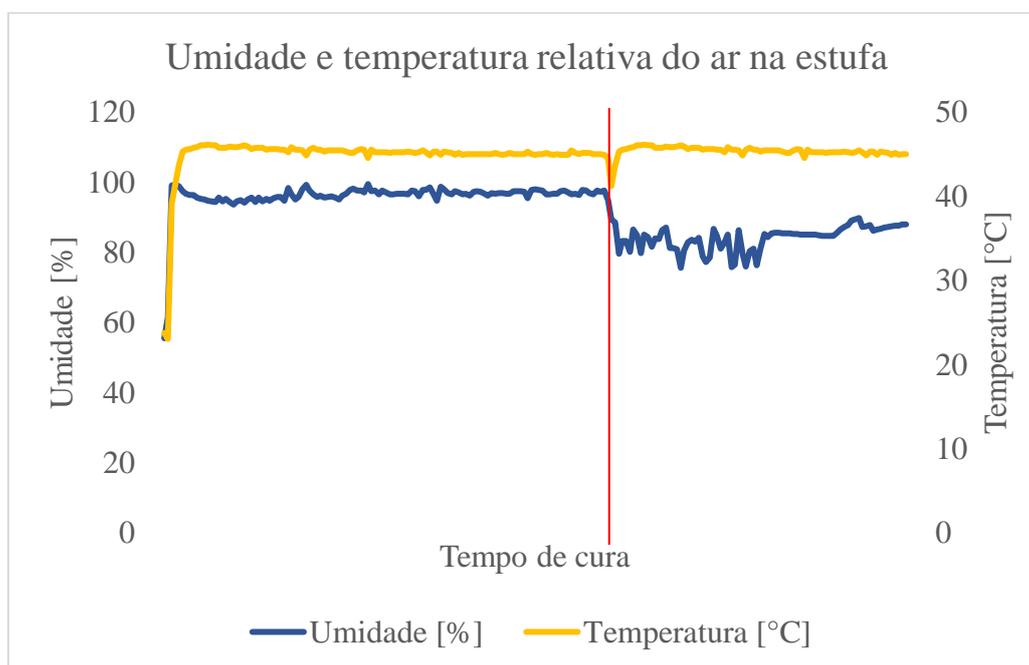
Tabela 5 - Observação da orelha da placa com uma hora de diferença de análise.

<p>Orelha sem apresentar oxidação aparente após um determinado tempo de cura.</p>	
<p>Análise feita uma hora após a última análise (tempo da análise descrita acima + 1 hora).</p>	

Fonte: autor.

Após a observação do tempo que o problema acontece, foi proposto um plano de ação com o intuito de anteceder a oxidação da orelha e assim evitá-la. Com isso, foram realizados testes na estufa de protótipo simulando um exaustor ligado na hora que a orelha oxida, reduzindo a umidade relativa da estufa em 10 – 20 %. Logo, após esse período a umidade relativa da estufa que estava a 95 – 100 % de UR foi reduzida para a faixa de 85 -90 %, conforme mostra a figura 25.

Figura 25 - Dados de temperatura e umidade simulando um exaustor ligado nas últimas horas de cura.



Fonte: autor.

Após repetir esse teste sete vezes, foi possível observar que em nenhuma das vezes houve a oxidação da orelha da placa, mesmo ela curando, inicialmente, em um ambiente altamente corrosivo. Desse modo, pode-se concluir que ao reduzir a umidade no tempo final da cura é possível evitar a oxidação da orelha.

Com essa conclusão obtida na estufa de teste, o próximo passo foi replicar o que foi observado em protótipo em escala industrial. Para isso, foi realizado um estudo com o intuito de verificar qual estufa apresenta maior índice de oxidação de suas cargas.

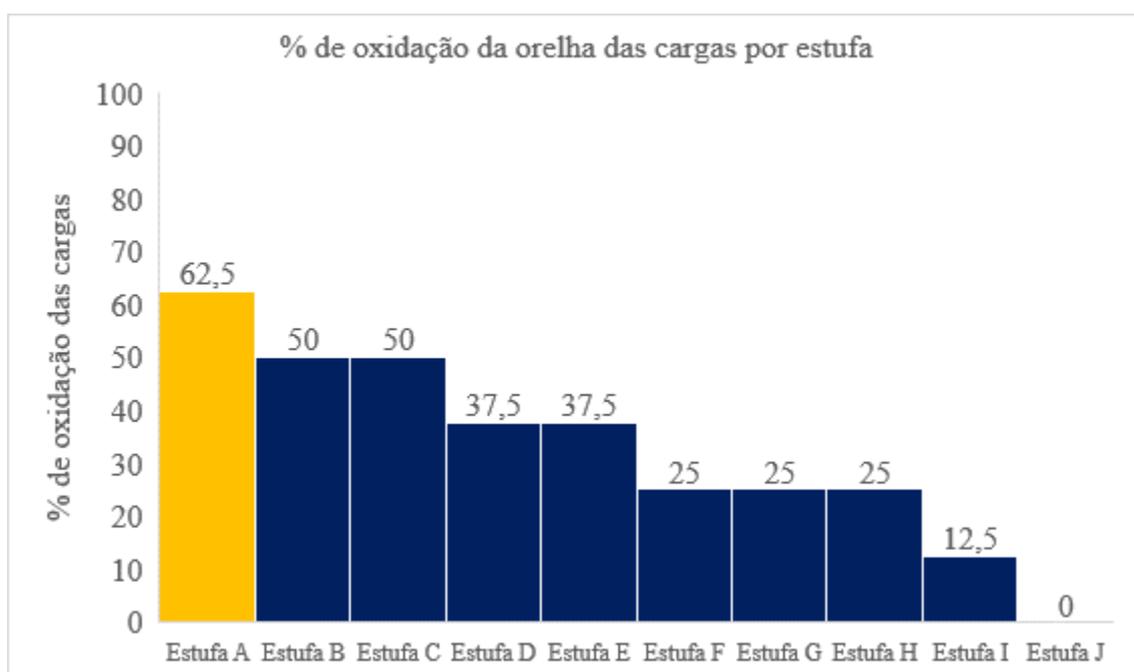
### 5.3.2 Replicação dos ensaios em escala industrial.

O primeiro passo dessa etapa de replicação foi definir qual estufa era a que mais apresentava cargas que oxidavam a orelha. Como, historicamente, as estufas que

apresentam de forma majoritária o problema de oxidação são as sem controle, foi realizado um estudo para verificar quais eram as estufas sem controle que mais apresentavam cargas oxidadas. Com o auxílio da produção foi adicionado um *checklist* (anexo 01) nas estufas sem controle, com o intuito de monitorar o problema, e poder definir qual estufa seria o modelo para a resolução do problema e verificar se há influência da posição dos cavaletes dentro da estufa.

Com esses dados, foi possível observar que a posição dos cavaletes não teve influência na oxidação e definir a estufa modelo para seguir com o presente trabalho. A estufa que mais apresentou cargas oxidadas durante o período analisado foi a estufa “A”. Ela oxidou cerca de 62,5 % das suas cargas durante o período analisado, como apresenta a figura 26.

Figura 26 - Gráfico da incidência de orelha oxidada por carga e por estufa



Fonte: Autor

Com os resultados apresentados na figura 26, a estufa selecionada para realizar a replicação dos testes observados na estufa de protótipo foi a estufa “A”, por apresentar maior índice de oxidação por carga. Portanto, com a ajuda da manutenção, foi reativado um exaustor que já existia, mas que estava desativado. O exaustor ativado era manual, dessa forma para funcionar era necessário que no tempo proposto alguém ligasse de forma manual.

Além de instalar o exaustor, por consequência de a estufa “A” ser conjugada com a estufa “B”, em suas paredes havia furos que as interligavam, como ilustra na figura 27, foi necessário isolá-las.

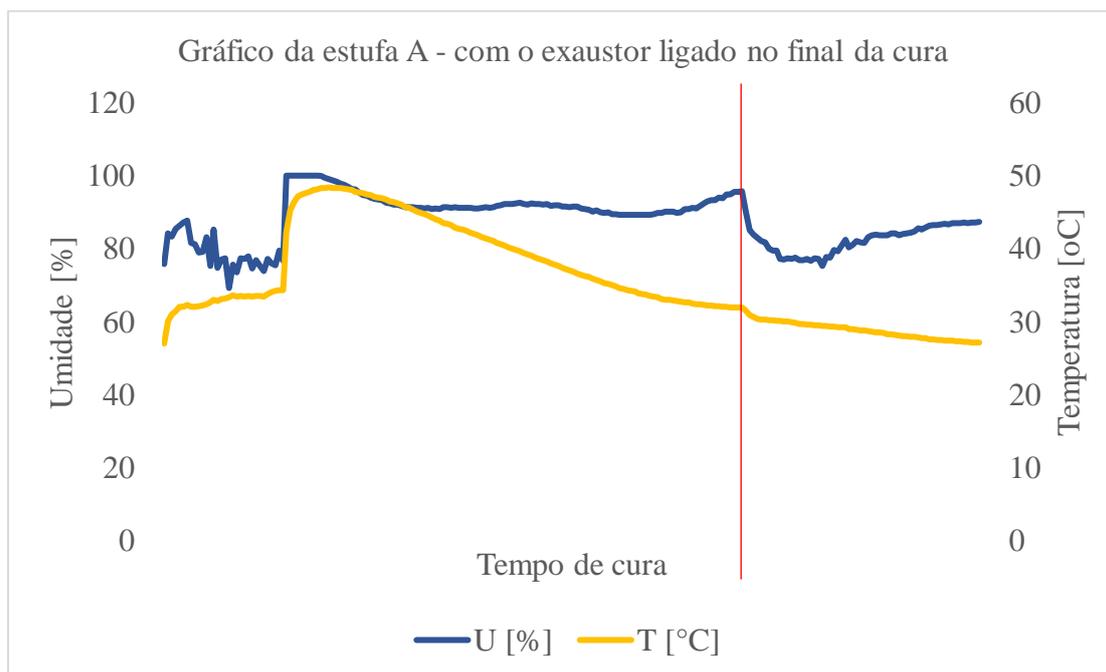
Figura 27 - parede da estufa “A”.



Fonte: autor.

Após isolar a estufa “A” da estufa “B”, para que não houvesse interferência entre as umidades da estufa, foi necessário reativar o exaustor. E assim, foram iniciados os testes baseados nos resultados da estufa de protótipo. Desse modo, foram acompanhadas 11 cargas da estufa “A”, ligando o exaustor de forma manual no mesmo tempo observado nas análises da estufa de protótipos, entre 15 -25 h de cura. Sempre após o processo de cura, foram avaliados todos os cavaletes para verificar se houve oxidação. No gráfico abaixo, tem-se o comportamento de temperatura e da umidade relativa do ar para os experimentos.

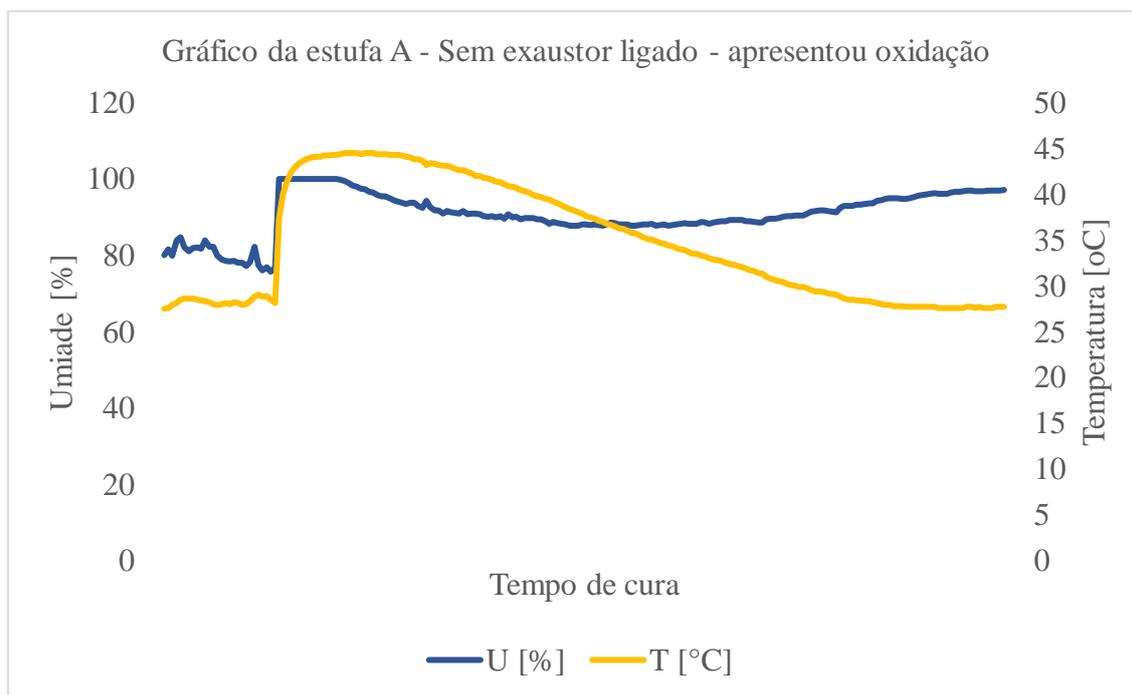
Figura 28 - Gráfico de temperatura e umidade com o exaustor ligado nas últimas horas de cura.



Fonte: autor.

Observa-se que, ao ligar o exaustor nas últimas horas de cura, é possível evitar o efeito da umidade subir novamente e assim poder evitar o problema de oxidação. Das 11 cargas analisadas ligando o exaustor, e acompanhando a umidade e temperatura relativa da estufa ao longo da cura, apenas uma carga apresentou oxidação. Entretanto, ao observar o gráfico de umidade e temperatura da estufa dessa carga que oxidou, foi possível verificar que, por algum motivo, o exaustor não ligou e não retirou a umidade. E, assim, observou-se que no final da cura a umidade voltou a subir, comprovando que quando a UR no final da estufa aumenta ocasiona o processo de oxidação da orelha. Na figura 29 é possível observar a temperatura e a umidade relativa do ar dessa carga que apresentou oxidação.

Figura 29 - Gráfico de temperatura e umidade com sem o exaustor ligado nas últimas horas de cura.



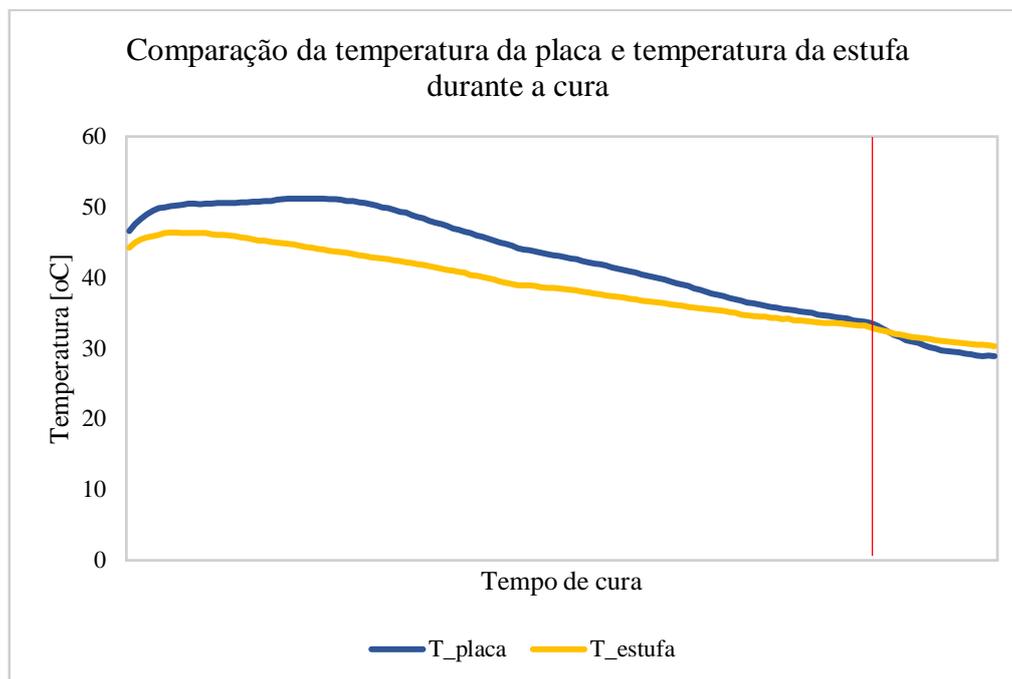
Fonte: autor.

### 5.3.3 Testes de qualidade para a ação proposta.

Para que a ação de reduzir a umidade da estufa ao final da cura se tornasse um padrão para a estufa “A”, foram realizados estudos para verificar se a ação de ligar o exaustor nas horas finais de cura impactassem ou não na qualidade da placa. Desse modo, foram realizados testes de Pb livre em todas as cargas que foi ligado o exaustor. Além disso, foi feito o teste de adesão nas placas para verificar se a ação impactou na adesão massa/grade das placas.

Com relação ao Pb livre presente nas placas, as 11 cargas foram analisadas e nenhuma placa saiu da especificação determinada pela empresa. Além disso, por consequência, de a reação de chumbo livre ser exotérmica, acredita-se que, quando a temperatura da estufa e a temperatura da placa alcançar o equilíbrio térmico, evidencia que a reação já cessou. Logo, foi medido a temperatura da estufa e a da placa para verificar quando havia esse equilíbrio térmico, o resultado está ilustrado na figura 30.

Figura 30 - Gráfico comparativo da temperatura da placa e temperatura da estufa durante o processo de cura



Fonte: autor.

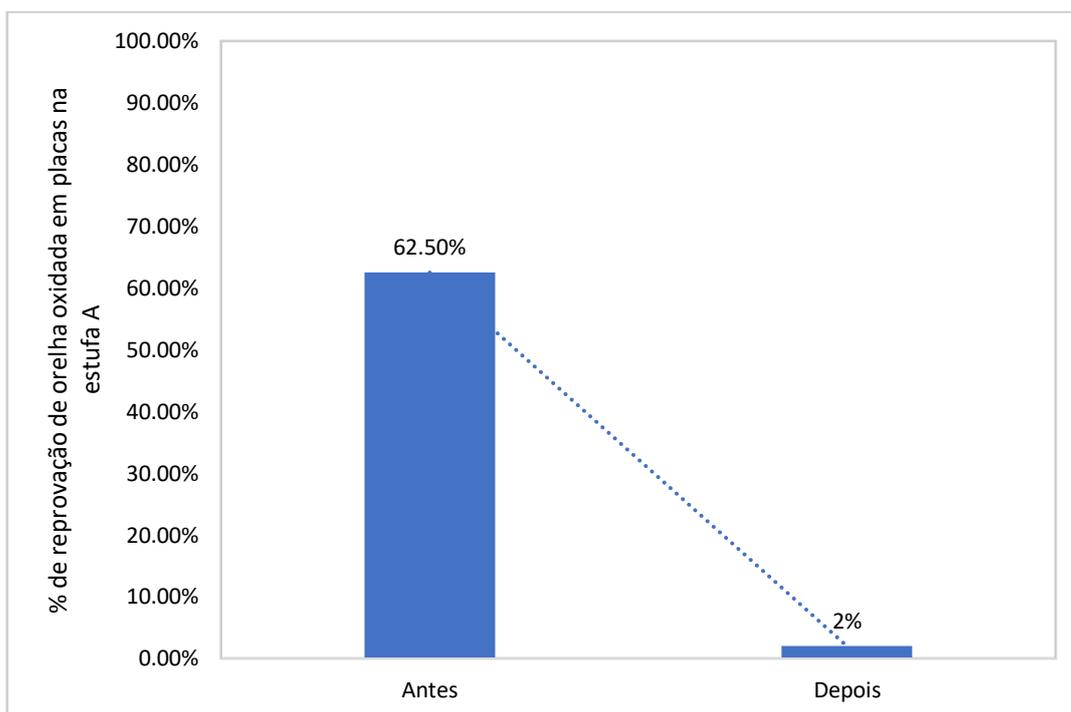
O gráfico ilustra o momento em que houve o equilíbrio térmico entre a placa e a temperatura do ambiente da estufa. Com isso, considera-se que a reação exotérmica de Pb livre encerrou, esse tempo está na mesma faixa que a observada que se inicia o processo de oxidação da orelha, em um intervalo de 15 – 25 h. Com isso, há fortes indícios que quando a reação de oxidação de Pb livre da massa cessa, inicia-se o processo de oxidação do chumbo metálico presente na orelha. Portanto, ligar o exaustor nesse momento não interfere de forma significativa na reação de oxidação do chumbo livre presente na massa e, assim não prejudicando a qualidade da cura da placa.

Além da análise de Pb livre, também foram realizados testes de adesão massa/grade, com o intuito de verificar o quanto de massa desprende da placa ao forçar esse desprendimento em laboratório. Foram realizados testes de adesão nas placas das 11 cargas, e nenhuma placa obteve resultado fora do especificado da empresa. E, assim, evidenciando que ao ligar o exaustor nas horas finais da cura não irá prejudicar a qualidade da placa.

Após garantir que a qualidade da placa não foi alterada com a ação e tendo em vista os resultados apresentados, a solução proposta de diminuir a umidade relativa da

estufa nas horas finais de cura foi acatada pela empresa. E, desse modo, para facilitar o trabalho da produção na estufa “A”, foi adicionado um temporizador que automatizou o processo de ligar o exaustor nas horas finais de cura. Além disso, para a estufa “A” foi feito um documento de instrução operacional padrão para que em todas as cargas o exaustor fosse acionado. Com essa ação, para a estufa “A”, os resultados foram satisfatórios, já que antes 62,5 % das suas curas apresentavam oxidação e após a melhoria apenas 2 % oxidaram, conforme ilustra a figura 31.

Figura 31 - % de carga que oxidava na estufa A antes e pós a implementação do exaustor.



Fonte: Autor.

#### 5.4 Microscopia eletrônica de varredura

Com o objetivo de entender melhor o fenômeno de oxidação da orelha da placa, foram realizados testes de Microscopia Eletrônica de Varredura em orelhas que oxidaram de 2 formas:

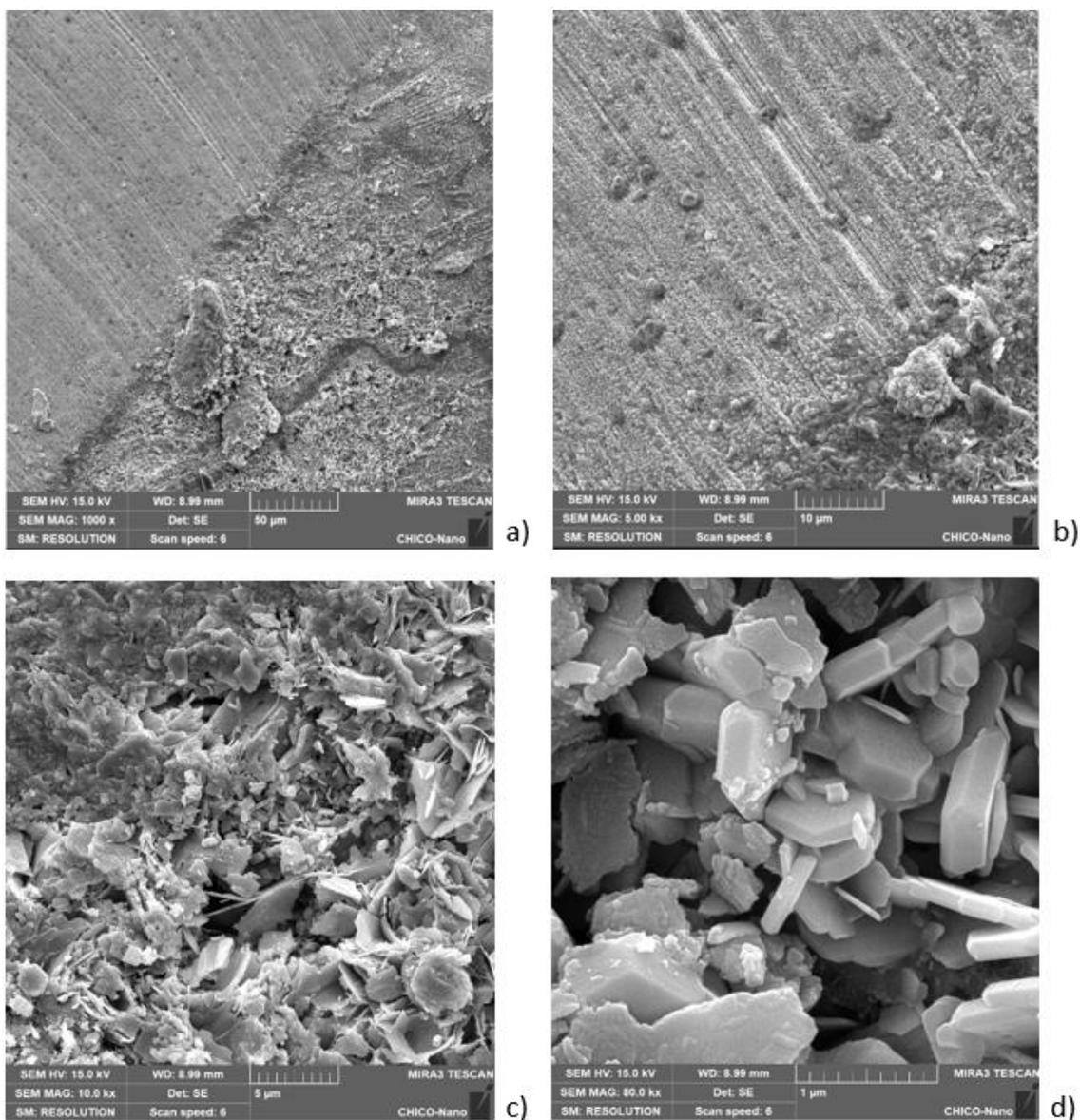
- Oxidação por gotejamento;
- Oxidação da carga de placas na estufa.

Esse teste foi realizado para verificar se havia diferença na composição entre as duas formas de oxidação.

#### 5.4.1 MEV da orelha que oxidou pela estufa.

Abaixo tem-se as imagens obtidas pelo MEV para uma orelha que foi retirada de um lote que todas as placas apresentaram oxidação.

Figura 32 - Resultados do MEV da orelha que oxidou por consequência das condições do ambiente.



Fonte: Autor.

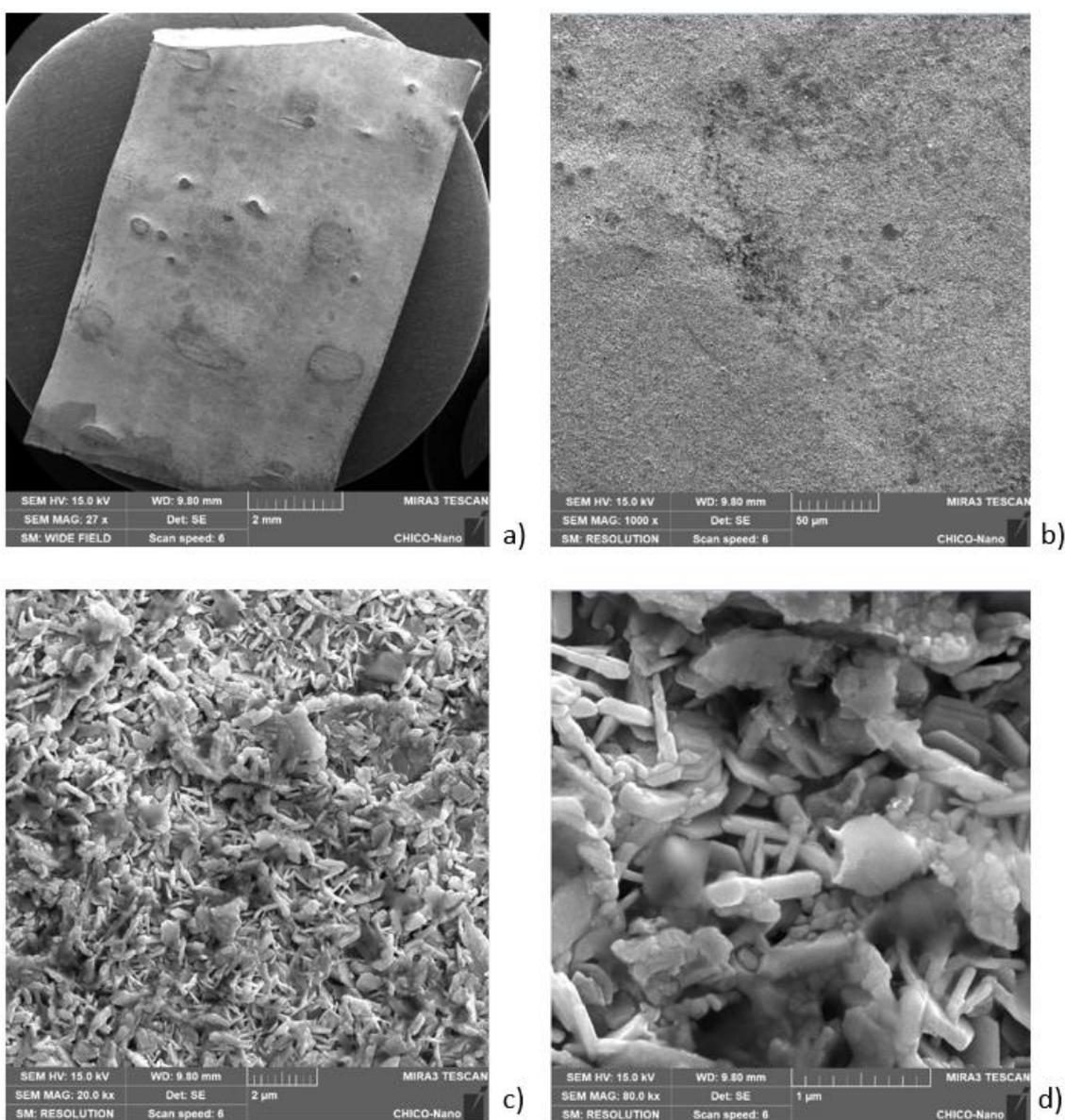
Ao observar a figura 32 (a), é possível verificar que há uma divisão. No lado esquerdo, pode-se assumir que uma parte que não apresentou oxidação e uma parte que apresentou oxidação. Já que no lado direito há, majoritariamente, partículas que possuem um formato parecido com o que é observado em óxido de chumbo, e no lado direito é possível observar uma superfície lisa, representando o metal. A figura 32 (c), é uma ampliação do ponto observado na figura 32 (b), e observando essa aproximação confirma-

se os indícios da presença de óxido na orelha. Na figura 32 (d), que é uma ampliação da figura 32 (c) além de observar a presença do óxido de chumbo, é possível observar cristais definidos em formato de hexágono, essa aparência de cristal é típica do sulfato tribásico de chumbo, podendo assim levantar a hipótese que, provavelmente, essa orelha além de apresentar a oxidação do chumbo metálico estava suja com a massa produzida na masseira, haja vista que esses cristais são encontrados na massa da placa.

#### 5.4.2 MEV da orelha que oxidou por gotejamento.

A seguir, tem-se as imagens obtidas pelo MEV de uma amostra de orelha que oxidou por gotejamento de água dentro da estufa.

Figura 33 - Resultado do MEV da orelha que oxidou por consequência de gotejamento.



Fonte: Autor.

Ao observar os resultados obtido pelo MEV, é possível verificar a presença de óxido de chumbo, evidenciando que a orelha estava com uma camada de óxido de chumbo, o que é esperado em uma orelha de placa que apresenta essa problemática. Diferentemente da análise anterior, não ficou tão claro se havia a presença de cristais de sulfato tribásico de chumbo.

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizado um estudo de caso de um problema que acomete a indústria de baterias, o problema de oxidação da orelha das placas. E, para solucionar o problema, foi realizado um DOE fatorial para poder encontrar os parâmetros que favorecem essa oxidação e a partir dele fazer estudos em escala de protótipo que possibilite estudar as variáveis que possam influenciar o problema de forma isolada.

Foi possível determinar um método de análise, a princípio simulando o problema de oxidação e tratá-lo, inicialmente em escala de protótipo e posterior em escala industrial. Com isso, conclui-se que a composição da liga da grade, aparentemente, não favorece de forma direta a oxidação da orelha da placa. Já com as análises da composição do cavalete evidenciou que há fortes indícios que influencia na problemática. Haja vista que, aparentemente, há influências dos cavaletes de aço carbono estarem atuando como metal de sacrifício para o metal presente na orelha das placas.

Com relação a influência da umidade da estufa ao longo do processo de cura, foi possível concluir que quando a umidade relativa do ar da estufa permanece alta (próximo de 100%) favorece com que a orelha da placa oxide. Logo, instalando um exaustor na estufa sem controle e proporcionando uma redução da UR nas horas finais de cura, obtém-se um resultado satisfatório, primeiro em escala de protótipo e depois em escala industrial. Também, foi verificado que, ligando-se o exaustor durante as últimas horas de cura, poderia haver ou não impacto na qualidade das placas, e após ensaios de Pb livre e adesão foi concluído que, não houve alteração na qualidade das placas. Desse modo, possibilitou a inserção desse passo no processo produtivo de placas da empresa, e assim gerando um alto *saving* para a empresa, já que antes a estufa “A” oxidava 62,5 % das suas cargas, após as mudanças a oxidação da orelha reduziu para 2 % nessa estufa. Dessa maneira, os objetivos do trabalho foram alcançados.

Por fim, com a finalidade de conhecimento sobre o tema, foram realizadas análises de MEV em uma orelha oxidada por gotejamento e outra oxidada pelas condições do ambiente da cura. Com os resultados de MEV foi possível concluir que ambas apresentaram presença de óxido de chumbo e não tinha diferenças significantes entre si.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUMULADORES MOURA S/A.; **Cartilha Moura WCM**. Belo Jardim, 2019.

ACUMULADORES MOURA S/A.; **Grupo Moura Baterias Automotivas**. Belo Jardim, 2012.

ACUMULADORES MOURA S/A. ACUMULADORES MOURA S/A Disponível em: <[www.moura.com.br](http://www.moura.com.br)> Acesso em: 15 de Setembro de 2022.

ALKIN – Químicos Brasil. **Os efeitos e Impactos Econômicos da Corrosão na indústria**, 2021. Disponível em: <https://www.alkim.com.br/post/os-efeitos-e-impactos-econ%C3%B4micos-da-corros%C3%A3o-na-industria> . Acesso em: 08 de outubro de 2022.

BRIALES, A.J. **Melhoria Contínua Através do Kaizen: Estudo de Caso Daimlerchrysler do Brasil** 2005. 156f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão) – Universidade Federal Fluminense, Niterói.

CAMPOS, Vicente Falconi. **Gerenciamento da Rotina do Trabalho do Dia-a-Dia**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2002.

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**. Revista Virtual de Química (RVq), web, Volume 9, número 3, p. 889-911, maio, 2017. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/v9n3a06.pdf> . Acesso em: 20 de outubro de 2022.

CIMBALISTA, Silmara. (2002) - **Toyotismo e o Processo de Motivação e de Incentivo à Inovação nas Organizações**. Análise Conjuntural, v.24, n.3-4, p. 18

DINIZ, FLAMARION. **Acumuladores de Chumbo-Ácido Automotivos**. 2ª ed – 1994.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparação de amostras**. Edição (se houver). Porto Alegre - RS: EDIPUCRS, 2007.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6a Edição. Campinas - SP: Grupo Editorial Nacional (GEN),2011.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1999.

**Grupo Moura: energia pernambucana que ganhou o mundo.** Folha de Pernambuco, Belo Jardim-PE, 01 de abril de 2022. Disponível em: <https://www.folhape.com.br/colunistas/inspiracao-pernambuco/grupo-moura-energia-pernambucana-que-ganhou-o-mundo/30214/>. Acesso em: 04 de outubro de 2022.

H. L. Chan and D. Sutanto, "A New Battery Model for use with Battery Energy Storage Systems and Electric Vehicles Power Systems". Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Vol. 01, pp 470-475, January 2000.

IMAI, Masaaki. **Gemba Kaizen: Uma abordagem de bom senso à estratégia de melhoria.** 5. ed. São Paulo: Instituto IMAM, 1997.

INBEC. **Inibidores de corrosão – Tipos e principais aplicações,** 2019. Disponível em: <https://inbec.com.br/blog/inibidores-corrosao-tiposprincipais-aplicacoes>. Acesso em: 08 de outubro de 2022.

LEÃO, Joab Flavio Araujo. **Estudo de modelagem de baterias de Chumbo-Ácido.** Orientador: Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa. 2009. 90. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2000. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/17433/1/JOAB%20FL%20c3%81VIO%20ARA%20c3%9aJO%20LE%20c3%83O%20-%20TCC%20ENG.%20EL%20c3%89TRICA%202009%20%281%29.pdf>. Acesso em: 05 de out. 2022.

NAGATANI, T.; SAITO S; SATO, M.; YAMADA, M. **Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system.** Scanning Microscopy. v.11, 901-909, 1987.

NEAGOE, L. N.; KLEIN, V. M. **Employee suggestion system (kaizen teian) the bottom-up approach for productivity improvement.** In: International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems, 2009, Brasov, Romênia. Proceedings... Brasov: ICEEMS, 2009.

PALMER, R.V. **Estudo da sulfatação durante a formação de placas positivas empastadas de bateria de chumbo-ácido.** 2008. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2008.

Reger, D. L.; Goode, S. R.; Ball, D. W. **Chemistry: principles and practice**. Cengage Learning: USA, 2009.

R. Giglioli, Buaonarota and M. Ceraolo, "**Charge and Discharge Fourth Order Dynamic Model of the Lead Battery**," 10th Int'l Electric Vehicle Symposium, Hong Kong, 1990, pp. 371-382, December 1990.

Yang, D.; Liu, J.; Wang, Q.; Yuan, X.; Zhu, X.; Li, L.; Zhang, W.; Hu, Y.; Sun, X.; Kumar, R. V.; Yang, J. **A novel ultrafine leady oxide prepared from spent lead pastes for application as cathode of lead acid battery**. Journal of Power Sources 2014, 257, 27.

YASUDA, Y. 40 Years, **20 Million Ideas: The Toyota Suggestion System**. Editora: Productivity Press Inc. 1989.

XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2015, Rio de Janeiro - RJ. **PDCA COMO FERRAMENTA DE GESTÃO DA ROTINA**. ALVES, E. A. C. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2015.

## 8. ANEXO

Controle de Placas - Orelhas Oxidadas								
Data 1 cavalete	Data último cavalete	Oxidou?	Posição do cavalete					
Primeira carga								
__/__/__	__/__/__	Sim ( ) Não ( )	18	15	12	9	6	3
Hora 1 cavalete	Hora último cavalete	Sim ( ) Não ( )	17	14	11	8	5	2
		Sim ( ) Não ( )	16	13	10	7	4	1
Segunda carga								
__/__/__	__/__/__	Sim ( ) Não ( )	18	15	12	9	6	3
Hora 1 cavalete	Hora último cavalete	Sim ( ) Não ( )	17	14	11	8	5	2
		Sim ( ) Não ( )	16	13	10	7	4	1
Terceira carga								
__/__/__	__/__/__	Sim ( ) Não ( )	18	15	12	9	6	3
Hora 1 cavalete	Hora último cavalete	Sim ( ) Não ( )	17	14	11	8	5	2
		Sim ( ) Não ( )	16	13	10	7	4	1
Quarta carga								
__/__/__	__/__/__	Sim ( ) Não ( )	18	15	12	9	6	3
Hora 1 cavalete	Hora último cavalete	Sim ( ) Não ( )	17	14	11	8	5	2
		Sim ( ) Não ( )	16	13	10	7	4	1
Quinta carga								
__/__/__	__/__/__	Sim ( ) Não ( )	18	15	12	9	6	3
Hora 1 cavalete	Hora último cavalete	Sim ( ) Não ( )	17	14	11	8	5	2
		Sim ( ) Não ( )	16	13	10	7	4	1
Sexta carga								
__/__/__	__/__/__	Sim ( ) Não ( )	18	15	12	9	6	3
Hora 1 cavalete	Hora último cavalete	Sim ( ) Não ( )	17	14	11	8	5	2
		Sim ( ) Não ( )	16	13	10	7	4	1
Sétima carga								
__/__/__	__/__/__	Sim ( ) Não ( )	18	15	12	9	6	3
Hora 1 cavalete	Hora último cavalete	Sim ( ) Não ( )	17	14	11	8	5	2
		Sim ( ) Não ( )	16	13	10	7	4	1
Oitava carga								
__/__/__	__/__/__	Sim ( ) Não ( )	18	15	12	9	6	3
Hora 1 cavalete	Hora último cavalete	Sim ( ) Não ( )	17	14	11	8	5	2
		Sim ( ) Não ( )	16	13	10	7	4	1