

**Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica – EMC
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais**

Aluno: Eng. Gabriel Beltrame Derner Silva

**DESENVOLVIMENTO DE NOVAS SOLUÇÕES EM
MATERIAIS PARA RESISTÊNCIAS DE CHUVEIROS
ELÉTRICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós
Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau de
Mestrado em agosto de 2013.

Orientador: Prof. Aloisio Nelmo Klein

Co-orientador: Prof. César Vitorio Franco

Florianópolis
Agosto, 2013

Silva, Gabriel Beltrame Derner

Desenvolvimento de novas soluções em materiais para resistências de chuveiros elétricos / Gabriel Beltrame Derner Silva ; orientador, Aloísio Nelmo Klein ; co-orientador, César Votorio Franco. - Florianópolis, SC, 2013.103 p.

Dissertação (mestrado profissional) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

Inclui referências

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Corrosão. 3. Ferramentas da Qualidade. 4. Chuveiro. 5. Resistência Elétrica. I. Nelmo Klein, Aloísio. II. Votorio Franco, César. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. IV. Título.

Gabriel Beltrame Derner Silva

**DESENVOLVIMENTO DE NOVAS SOLUÇÕES EM
MATERIAIS PARA RESISTÊNCIAS DE CHUVEIROS
ELÉTRICOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais.

Florianópolis, 09 de agosto de 2013.

Prof. Antônio Pedro Novaes de Oliveira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aloísio Nelmo Klein,
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Almir Spinelli,
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Dr.^a Sônia Hickel Probst,
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr.^a Gisele Hammes
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho ao Engenheiro Francimar Ghizoni Pereira, ao Engenheiro Libni da Silva e ao Administrador Rafael Antunes de Souza.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à minha família que sempre apoiou: à minha mãe Maria de Fatima Beltrame Silva, ao meu pai Aroldo Derner Silva e ao meu irmão Saul Beltrame Derner Silva. Aos meus tios Prof. Dr. Valmor Beltrame e Profa. Dra. Sônia Branco Beltrame.

Agradeço à empresa onde trabalho e apostou na realização do projeto, ThermoSystem Indústria Eletro Eletrônica, mais precisamente aos Senhores: Eng. Francimar Ghizoni Pereira, Eng. Líbni da Silva, Rafael Antunes de Souza e André Martins Pereira, por todas as informações, desafios lançados e ajuda prestada.

Agradeço à empresa Tech Nano Solution (TNS): Eng. Gilberto Heinzmann, Eng. Gabriel Freitas Nunes e Raphael Serafim pelas discussões e parceria na execução dos experimentos.

Agradeço aos professores Dr. Aloísio Nelmo Klein, Dr. César Vitório Franco e Dra. Sônia Maria Hickel Probst por todo apoio dado e discussões construtivas com o intuito de gerar conhecimento.

Finalmente, agradeço a Deus pela saúde e empenho que tive durante a realização do projeto.

EPÍGRAFE

“Você não é o que pensa que é. O que você
pensa, você é.”

Dale Carnegie, 1938

RESUMO

O trabalho mostra uma forma de reduzir o índice de devoluções de chuveiros elétricos devido à itens relacionados à ruptura da resistência elétrica (ou resistor elétrico). Atualmente, o chuveiro elétrico está presente em 90% das residências dos brasileiros. O início do seu desenvolvimento deu-se em meados da década de 40. A resistência elétrica, elemento fundamental que proporcionou o advento do chuveiro elétrico, tem como função aquecer a água para proporcionar um banho a uma temperatura adequada à temperatura do corpo humano, gerando uma sensação agradável. A empresa ThermoSystem, fabricante de duchas e torneiras mecânicas e eletrônicas, enfrentou alguns problemas referentes à queima prematura de resistências. Por isso, duas possibilidades de melhorias em termos de materiais para a fabricação das mesmas foram experimentadas neste trabalho. A primeira avaliou a viabilidade de produção de resistências com substituição de material do terminal (um de seus componentes) de latão para aço inoxidável. A segunda rota analisou a possibilidade de aplicação de uma camada de material sobre o produto. Dois tipos de camadas foram estudados: banho em solução de níquel (niquelação) e banho em solução contendo polisilazanas (material polimérico). Como metodologia experimental e caracterização foram realizados: pesquisa na literatura sobre o processo de fabricação do componente e sobre o fenômeno de corrosão em geral, planejamento dos experimentos, testes de vida útil, teste de corrosão em imersão, análises via microscopia eletrônica de varredura e teste de névoa salina. Finalmente, o melhor resultado foi aplicado em algumas etapas do fluxograma de desenvolvimento de melhorias e novos produtos da ThermoSystem (testes em campo e lote piloto) e, como aprovados, culminaram na alteração de projeto dos produtos da organização. Análises estatísticas foram empreendidas para acompanhamento da melhor solução (segundo os testes preliminares) no mercado.

Palavras-chave: chuveiro, resistência elétrica, corrosão

ABSTRACT

This study shows a way to reduce the rate of returns of electric showers due to items related to disruption of electrical resistance (or electrical resistor). Currently, the electric shower is present in 90% of households in Brazil. The early development occurred in themidof1940. The electrical resistance (or electrical resistor), the key element which gave rise of the electrical shower, serves to heat the water to provide a ba that a suitable temperature to body temperature, creating a pleasant sensation. ThermoSystem, a factory manufacturer of mechanic and electronic showers and taps, had some problems related due to premature failure of resistances. Therefore, in this work two routes for improvements of the materials to fabrication of the electrical resistances was studied. The first evaluated the feasibility of producing resistors with substitution of the contactor (one of its components): brass to stainles ssteel. The second route assesses the possibility of applying a layer of material on the surface of the product. Two types of layers will be studied: bath in a solution of nickel and bath solution containing poly-salaams (polymeric material). As experimental methodology and characterization were performed: bibliographic review on the manufacturing process of the component and on the phenomenon of corrosion in general, planning of experiments, life test, immersion corrosion test, analysis via scanning electron microscopy and salt spray test. Finally, the best result was used in some steps of the flowchart development of new products and improvements of ThermoSystem (field tests and pilot batch) and, as approved, it changed the structure of the products. Statistic analyzes were undertaken to monitor the best solution (according to preliminary tests) on the market.

Keywords: shower, electrical resistance, corrosion

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIAGRAMA DE PARETO: MOTIVO DAS DEVOLUÇÕES EM JANEIRO – 2011	23
FIGURA 2 – PROCESSO DE TREFILAÇÃO PARA ARAMES E FIOS [10].....	25
FIGURA 3 – EXEMPLO DE TERMINAL <i>FAST-ON</i> FÊMEA.....	26
FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO E DEFORMAÇÃO DE VÁRIOS MATERIAIS [12]	27
FIGURA 5 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA A UNIÃO DO ARAME MAIS TERMINAL, CRIMPAGEM.....	29
FIGURA 6 – RESISTOR ELÉTRICO ROMPIDO PRÓXIMO À REGIÃO DE ACOPLAMENTO COM O TERMINAL.....	31
FIGURA 7 – EFEITO DO PH NA TAXA DE CORROSÃO DO FERRO [14].....	37
FIGURA 8 – GRÁFICO ILUSTRANDO A PASSIVIDADE DOS AÇOS-CROMO EXPOSTOS DURANTE 10 ANOS A UMA ATMOSFERA INDUSTRIAL [13]	39
FIGURA 9 – SISTEMA DE CONJUNTOS MOSTRANDO ETAPAS DO PROJETO.....	42
FIGURA 10 – DIAGRAMA DE ISHIKAWA OU ESPINHA DE PEIXE: POSSÍVEIS CAUSAS PARA A FALHA DA RESISTÊNCIA.....	43
FIGURA 11 – EXEMPLO DE ROMPIMENTO DEVIDO À CORROSÃO APÓS USO EM CAMPO	53
FIGURA 12 – ESTRUTURA MOLECULAR IDEALIZADA DE PERHIDROPOLISILAZANA [30].....	55
FIGURA 13 – ESQUEMA MOSTRANDO AS BARRAS DA CÂMARA	57
FIGURA 14 – FOTO EXIBINDO O POSICIONAMENTO REAL DAS BARRAS COM OS CONJUNTOS DE RESISTÊNCIAS (ARAME + TERMINAL) SELECIONADOS	58
FIGURA 15 – RESULTADO DURABILIDADE X CONCENTRAÇÃO DA CAMADA DE POLISILAZANA.....	63

FIGURA 16 – RESULTADO DURABILIDADE X TEMPO E TEMPERATURA DE CURA DA CAMADA DE POLISILAZANA	64
FIGURA 17 – RESULTADO DURABILIDADE X CAMADA DE NIQUELAÇÃO ANTERIOR À CAMADA DE POLISILAZANA	65
FIGURA 18 – RESULTADO DURABILIDADE X LIGA DO TERMINAL PARA QUALQUER CAMADA.....	66
FIGURA 19 – RESULTADO DURABILIDADE X TIPO DE CAMADA APLICADA (SEM CAMADA, SOMENTE POLISILAZANA, SOMENTE NIQUELAÇÃO, NIQUELAÇÃO + POLISILAZANA)	67
FIGURA 20 – DIAGRAMA DE PARETO: DEVOLUÇÕES DUCHA 8T JAN/2011	73
FIGURA 21 – DIAGRAMA DE PARETO: DEVOLUÇÕES DUCHA 8T JUL/2011.....	74
FIGURA 22 – DIAGRAMA DE PARETO: DEVOLUÇÕES DUCHA 8T JAN/ 2012	74
FIGURA 23 – DIAGRAMA DE PARETO: DEVOLUÇÕES DUCHA 8T JUL/2012.....	74
FIGURA 24 – AMOSTRA COM TRINCA E ÁREA COM PRODUTOS DE CORROSÃO.....	76
FIGURA 25 – AMOSTRA COM INÍCIO DA TRINCA E ÁREA COM PRODUTOS DE CORROSÃO – VISTA DA SUPERFÍCIE.....	77
FIGURA 26 – LOCAIS ONDE FORAM REALIZADAS AS ANÁLISES QUÍMICAS – VISTA DA SUPERFÍCIE.....	78
FIGURA 27 – RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA REALIZADA DA ÁREA 1 DA FIGURA 26.....	78
FIGURA 28 – RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA REALIZADA NA LINHA 2 DA FIGURA 26.....	79
FIGURA 29 – AMOSTRA APÓS USO: RUPTURA DEVIDO À CORROSÃO GALVÂNICA, SEM CAMADA – VISTA DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA	80
FIGURA 30 – AMOSTRA APÓS APLICAÇÃO DE CAMADA DE POLISILAZANA, [10:90] – VISTA DA SUPERFÍCIE.....	81
FIGURA 31 – AMOSTRA APÓS APLICAÇÃO DE CAMADA DE POLISILAZANA, [100:0] - VISTA DA SUPERFÍCIE.....	82

FIGURA 32 – LOCAIS ONDE FORAM REALIZADAS AS ANÁLISES QUÍMICAS PONTUAIS – VISTA DA SUPERFÍCIE	83
FIGURA 33 – RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA REALIZADA NO PONTO 1 DA FIGURA 32.....	83
FIGURA 34 – RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA REALIZADA NO PONTO 2 DA FIGURA 32.....	84
FIGURA 35 – CAMADA DE NI: MENOR ESPESSURA DE CAMADA ENCONTRADA – VISTA DE CORTE	85
FIGURA 36 – CAMADA DE NI: MAIOR ESPESSURA DE CAMADA ENCONTRADA – VISTA DE CORTE	85
FIGURA 37 – LOCAIS DE ONDE FORAM REALIZADAS AS ANÁLISES QUÍMICAS PONTUAIS – VISTA DE CORTE DA CAMADA	86
FIGURA 38 – RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA NO PONTO 1 (CAMADA DE NÍQUEL) DA FIGURA 37.....	86
FIGURA 39 – RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA REALIZADA NO PONTO 2 (CAMADA DE NÍQUEL) DA FIGURA 37	87
FIGURA 40 – NÉVOA SALINA: T28, 48 H.....	87
FIGURA 41 – NÉVOA SALINA: T28, 113 H.....	87
FIGURA 42 – NÉVOA SALINA: T26, 48 H	88
FIGURA 43 – NÉVOA SALINA: T26, 113 H.....	88
FIGURA 44 – NÉVOA SALINA: T12, 48 H	88
FIGURA 45 – NÉVOA SALINA: T12, 113 H.....	88
FIGURA 46 – NÉVOA SALINA: T11, 48 H	88
FIGURA 47 – NÉVOA SALINA: T11, 113 H.....	88
FIGURA 48 – NÉVOA SALINA: T1, 48 H.....	89
FIGURA 49 – NÉVOA SALINA: T1, 113 H	89

FIGURA 50 – RESPOSTA DA APLICAÇÃO DE CAMADA DE NIQUELAÇÃO NO ÍNDICE DE
DEVOLUÇÕES..... 92

LISTA DE TABELAS

TABELA I – POTENCIAIS DE ELETRODO PARA O FERRO METÁLICO E COBRE METÁLICO [14].....	32
TABELA II – TABELA PRÁTICA DE NOBREZA EM ÁGUA DO MAR [19].....	34
TABELA III – IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS PELO CÓDIGO	45
TABELA IV – PLANEJAMENTO DOS TESTES COM POLISILAZANAS	46
TABELA V – PLANEJAMENTO DOS TESTES DE VIDA ÚTIL.....	48
TABELA VI – AMOSTRAS ESCOLHIDAS.....	49
TABELA VII – POSSÍVEIS MATERIAIS A SEREM APLICADOS EM ARAMES DE RESISTORES ELÉTRICOS [27].....	52
TABELA VIII – PLANEJAMENTO DOS TESTES DE NÉVOA SALINA	56
TABELA IX – RESULTADO DOS TESTES DE VIDA ÚTIL.....	61
TABELA X – RESULTADO DOS TESTES DE IMERSÃO	69
TABELA XI – ACOMPANHAMENTO DOS TESTES EM CAMPO	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	21
1.2	OBJETIVO E JUSTIFICATIVA.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	24
2.1.1	<i>Trefilação</i>	<i>24</i>
2.1.2	<i>Estampagem e aços aplicados.....</i>	<i>26</i>
2.1.1	<i>União do arame com o terminal.....</i>	<i>28</i>
2.2	CORROSÃO	30
2.2.1	<i>Tipos de corrosão</i>	<i>30</i>
2.2.2	<i>Tipologias de água e influência no processo corrosivo</i>	<i>35</i>
2.2.3	<i>Formas de combate à corrosão</i>	<i>37</i>
3	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO.....	41
3.1	METODOLOGIA DE TRABALHO UTILIZADA.....	41
3.1.1	<i>Análise de causas.....</i>	<i>42</i>
3.1.2	<i>Testes para otimização do banho de polisilazana</i>	<i>46</i>
3.1.3	<i>Testes de vida útil.....</i>	<i>47</i>
3.1.4	<i>Testes de corrosão por imersão.....</i>	<i>48</i>
3.1.5	<i>Testes em campo.....</i>	<i>50</i>
3.1.6	<i>Lote piloto e acompanhamento de mercado.....</i>	<i>50</i>
4	MATERIAIS E CARACTERIZAÇÕES	51

4.1	MATERIAIS.....	51
4.1.1	<i>Ligas metálicas aplicadas na resistência</i>	51
4.1.2	<i>Materiais das camadas superficiais</i>	53
4.2	MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO	55
4.2.1	<i>Análises via MEV e via EDX</i>	55
4.2.2	<i>Testes de névoa salina</i>	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	RESULTADOS DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	59
5.1.1	<i>Testes para otimização do banho de polisilazana</i>	59
5.1.2	<i>Testes de vida útil</i>	60
5.1.3	<i>Testes de corrosão por imersão</i>	68
5.1.4	<i>Testes em campo</i>	71
5.1.5	<i>Lote piloto e acompanhamento de mercado</i>	72
5.2	RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES	75
5.2.1	<i>Análises via MEV e EDX</i>	75
5.2.2	<i>Teste de névoa salina</i>	87
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	91
	REFERÊNCIAS	95
	ANEXO A – INFRA-ESTRUTURA.....	103

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

O chuveiro elétrico é um eletrodoméstico criado e aprimorado nacionalmente, em meados da década de 40. O principal motivo para o projeto elétrico é a falta de aquecimento a gás existente no Brasil, o qual depois da revolução industrial foi introduzido e fortemente difundido nos países desenvolvidos, como nos Estados Unidos, e nos países do continente europeu. Por outro lado, com a abundância de energia elétrica disponível no Brasil, sobretudo devido às diversas fontes geradoras existentes no país, como usinas hidrelétricas e termelétricas, esta alternativa de aquecimento de água para banho foi impulsionada.

A concepção do chuveiro elétrico era bastante simples: uma resistência (resistor elétrico) composta por metais com altos pontos de fusão, aquecia a água. Entretanto, o aparelho não era muito seguro, uma vez que não possuía uma isolação eficaz. Contudo, na década de 60, com o advento do uso de plástico, os chuveiros se tornaram muito mais seguros devido à intrínseca propriedade de isolação elétrica desta classe de material. Hoje em dia, os chuveiros elétricos estão presentes na casa de quase todos os brasileiros e em algumas residências de outros países da América do Sul, como Peru e Bolívia.

Por outro lado, sabe-se que um dos principais responsáveis pela oneração da conta de luz do brasileiro é o chuveiro. Isto acontece devido à alta energia dissipada no aquecimento da água na câmara quente da ducha através do resistor elétrico conectado a mesma. Este inconveniente faz com que as empresas do setor busquem inovações que tenham cada vez melhor desempenho.

Como dito, o resistor elétrico, componente popularmente conhecido como resistência, é o elemento fundamental para o desenvolvimento do chuveiro elétrico. O mesmo possibilita a transformação de energia elétrica em energia térmica. Esta energia é utilizada para aquecer a água. Aproximadamente 35 °C é a variação máxima de temperatura proporcionada pelo resistor elétrico nos chuveiros brasileiros. Esta variação máxima é diretamente proporcional à potência e à tensão aplicadas.

Tendo em vista a globalização, é cada vez maior a exigência por produtos de melhor performance e qualidade. Neste trabalho será apresentado o estudo realizado em prol do desenvolvimento de um

resistor elétrico, aplicado a chuveiro, com maior tempo de vida útil. Estrategicamente, acredita-se que o consumidor irá aliar a alta durabilidade do resistor à marca ThermoSystem, culminando no aumento do *marketshare* da empresa no Brasil. Atualmente a ThermoSystem possui 10% da fatia do mercado nacional e 30% do mercado da região sul do Brasil.

1.2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

O presente trabalho tem como objetivo a melhoria da confiabilidade dos resistores elétricos através da eliminação de queimas prematuras e, conseqüentemente, o aumento da vida útil média das resistências. Tal meta pode ser alcançada pelos processos:

- substituição de material: do arame ou do terminal;
- aplicação de camada protetora de superfície na resistência, isto é, sobre o conjunto arame e terminal. Os tipos de camadas investigados são: recobrimento com polisilazanas e niquelação.

Sobre os tipos de materiais investigados no arame ou terminal, análises e testes com ligas metálicas de diferentes composições e propriedades foram empreendidos.

Já sobre os tipos de camadas de proteção, as duas frentes escolhidas foram baseadas em estudos e aplicações existentes. As camadas de niquelação foram aplicadas em componentes eletrônicos tendo em vista aumento da resistência à corrosão [1, 2, 3].

A camada superficial de polisilazana é utilizada também como proteção contra corrosão e alguns estudos foram realizados nos últimos anos [4, 5, 6].

Juntamente com as tecnologias estudadas, sempre foi analisada a viabilidade financeira para a aplicação em escala industrial, pois ao fim do estudo a solução encontrada foi implantada na linha de produção da empresa.

Existem alguns motivos para o desenvolvimento do trabalho. Para começar, cita-se o grande problema enfrentado pela empresa em algumas regiões do país, como no ABC paulista. Entre os anos de 2010 e 2011 um elevado número de resistores rompeu por mecanismos de corrosão desenvolvidos, provavelmente devido à alta agressividade da água fornecida aos domicílios da região. Como a empresa oferece garantia total do produto de um ano, foi enfrentado um enorme prejuízo por causa do alto índice de devoluções devido à queima prematura dos resistores no ABC paulista.

Ademais, existe a questão comercial: um produto com alta durabilidade será muito benéfico como estratégia de *marketing* para a empresa, além de reduzir o número de chuveiros devolvidos por causa de problemas relacionados às resistências, o que contribuiria positivamente no atingimento da meta do EBTD (indicador financeiro que mostra a lucratividade) da organização.

A empresa ThermoSystem monitora a ocorrência de problemas através do diagrama de Pareto. Este diagrama é uma ferramenta de análise da qualidade e informa qual a ocorrência nominal dos principais defeitos encontrados em um produto bem como sua relevância em termos percentuais [7, 8]. A ThermoSystem não disponibilizou os valores reais, por isto este diagrama foi adaptado, informando apenas os dados em percentuais. A Figura 1 mostra o diagrama de Pareto (adaptado) para um dos produtos da empresa (Ducha Multitemperatura 8T), indicando as devoluções do mês de janeiro de 2011. Através deste, percebe-se que o maior motivo das devoluções de produtos, cerca de 23%, era a queima da resistência.

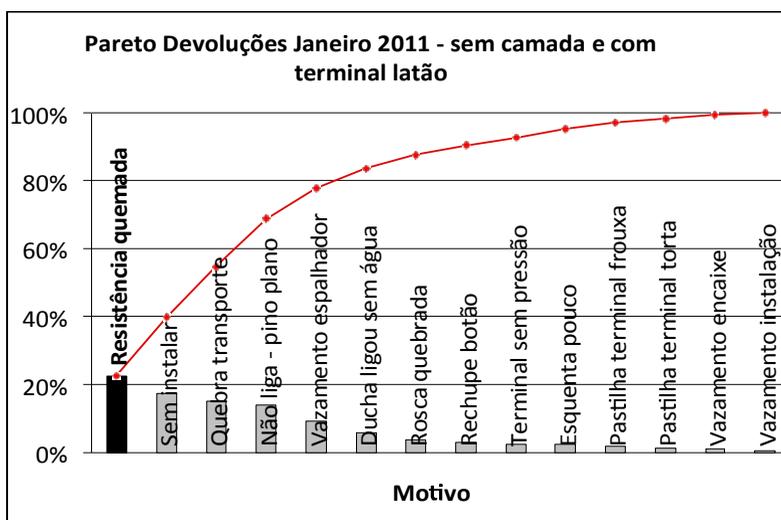


Figura 1– Diagrama de Pareto: motivo das devoluções em janeiro – 2011

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As principais etapas envolvidas no processo de fabricação das resistências elétricas, são:

- trefilação para os fios (processo realizado fora da ThermoSystem);
- estampagem para os terminais (processo realizado fora da ThermoSystem);
- união através de prensagem do fio com o terminal (processo realizado na ThermoSystem).

No presente trabalho a principal característica a ser melhorada nas resistências elétricas dos chuveiros é a sua resistência à corrosão, logo, a revisão bibliográfica dá ênfase a este assunto.

2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

No presente item serão descritas as etapas envolvidas na fabricação de resistores elétricos. De modo geral, a fabricação de um resistor depende da fundição das ligas utilizadas, laminação e estampagem das chapas, no caso dos terminais; trefilação, no caso dos arames; e prensagem, para união dos dois componentes e montagem final no suporte plástico. No caso específico do presente trabalho, as etapas do processo de fabricação que serão detalhadas são: trefilação dos arames, estampagem dos terminais e prensagem para a união dos arames com os terminais. Sendo assim, uma breve descrição destas será apresentada a seguir.

2.1.1 Trefilação

Processo de fabricação de arame e barras finas de metal através de estiramento. É um processo industrial sem a alteração do volume, o que acarreta na redução da seção transversal e, com isso, aumento do comprimento da matéria-prima. Consiste na aplicação de uma força trativa no lado de saída da peça. A ferramenta utilizada é chamada de feira ou trefila e possui a forma de canal convergente [9].

Apesar da tração aplicada, a maior parte do escoamento plástico é causada por esforços de compressão resultantes da reação do metal com a matriz. Apesar de não ser um requisito necessário, normalmente a parte metálica apresenta simetria circular, como os arames para a resistência elétrica do estudo presente [10]. A Figura 2 esquematiza o processo de trefilação.

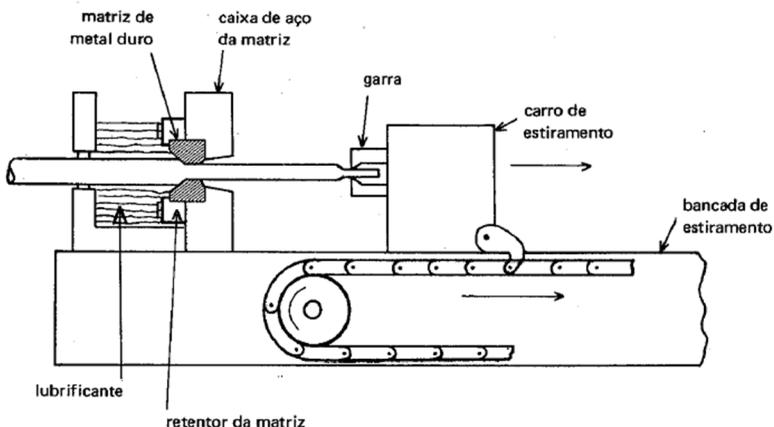


Figura 2 – Processo de trefilação para arames e fios [10]

Da redução sucessiva do diâmetro de uma barra metálica maciça podem resultar barras, vergalhões e arames, dependendo do diâmetro do produto final. Com isso, a trefilação possibilita diversas aplicações: produção de cabos, fios elétricos, arames para cercas, cliques de papel, corda para instrumentos musicais, raio para rodas. Por outro lado, a trefilação pode também ser realizada em tubos ocos e, neste caso, existem diversas técnicas empregadas, com a utilização, ou não, de um mandril interno ao tubo que permite um melhor controle da espessura final [10].

Geralmente os processos de trefilação são realizados à temperatura ambiente; todavia, uma vez que as deformações envolvidas são normalmente grandes, ocorre um aumento considerável de temperatura durante a operação [10].

Um aspecto a ser considerado no processo de trefilação dos arames, para resistores elétricos, é a qualidade superficial atingida. Sabe-se que a corrosão está diretamente relacionada com as imperfeições da superfície do material. Quanto mais rugosa a superfície, mais fácil a acumulação de impurezas e, conseqüentemente, a reação destas com o metal é facilitada. Desta forma, quanto mais uniforme for a superfície, maior será a resistência à corrosão do arame. Finalmente, devem ser previstos parâmetros, lubrificantes e solventes ideais para o processo.

Estudos também mostram que uma lubrificação adequada durante o processo de trefilação pode contribuir para o aumento da resistência à corrosão do componente metálico [11].

2.1.2 Estampagem e aços aplicados

A estampagem é um processo de conformação mecânica, realizado geralmente a frio, o qual compreende um conjunto de operações, por intermédio das quais uma chapa ou fita plana é submetida a transformações de modo a adquirir uma nova forma geométrica, plana ou oca [10].

A deformação plástica é levada a efeito com o emprego de prensas de estampagem, com o auxílio de dispositivos especiais chamados de estampas ou matrizes [10].

Basicamente, a estampagem compreende as seguintes operações:

- corte;
- dobramento e encurvamento;
- estampagem profunda [10].

Os terminais *fast-on* fêmea utilizados nos resistores elétricos da ThermoSystem são fabricados por este processo. A Figura 3 mostra um exemplo de terminal. A denominação *fast-on* fêmea é aplicada ao componente devido à facilidade e agilidade no encaixe, bem como o fato desta peça servir de alojamento para um pino (macho).



Figura 3 – Exemplo de terminal *fast-on* fêmea

Para a estampagem dos terminais *fast-on* fêmea, frequentemente, são empregadas prensas excêntricas em forma de H com capacidade de 10 a 100 ton e produtividade de até 1000 golpes por minuto.

A estampabilidade é feita preferencialmente com metais de estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), já que esta possui planos bastante compactos bem como uma alta quantidade de direções preferenciais para a deformação plástica [10].

Considerando a capacidade de conformabilidade ou, neste caso, estampabilidade, a Figura 4 mostra uma série de classes de aços e onde cada classe se insere em termos de resistência ao escoamento e à deformação [12]. Através da Figura 4 percebe-se que a classe dos aços inoxidáveis austeníticos possui alta capacidade de alongamento, quando comparada às demais classes. Tendo esta propriedade em vista, bem como sabendo que esta classe de materiais possui relativamente alta resistência à corrosão, quando comparada à liga aplicada atualmente, latão C 260, esta foi a liga testada na substituição do terminal dos resistores.

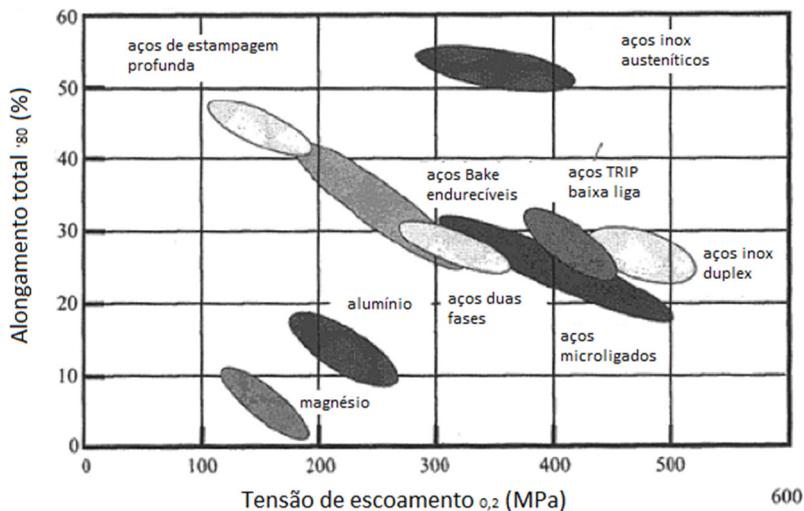


Figura 4 – Relação entre resistência ao escoamento e deformação de vários materiais [12]

Os aços inoxidáveis austeníticos cristalizam na estrutura cúbica de face centrada CFC (austenita). Apresentam simultaneamente cromo e níquel, o cromo variando de 16% a 26% e o níquel de 6% a 22%. Os mais populares e utilizados são os 18-8, em que o teor médio de cromo é 18% e o de níquel é de 8%. A introdução do níquel melhora consideravelmente a resistência à corrosão do aço e a resistência à oxidação à alta temperatura, visto que, na série de potenciais, o níquel é mais nobre que o ferro e, além disso, forma uma camada passivadora de óxido que protege o aço espontaneamente. A capacidade de restauração da película inerte protetora, que eventualmente tenha sido retirada de um aço inoxidável do tipo Cr-Ni é muito mais rápida do que a de um aço inoxidável somente ao Cr [13].

As características dos aços inoxidáveis austeníticos são as seguintes:

- não magnéticos;
- não endurecíveis;
- quando encruados, apresentam um fenômeno interessante: o aumento de dureza que se verifica é bem superior ao que se encontraria, mediante a mesma deformação, em outros aços. Esse aumento, além do normal da dureza, pode ser atribuído à instabilidade da austenita que, sob o efeito das tensões do encruamento, transforma-se parcialmente e paulatinamente em ferrita. Essa ferrita, supersaturada de carbono, nas mesmas condições que uma martensita, contribui para o endurecimento excepcional do aço [12].

2.1.1 União do arame com o terminal

Para a manufatura das resistências, uma das principais operações é a união do arame de aço inoxidável ao terminal de latão. Isto é realizado através do processo de prensagem ou martelamento a frio, comumente chamado de “crimpagem” na ThermoSystem.

Esta operação consiste em um ferramental disposto de maneira transversal, que oscila com o auxílio de uma prensa hidráulica, também na direção transversal ao conjunto fio mais terminal. Um detalhe a ser observado é que durante esta operação o terminal deforma-se plasticamente, sendo novamente estampado até atingir a forma final a qual prende o arame. A Figura 5 mostra o equipamento utilizado para esta operação.

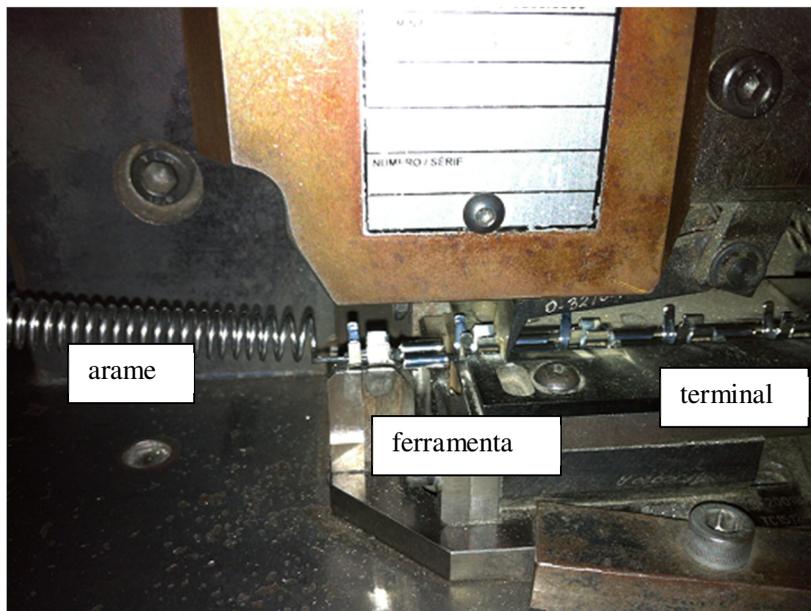


Figura 5 – Equipamento utilizado para a união do arame mais terminal, crimpagem

Como vantagens, este processo oferece a não formação de cavacos (desperdício de material reduzido), bom acabamento, maior resistência devido ao encruamento do material na região de deformação plástica, custo reduzido por peça, baixo custo de controle de qualidade devido à uniformidade da produção e a facilidade para a detecção de desvios. Por outro lado, como principal desvantagem deste processo, podemos destacar o alto custo do ferramental (estampos), que só pode ser amortizado se a quantidade de peças a produzir for elevada.

Os estampos compõem-se de um conjunto de peças ou placas que, associado a prensas ou balancins, executa operações de corte e de dobra para produção de peças em série. Durante o processo, o material é cortado de acordo com as medidas das peças a serem estampadas, a que se dá o nome de tira. Quando cortamos, numa tira de material, as formas de que necessitamos, a parte útil obtida recebe o nome de peça. Ao restante de material denomina-se retalho. O estampo de dobra é também conhecido como dobrador. É formado de punção e matriz e, geralmente,

guiado pelo cabeçote da prensa ou placa-guia. O punção é uma peça de aço, temperada e revenida, cuja parte inferior tem um perfil que corresponde à superfície interna da peça. A matriz é de aço e sua parte superior tem a forma da parte exterior da peça. Pode ser fixada diretamente sobre a mesa da prensa. Geralmente, é sobre a matriz que se fixam as guias do material da peça, que são elementos adaptados ao estampo para dar uma posição adequada de trabalho. Existem estampos mistos cujas estruturas são o resultado da união dos estampos de corte e de dobra.

2.2 CORROSÃO

Inicialmente, corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos [14].

Por ser um processo que provoca descaracterização do material ou de um produto previamente obtido, pode-se afirmar que a corrosão é um fenômeno indesejado na maioria dos casos em que isto ocorre. Como os agentes corrosivos se apresentam no ambiente natural ou em ambientes criados por determinados processos, pesquisas são realizadas com objetivo de encontrar maneiras de reduzir a ação destes agentes corrosivos ou até mesmo eliminá-los, porém sem que isso acarrete custos aos processos ao ponto de que a ação seja inviável economicamente [14].

Na sequência serão abordados alguns assuntos relevantes para o desenvolvimento do projeto: mecanismos de corrosão, influência da tipologia da água em que o resistor elétrico atua e formas de combate ao processo corrosivo.

2.2.1 Tipos de corrosão

Devido à alta variabilidade de aplicações de metais, existem muitos tipos de corrosão. Podem ser exemplificados: corrosão galvânica, corrosão eletrolítica, corrosão por pites, corrosão intergranular, lixívia seletiva, erosão-corrosão, corrosão sob tensão, fragilização por hidrogênio [14]. A Figura 6 mostra um metal rompido por corrosão.

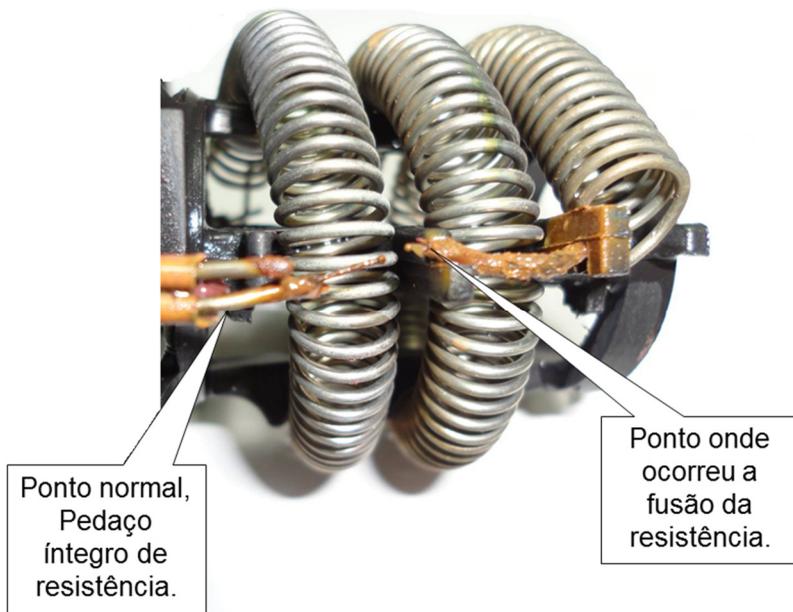


Figura 6 – Resistor elétrico rompido próximo à região de acoplamento com o terminal

Dentre todos os possíveis mecanismos de corrosão pesquisados na bibliografia, conclui-se que aqueles que se desenvolvem preferencialmente nos produtos em estudo são corrosão galvânica e corrosão eletrolítica. Tais mecanismos serão abordados na sequência a fim de entender qual deles é o mais problemático em relação aos produtos em análise. Com isso, a definição de como atacar o problema será mais facilmente alcançada.

Os demais mecanismos de corrosão podem também agir sobre as falhas dos resistores elétricos em estudo. Entretanto, quando comparados aos anteriormente descritos em termos de incidência de defeitos, são irrelevantes. Por isso, os esforços neste estudo foram voltados ao combate a estes dois tipos de mecanismos preferenciais.

2.2.1.1 Corrosão galvânica

Este mecanismo de corrosão ocorre quando dois metais ou ligas que possuem composições diferentes, portanto potenciais diferentes, são acoplados eletricamente. O ânodo, metal menos nobre, ou mais reativo, naquele ambiente específico irá experimentar a corrosão através do eletrólito (no presente caso a solução formada por água e os sais existentes na mesma). O metal mais inerte, ou cátodo, estará protegido contra a corrosão. A corrosão galvânica caracteriza-se por apresentar corrosão localizada, próxima à região do acoplamento, ocasionando profundas perfurações no metal que funciona como ânodo [14].

Este tipo de corrosão é muito comum na união de ligas de aço, nas quais o principal elemento de liga é o ferro, com latão, em que o elemento de liga em mais alto teor é o cobre. A corrosão galvânica é facilmente desenvolvida quando se tem estes dois metais unidos na presença de um eletrólito e submetidos a uma corrente elétrica [15,16]. A Tabela I mostra os potenciais de eletrodo para o ferro metálico e o cobre metálico.

Tabela I – Potenciais de eletrodo para o ferro metálico e cobre metálico [14]

Tabela Potencial de Eletrodo - Solução Ácida		
Potencial de Oxidação E ⁰ (V)	Reação do Eletrodo	Potencial de Redução E ⁰ (V)
+0,440	Fe ²⁺ + 2e ↔ Fe	-0,440
-0,337	Cu ²⁺ + 2e ↔ Cu	+0,337

Como sabido, no ânodo ocorre a oxidação e no cátodo a redução. Considerando-se os potenciais de redução anteriormente apresentados na Tabela I, pode-se prever a seguinte reação química para o par metálico Fe/Cu:



A reação anterior mostra que o ferro se comporta como ânodo e o cobre como cátodo. Desta maneira, o ferro se oxida (perde elétrons, ou massa) enquanto o íon Cu²⁺ se reduz (ganha elétrons, ou massa). Pode-se afirmar que a reação referida ocorre espontaneamente, devido à segunda

lei da termodinâmica, a qual enuncia que todo sistema tende ao seu estado de menor energia livre [17].

Pode-se verificar que a reação, que ocorre na célula galvânica anteriormente exemplificada, ocorre de maneira espontânea devido à equação seguinte [18]:

$$\Delta_r G = -n \times F \times \Delta E \quad (1)$$

Onde:

$\Delta_r G$ = energia livre da célula galvânica;

n = número de elétrons envolvidos na reação do eletrodo;

ΔE = diferença de potencial entre os eletrodos;

F = Faraday = 96500 Coulombs;

Conforme demonstrado anteriormente, a diferença de potencial é positiva (+0,777 V). Desta forma o $\Delta_r G$ é negativo, caracterizando a reação como espontânea. Com isso, na concentração padrão, pode-se afirmar que quando temos um componente o qual está em um meio aquoso ácido e que é formado pela união de metais ou ligas em que predominantemente contem Fe e Cu, sem dúvida o processo de corrosão galvânica será desencadeado, sendo que o Fe é oxidado e o Cu^{2+} reduzido.

Analogamente ao caso descrito, considerando-se Fe e Cu, pode-se citar o caso prático de corrosão galvânica encontrado em uniões entre ligas de Cu (latão) e ligas de Fe (aço inox). Um aterramento com Cu promoverá a corrosão de tubulações de aço enterradas, pois ocorrem as condições essenciais para formação de pilha galvânica: ligação entre diferentes materiais metálicos, funcionando o Fe como ânodo (sofrendo corrosão) e o Cu como cátodo (sem corrosão), e como eletrólito o solo. Logicamente, para o fenômeno ocorrer é necessário que haja contato entre a malha de latão e a tubulação de aço carbono.

A Tabela II, referente à corrosão de materiais em água do mar, corrobora a informação de que o aço AISI 304 sofre corrosão quando conectado ao latão amarelo. O fato é explicado devido ao aço AISI 304 (16) estar posicionado antes do latão amarelo (23), o que faz com que o aço seja corroído preferencialmente [19].

Tabela II – Tabela prática de nobreza em água do mar [19]

Extremidade anódica (corrosão)	
1. Magnésio	24. Latão Almirantado
2. Ligas de Magnésio	25. Latão Alumínio
3. Zinco	26. Latão Vermelho
4. Alclad 38	27. Cobre
5. Alumínio 3S	28. Bronze
6. Alumínio 61S	29. Cupro-Níquel 90/10
7. Alumínio 63S	30. Cupro-Níquel 70/30 (baixo teor de ferro)
8. Alumínio 52	31. Cupro-Níquel 70/30 (alto teor de ferro)
9. Cádmio	32. Níquel (passivo)
10. Aço doce	33. Inconel (passivo)
11. Aço baixo teor liga	34. Monel
12. Aço liga	35. Hastelloy C
13. Ferro fundido	36. Aço AISI 410 (passivo)
14. Aço AISI 410 (ativo)	37. Aço AISI 430 (passivo)
15. Aço AISI 430 (ativo)	38. Aço AISI 304 (passivo)
16. Aço AISI 304 (ativo)	39. Aço AISI 316 (passivo)
17. Aço AISI 316 (ativo)	40. Titânio
18. Chumbo	41. Prata
19. Estanho	42. Grafite
20. Níquel (ativo)	43. Ouro
21. Inconel (ativo)	44. Platina
22. Metal Muntz	Extremidade catódica
23. Latão Amarelo	(proteção)

2.2.1.2 Corrosão eletrolítica

Corrosão por eletrólise ou eletrolítica ou corrosão por correntes de fuga, ocorre em tubulações enterradas, como oleodutos, gasodutos, adutoras, minerodutos e cabos telefônicos. Definida como sendo a deterioração de um material metálico forçado a funcionar como ânodo ativo de uma célula ou pilha eletrolítica. Geralmente as áreas corroídas se apresentam livres do produto de corrosão e, como é uma forma de corrosão localizada, em pouco tempo tem-se a formação de pites ou alvéolos com a consequente perfuração das tubulações. Logo, pode-se concluir que as áreas corroídas serão aquelas em que as correntes de fuga saem da

tubulação, ou instalação metálica, para o eletrólito ou meio ambiente (solo ou água) [14].

As medidas mais usuais de proteção são: drenagem de corrente, aterramento adequado, emprego de revestimento e emprego de proteção catódica. Essas medidas podem ser usadas isoladas ou conjuntamente [14].

2.2.2 Tipologias de água e influência no processo corrosivo

Existem vários fatores que influenciam a velocidade de corrosão em meio aquoso. De modo geral, os principais são: oxigênio dissolvido, temperatura, sais dissolvidos e pH [13].

- Efeito do oxigênio dissolvido: para que uma estrutura de aço ou ferro seja corroída a temperatura ambiente e pH neutro, é necessário que a água tenha oxigênio dissolvido, ou seja, deve ser aerada. A velocidade de corrosão, inicialmente é rápida e tende a diminuir com a formação da camada de óxido, que atua como barreira na difusão do oxigênio [14].
- Efeito da temperatura: em geral, o aumento da temperatura acelera a corrosão, pois tem-se diminuição da polarização e da sobretensão, aumento de condutividade do eletrólito e da velocidade dos íons. Entretanto pode retardar a corrosão porque diminui a solubilidade do oxigênio na água [14]. Alguns estudos estão sendo realizados sobre este assunto. Por exemplo, sabe-se que em temperaturas da ordem de 300 °C a propagação de uma trinca iniciada por processo de corrosão é maior do que a temperatura ambiente [20].
- Efeito de sais dissolvidos: podem agir acelerando (ação despolarizante, aumento da condutividade) ou retardando (precipitação de produtos de corrosão coloidais, diminuição da solubilidade de oxigênio, ação inibidora ou passivadora) a velocidade de corrosão [14]. Estudos mostram também que o tipo de sal dissolvido influencia na velocidade de corrosão. Por exemplo, testes de polarização potencio-dinâmica mostram os efeitos dos sais CaSO_4 , MgSO_4 , MgCl_2 e CaCl_2 no aço A607 [21]. Um outro fator a ser considerado a respeito dos sais dissolvidos é a dureza da água. Principalmente os sais de cálcio e magnésio, quando dissolvidos na água, caracterizam o tipo da

mesma chamada água dura. Quando esses sais se apresentam na forma de sulfetos ou cloretos, geralmente, a dureza da água é chamada permanente e quando se apresentam na forma de bicarbonato tem-se a dureza temporária. Aquecendo-se a água com dureza temporária observa-se a deposição de uma camada constituída sobretudo de bicarbonato de cálcio, a qual pode agir como barreira para a difusão do oxigênio dissolvido para a superfície metálica [14]. Alguns trabalhos têm sido realizados nesta área. O objetivo é identificar como e quanto a dureza da água interfere no processo de corrosão de um componente metálico [22].

- Efeito do pH: a Figura 7 mostra o efeito do pH a temperatura ambiente e água aerada. Entre os pH 4 e 10 a taxa de corrosão independe do pH e depende da rapidez com que o oxigênio difunde para a superfície metálica. Como a maioria das águas naturais possuem o pH entre 4 e 10, aços de baixa liga, em geral, tendem a apresentar velocidades de corrosão não muito diferentes quando expostos a águas naturais [14]. Ademais, existem trabalhos buscando investigar o processo de corrosão em metais com revestimentos anticorrosivos em função do pH [23, 24].

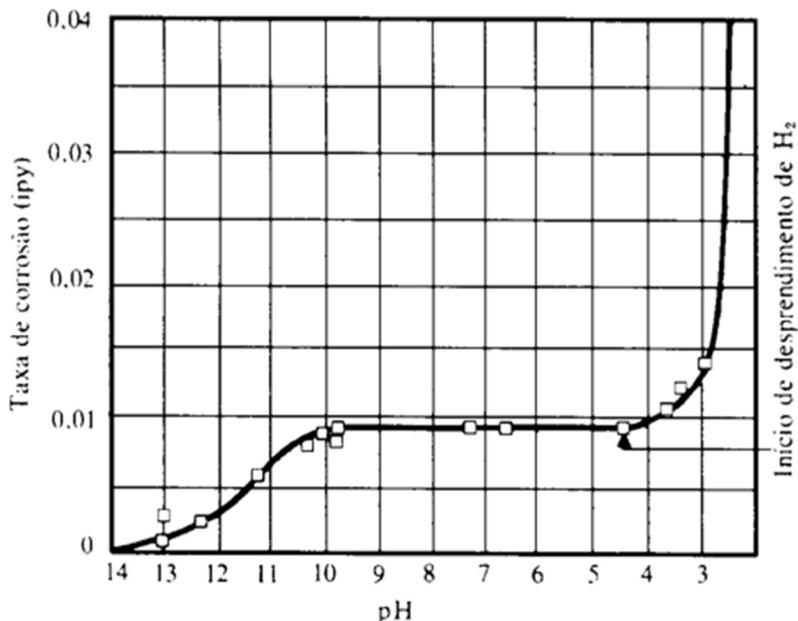


Figura 7 – Efeito do pH na taxa de corrosão do ferro [14]

Finalmente, também deve ser considerada a ação combinada de um ou mais fatores acima descritos anteriormente. Pode-se citar a alteração do pH da água devido a reações químicas possibilitadas por sais dissolvidos na mesma. Um exemplo bastante comum deste caso é a ionização (decomposição de sais dissolvidos pela água) do NaCl [14]. Estudos indicam que o íon cloreto Cl^- consegue transpor a camada passivada de aços inoxidáveis e alumínio, causando a corrosão por pite [25].

2.2.3 Formas de combate à corrosão

Para o presente estudo, como exposto no item 2.2, foi definido que o mecanismo de corrosão a ser atacado é o de corrosão galvânica.

Independentemente do meio, ou eletrólito (neste caso independentemente das propriedades da água em que o componente esteja em operação), este tipo de corrosão pode ser combatida através de algumas rotas, como:

- substituição do material pela utilização de materiais com potenciais semelhantes e resistentes à corrosão;

- aplicação de camadas superficiais as quais homogeneízem a superfície de dois materiais com diferentes composições químicas;
- utilização de materiais de sacrifício, os quais desenvolverão a corrosão preferencialmente.

Neste trabalho serão investigadas as duas primeiras citadas.

2.2.3.1 Aços resistentes à corrosão

A proteção contra a corrosão pode ser feita criando-se sobre a superfície do metal uma película protetora que separa o metal-base do meio corrosivo. Essa camada protetora pode ser criada artificialmente, mediante depósito de outra substância sobre a superfície do metal a proteger, ou naturalmente, isto é, pela produção espontânea da película superficial, através da formação de um composto químico, mantido na superfície metálica por forças atômicas, a passivação [14].

Outra forma de proteção contra a corrosão em estruturas cuja composição do material é predominantemente ferro, é a adição de elementos de liga. O cromo é o elemento essencial para aumento da resistência a corrosão de um aço. A Figura 8 mostra o papel exercido pelo cromo em um aço localizado em atmosfera industrial. Percebe-se que à medida que o teor de cromo aumenta, passa-se de um metal de grande corrosibilidade para um metal praticamente indestrutível pela corrosão [13].

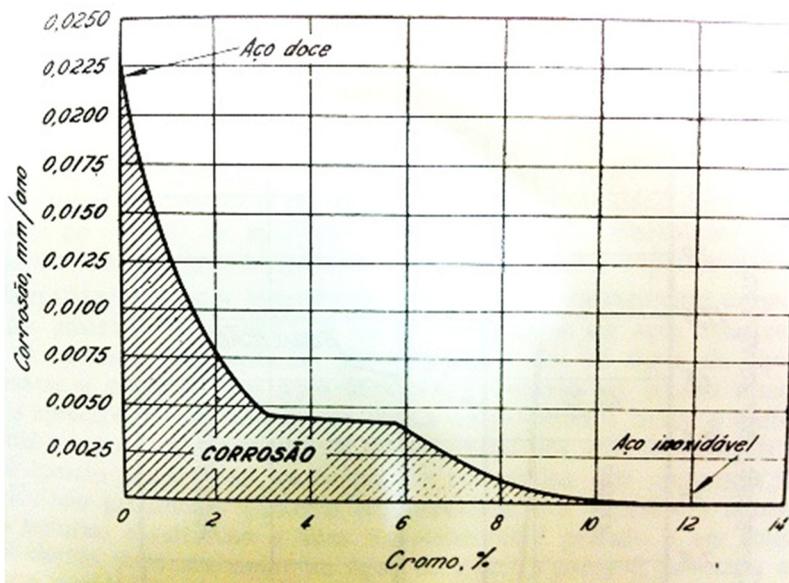


Figura 8 – Gráfico ilustrando a passividade dos aços-cromo expostos durante 10 anos a uma atmosfera industrial [13]

O níquel segue ao cromo em importância. Sua atuação faz-se sentir não só no aumento da resistência à corrosão dos aços inoxidáveis ao cromo em soluções neutras de cloreto e em ácidos de baixa capacidade de oxidação, como igualmente no sentido de melhorar suas propriedades mecânicas. Essa influência é particularmente grande quando o teor de níquel é superior a 6% ou 7% [13].

Os aços inoxidáveis contendo simultaneamente cromo e níquel, chamados austeníticos, constituem-se nos melhores tipos de aços resistentes à corrosão. O carbono, forçosamente presente em todos os tipos de aço, diminui ligeiramente a corrosão dos aços inoxidáveis quando no estado dissolvido, decresce apreciavelmente quando na forma de carbonetos livres e uniformemente distribuídos e pode causar completa desintegração dos aços inoxidáveis ao cromo-níquel quando precipitado na forma de carbonetos nos contornos dos grãos [13].

2.2.3.2 Camadas superficiais anticorrosivas

A fim de reduzir a ocorrência dos fenômenos de corrosão, geralmente empreende-se a aplicação de camadas superficiais nos componentes metálicos.

Os materiais empregados nos revestimentos anticorrosivos podem ter suas ações protetoras explicadas por diversos fatores, como:

- formação de películas protetoras de óxidos, hidróxidos ou outros compostos, pela reação com os oxidantes do meio corrosivo (caso do Al, Cr, Ni e Zn);
- os metais usados nos revestimentos apresentam valores elevados de sobretensão ou sobrevoltagem, sendo por isso mais resistentes ao ataque ácido em meios não aerados (caso do Sn, Pb, Zn, Cd) [14];
- recentemente, com o advento dos nanomateriais, é possível a aplicação de camadas ainda com menor espessura e maior efeito anticorrosivo. Por exemplo, polímeros (polisilazanas) podem ser aplicados através de nanocamadas [26].

Os métodos de aplicação de camadas superficiais anticorrosivas mais difundidos são [14]:

- cladização;
- imersão a quente;
- aspersão térmica – metalização;
- eletrodeposição;
- cementação – difusão;
- deposição em fase gasosa;
- redução química [12].

3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Conforme descrito, a ThermoSystem atravessava um sério problema em relação à durabilidade dos resistores elétricos. Inclusive existiam regiões no país onde a queima prematura era bastante acentuada. O presente estudo propõe o desenvolvimento de novas soluções de materiais para resistências de chuveiros elétricos, com o objetivo de aumentar a média geral da vida útil dos componentes, bem como acabar com queimas prematuras pontuais.

Para atingir o objetivo proposto foi utilizada a metodologia de trabalho descrita na sequência.

3.1 METODOLOGIA DE TRABALHO UTILIZADA

Inicialmente, foi consultada a literatura para entender o fenômeno pelo qual ocorre a queima dos resistores. Na sequência, foram analisadas as causas e as possíveis soluções, quer seja pela substituição de material ou pela aplicação de camadas superficiais para minimizar o problema. Depois, testes práticos foram realizados a fim de se avaliar o desempenho das eventuais soluções.

Para melhor entendimento da metodologia de trabalho utilizada, o esquema a seguir mostra as etapas realizadas, conforme Figura 9. O sistema de conjuntos demonstra que cada etapa foi estreitando a gama de possíveis soluções, até se chegar na mais viável para aplicação do lote piloto e acompanhamento no mercado.

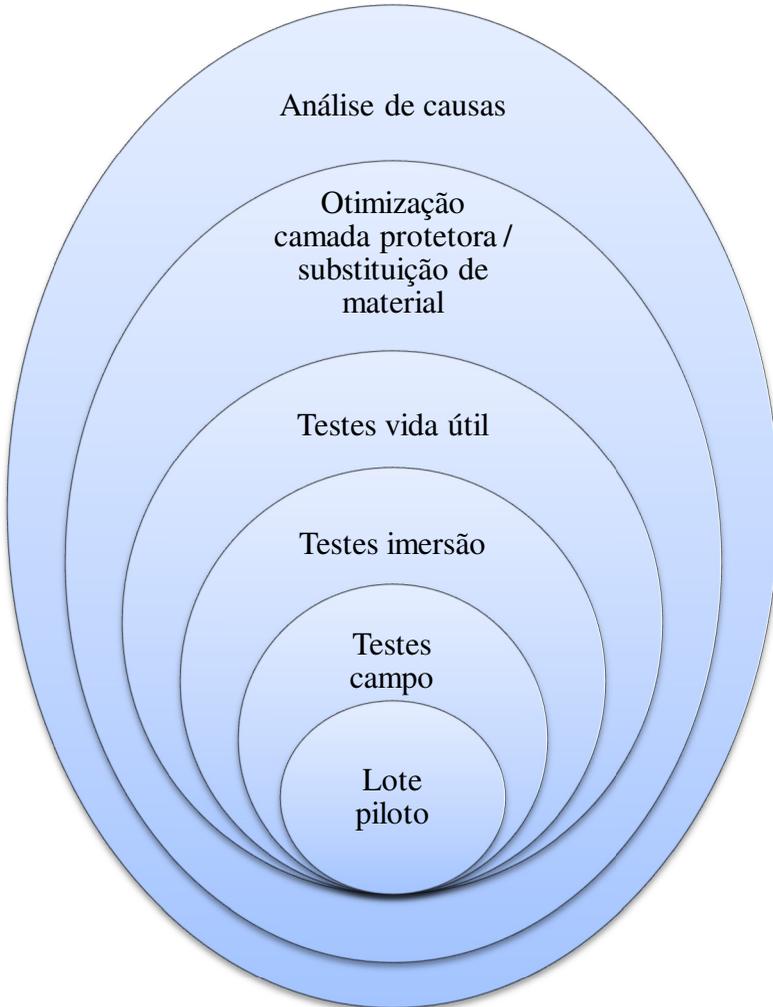


Figura 9 – Sistema de conjuntos mostrando etapas do projeto

3.1.1 Análise de causas

Inicialmente, para a análise das causas, montou-se um diagrama espinha de peixe, ou diagrama de Ishikawa (Figura 10). A razão para isto é listar possíveis causas para o efeito de queima da resistência elétrica. Este diagrama atua no sentido de indicar qual a causa raiz do problema, facilitando que o mesmo seja solucionado.

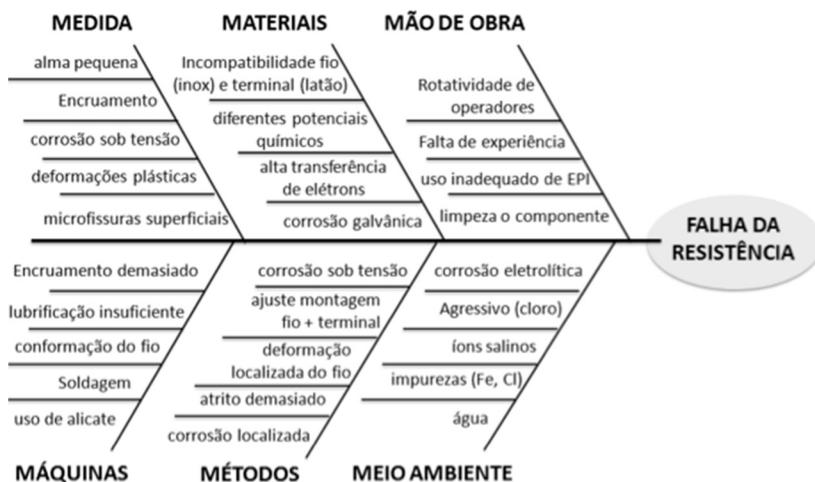


Figura 10 – Diagrama de Ishikawa ou espinha de peixe: possíveis causas para a falha da resistência

Na tentativa de resolver o problema, foi realizado um *brainstorming* com o intuito de levantarem-se hipóteses para solução do rompimento da resistência. Os resultados obtidos foram:

- tratamento térmico de climatização: eliminar tensões internas através de corrente elétrica (método);
- substituição do material da liga (material);
- alteração do projeto elétrico por intermédio da mudança das propriedades da liga e da geometria do arame (materiais e medida);
- aplicação de camada superficial protetora no conjunto arame e terminal (material e método).

Consultando a literatura, concluiu-se que o principal mecanismo de corrosão atuante é o de corrosão galvânica. Como possível causa associada a este mecanismo, cita-se a incompatibilidade dos dois tipos de material utilizados no conjunto arame mais terminal devido à diferença do potencial elétrico entre os dois metais, sendo o arame de um aço inoxidável ferrítico e o terminal de latão C 260. Por isso, decidiu-se substituir o material da liga. Definiu-se também experimentar uma outra solução: a aplicação de uma camada superficial sobre o

conjunto arame e terminal, existindo, portanto, duas frentes para buscar-se a solução do problema.

Na primeira frente, relacionada à substituição de material, a escolha foi realizada tendo em vista o custo, a possibilidade de aquisição dos componentes para montagem do resistor (fator logístico) e o conceito técnico de corrosão galvânica. Para tanto, buscou-se equalizar a composição química dos componentes e, conseqüentemente o potencial elétrico entre as partes metálicas da resistência. A escolha dos materiais a serem aplicados será detalhadamente descrita no Capítulo 4. A viabilidade de se alterar o material do terminal (latão) é maior do que a de se alterar o material do arame (aço inoxidável) porque este, nas condições de uso, é muito mais resistente à corrosão. Decidiu-se pela utilização de um terminal de aço inox e antes da utilização do mesmo foi pesquisada, junto ao fornecedor, a possibilidade de estampagem do mesmo.

Sobre a segunda frente, consultando-se a literatura verificou-se que a aplicação de camadas superficiais pode contribuir para o aumento da resistência à corrosão dos metais. Para isto, foram empreendidos testes de niquelação (método já desenvolvido, encontrado no mercado e na literatura para peças metálicas, mas não em resistências elétricas de chuveiros), bem como aplicação de polisilazanas (material polimérico). Pode-se dizer que ambos os tipos de camadas estudadas tratam-se de inovações e foram aplicadas na superfície do conjunto arame e terminal. Por um lado, a niquelação foi realizada por um fornecedor que já detém o processo e aplica a camada em outros componentes para a ThermoSystem. O processo é conhecido comercialmente como niquelação química. Por isso, as variáveis deste processo não foram estudadas. A análise baseou-se em comparar as resistências com este tipo de camada e as demais.

Por outro lado, sobre a aplicação das polisilazanas foi realizada uma bateria de testes a fim de se desenvolver um método juntamente com o fornecedor do produto. O item 3.1.2 descreve esta bateria de testes.

A fim de facilitar a análise posterior dos dados, a Tabela III mostra o código de todas as amostras utilizadas e os parâmetros de testes utilizados para cada uma. Como mostrado na Figura 9, a medida que as etapas foram avançando, menos amostras sobravam para os experimentos subsequentes. A letra “t” representa a palavra “teste”. A amostra t28 é a base para comparação, ou padrão, já que é a forma como as resistências eram produzidas antes de se iniciar o trabalho: sem camada de recobrimento e com terminal de latão C260.

Tabela III – Identificação das amostras pelo código

código	concentração da solução massa/massa (polisilazana:xilol)	temperatura e tempo de cura	aplicação camada Ni anterior	liga do terminal
t1	[10:90]	temperatura ambiente / 7 dias	com	latão C 260
t2	[50:50]			
t3	[100:0]			
t4	[10:90]	130 °C / 1 h		
t5	[50:50]			
t6	[100:0]			
t7	[10:90]	temperatura ambiente / 7 dias	sem	
t8	[50:50]			
t9	[100:0]			
t10	[10:90]	130 °C / 1 h		
t11	[50:50]			
t12	[100:0]			
t13	[10:90]	temperatura ambiente / 7 dias	com	inox 304
t14	[50:50]			
t15	[100:0]			
t16	[10:90]	130 °C / 1 h		
t17	[50:50]			
t18	[100:0]			
t19	[10:90]	temperatura ambiente / 7 dias	sem	
t20	[50:50]			
t21	[100:0]			
t22	[10:90]	130 °C / 1 h		
t23	[50:50]			
t24	[100:0]			
t25	-	-	com	inox 304

t26	-	-	com	latão C 260
t27	-	-	sem	inox 304
t28	-	-	sem	latão C 260

3.1.2 Testes para otimização do banho de polisilazana

A metodologia para produção das amostras com a camada de polisilazana foi a seguinte: limpeza da superfície com xilol por 30 segundos, secagem em capela por 30 minutos, imersão na solução polisilazana/xilol por 30 segundos, secagem das peças em capela por 30 minutos e, finalmente, cura. As variáveis analisadas foram as seguintes:

- otimização da concentração da mistura solvente/soluto. O solvente utilizado sempre foi xilol. A concentração variou da seguinte forma (polisilazana: xilol): [10:90], [50:50], [100:0];
- tempo e temperatura de cura: 130 °C por 1 h em estufa sem atmosfera controlada ou 7 dias a temperatura ambiente;
- aplicação de camada superficial de niquelação química anterior;
- tipo de material do terminal: aço inoxidável 304 ou latão C 260;

Tabela IV – Planejamento dos testes com polisilazanas

código	concentração da solução (polisilazana:xilol)	temperatura e tempo de cura	aplicação de camada de niquelação anterior	liga do terminal
t1	[10:90]	temperatura ambiente / 7 dias	com	latão C 260
t2	[50:50]			
t3	[100:0]			
t4	[10:90]	130 °C / 1 h	com	
t5	[50:50]			
t6	[100:0]			
t7	[10:90]	temperatura ambiente / 7 dias	sem	
t8	[50:50]			
t9	[100:0]			
t10	[10:90]	130 °C / 1 h	sem	
t11	[50:50]			

t12	[100:0]			
t13	[10:90]	temperatura ambiente / 7 dias	com	inox 304
t14	[50:50]			
t15	[100:0]			
t16	[10:90]	130 °C / 1 h		
t17	[50:50]			
t18	[100:0]			
t19	[10:90]	temperatura ambiente / 7 dias	sem	
t20	[50:50]			
t21	[100:0]			
t22	[10:90]	130 °C / 1 h		
t23	[50:50]			
t24	[100:0]			

A Tabela IV mostra as variáveis estudadas na aplicação das polisilazanas. Pensando-se em todos os experimentos posteriores, foram produzidas 10 amostras para cada combinação de variáveis planejada. Ademais, para fins de eventual aplicação da tecnologia de nano camada de polisilazana em escala industrial, foram realizados testes de miscibilidade das soluções estudadas e taxa de evaporação com uma placa de Petri.

3.1.3 Testes de vida útil

Este teste consiste em um experimento de vida útil acelerado nos laboratórios da empresa, em que 1 dia de teste equivale a 19,2 dias de uso em campo, considerando que em uma residência se tome 5 banhos por dia no mesmo chuveiro. Os equipamentos disponibilizados para estes testes ficam ligados durante 24 horas, alternando automaticamente o acionamento e desligamento do chuveiro. Para simular condições mais próximas da prática, o chuveiro fica ligado por 10 minutos, desliga por 5 minutos e aciona novamente. O número de 5 banhos por dia em um mesmo chuveiro e o tempo de 10 minutos foram escolhidos através de um estudo interno da ThermoSystem visando descobrir qual é o tempo médio de banho e quantas vezes por dia um mesmo chuveiro é acionado.

O tempo de 5 minutos de inatividade foi selecionado para possibilitar o resfriamento da água e aumentar a severidade do teste, devido à possível fadiga térmica na resistência, o que pode ser um agravante em termos de vida útil em campo.

Com intuito de tornar o experimento mais agressivo, a ducha sempre é acionada na potência máxima. Finalmente, o experimento de vida útil deve ser aprovado estatisticamente, sendo o número de amostras $N = 3$. O N foi planejado com base nos seguintes itens: disponibilidade de equipamentos para execução dos testes, quantidade de testes a serem executados (número N da população multiplicando-se pelas diferentes combinações), tempo médio despendido para a realização de um teste e, finalmente, considera-se o tempo de manutenção dos equipamentos de 20% do tempo total. A Tabela V mostra o planejamento utilizado para estes testes.

A análise foi necessária porque estes testes seriam a etapa que consumiria a maior parte de tempo para desenvolvimento do trabalho. Conforme indicado na Tabela V, seriam necessários aproximadamente 378 dias para a realização de todos os experimentos de vida útil.

Tabela V – Planejamento dos testes de vida útil

quantidade de equipamentos disponíveis	4
população amostral N para cada teste	3
quantidade de diferentes combinações	28
tempo médio estimado para realização de 1 teste	15 dias
tempo total para realização de todos os experimentos	315 dias
tempo total para realização de todos os experimentos + tempo para manutenção dos equipamentos (+ 20%)	378 dias

3.1.4 Testes de corrosão por imersão

A partir dos resultados dos testes de vida útil, foi realizado o experimento de corrosão segundo a Norma ASTM G31 [27], a qual descreve práticas de laboratório para testes de imersão de metais.

Os testes de imersão possuem as seguintes características [27]:

- testes de corrosão por imersão constante. A aceleração dos danos ocasionados pela corrosão pode ser alcançada pelo comprimento do corpo de prova submerso no meio corrosivo;
- rápidos resultados alcançados, conseguidos pela severidade do meio;
- envolvem ciclos alternados de imersão/secagem;

- desde recipientes em formatos de copos até recipientes em formatos espiralados são possíveis para uma simulação mais adequada.

Para os testes de imersão deste trabalho, foi selecionada solução de 1% em peso de NaCl em água, simulando uma água bastante agressiva às resistências. As amostras das 28 diferentes combinações foram retiradas das próprias resistências. Simplesmente cortou-se as mesmas com auxílio de alicate e deixou-se-as submersas por um período de 2 meses. As amostras foram fotografadas periodicamente para acompanhamento da aparência superficial e comparação.

Das 28 combinações de amostras ensaiadas no teste de vida útil, selecionou-se apenas 6, considerando-se a escolha dos melhores parâmetros e custos de aplicação, em função dos resultados obtidos. A Tabela VI identifica quais foram as combinações escolhidas após os testes de vida útil, para sequência do desenvolvimento. O item 5.1.2 (resultado dos testes de vida útil) detalha porque estas combinações foram as escolhidas.

Demais parâmetros do teste: todos os corpos de prova foram retirados de arames liga Kanthal D (aplicada em resistências de chuveiros, ferros de passar, grils), com bitola 0,644 mm de diâmetro de secção transversal, do produto Ducha Multitemperatura 8T da ThermoSystem. A união entre o arame e o terminal foi mecânica, o volume da solução foi de 30 mL e todos os testes foram realizados em condições normais de temperatura e pressão.

Tabela VI – Amostras escolhidas

Testes de Imersão - Resistências		
código	liga terminal	camada superficial
t28	latão	-
t26	latão	niquelada
t13	inox 304	somente polisilazana [10:90], 130 °C, 1 h
t1	latão	somente polisilazana [10:90], 130 °C, 1 h

t27	inox 304	-
t25	inox 304	niquelada

3.1.5 Testes em campo

Os experimentos em campo foram efetuados com monitoramento dos chuveiros nas residências de 10 colaboradores da ThermoSystem do setor de P&D. As amostras foram aleatoriamente distribuídas para colaboradores que residem em Tubarão, Florianópolis, Criciúma e Joinville, a fim de se aumentar as diferentes tipologias de água. Os colaboradores do setor de P&D foram estrategicamente selecionados para facilitar o gerenciamento e acompanhamento das provas.

A etapa de teste em campo está no procedimento operacional da empresa, baseado nos requisitos 7.1 e 7.2 do certificado ISO 9001 [28], ao qual a empresa é recomendada. Esta prática fornece um fluxograma bem como valida todos os testes realizados no desenvolvimento de novos produtos e melhorias.

3.1.6 Lote piloto e acompanhamento de mercado

Depois de realizados todos os experimentos anteriores, o melhor resultado foi aplicado em escala industrial para análise no mercado. Com isso, acompanhou-se o índice de devolução para corroborar a eficácia da melhoria por intermédio de análises estatísticas. Caso o índice de devoluções fosse reduzido, devido à melhoria implantada, o objetivo teria sido alcançado.

Esta fase de lote piloto também está contemplada no procedimento operacional da empresa.

4 MATERIAIS E CARACTERIZAÇÕES

Neste item, inicialmente serão apresentados e justificadas as escolhas dos materiais e camadas superficiais.

4.1 MATERIAIS

Primeiramente serão apresentados os tipos de ligas utilizados na fabricação dos arames, bem como dos terminais das resistências elétricas. Depois, serão detalhados os tipos de camada superficial e a explicação do porque da seleção de tais camadas para o desenvolvimento do trabalho.

4.1.1 Ligas metálicas aplicadas na resistência

A empresa adotava como padrão a utilização de uma liga de aço inoxidável ferrítico Cr23Al5Fe, 23% de cromo, 5 de alumínio e restante de ferro, para o arame; e uma liga de latão C260, 70% de cobre e 30% de zinco, para o terminal. Os dois materiais empregados serão apresentados na sequência com algumas comparações pertinentes para explicar as tentativas de substituição.

4.1.1.1 Materiais empregados nos arames da resistência

O material aplicado no arame do resistor elétrico é uma liga de aço inoxidável ferrítico Cr23Al5Fe. A escolha foi efetuada tendo em vista a alta resistividade elétrica da liga. Quanto maior a resistividade elétrica (ρ), mais potência (P) pode ser alcançada para um mesmo comprimento de fio, o que reduz a quantidade de matéria prima a ser empregada [29]. Portanto, a propriedade ρ deve ser criteriosamente analisada e selecionada devido a dois motivos: economia de material e, com isso, possibilidade de projetos fisicamente reduzidos. A Tabela VII informa a composição química de algumas ligas aplicadas em resistores em percentual de peso, a resistividade elétrica, o ponto de fusão e o custo relativo das mesmas.

Analisando a Tabela VII, conclui-se que o material mais indicado a ser aplicado em arames de resistores elétricos é a liga Kanthal D. Isto se explica devido à alta resistividade elétrica e custo cerca de 1/3 do custo da liga com teoricamente maior resistência à corrosão (Nikrothal 80). A liga AISI 304 mesmo sendo a menos custosa, é inviável devido à baixa resistividade elétrica, sendo necessário muita matéria prima

(comprimento de fio elevado) para atingir elevadas potências, impossibilitando projetos fisicamente reduzidos.

Tabela VII – Possíveis materiais a serem aplicados em arames de resistores elétricos [27]

Liga	Kanthal D	Alkrothal	Nikrothal N80	AISI 304
Tmáx. de trabalho (°C)	1300	1100	1200	1800
Cr (% peso)	22	15	20	18
Al (% peso)	4,8	4,3	-	-
Fe (% peso)	Restante	Restante	-	Restante
Ni (% peso)	-	-	80	8
ρ a 20 °C ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	1,35	1,25	1,09	0,7
Ponto de fusão (°C)	1500	1500	1400	2600
Fator de ρ com temperatura (250 °C)	1,01	1,02	1,02	1
Custo relativo (%)	33	35	100	14

4.1.1.2 Materiais empregados nos terminais da resistência

Para os terminais a liga padrão é latão C 260, ou seja, 70% de cobre e 30% de zinco. A estampabilidade deste material é extremamente alta, visto que se trata de uma liga CFC, recozida. Por outro lado, a resistência à corrosão do conjunto arame mais terminal é prejudicada devido à diferença de potencial elétrico das duas ligas. É muito comum a ocorrência de corrosão galvânica. A Figura 11 mostra um exemplo de rompimento devido à corrosão após o uso.

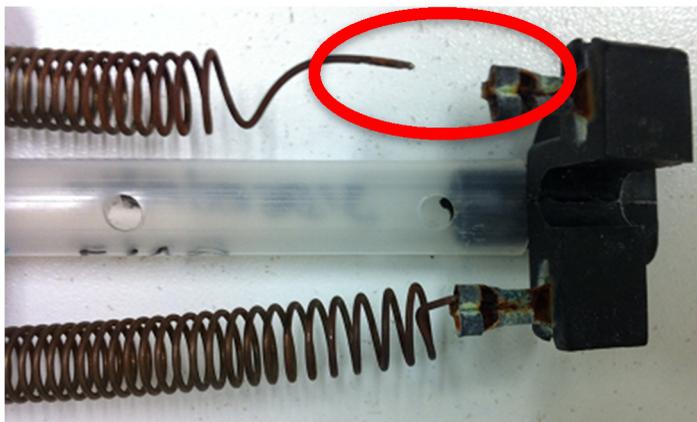


Figura 11 – Exemplo de rompimento devido à corrosão após uso em campo

O aço AISI 304 possui maior resistência à corrosão do que o latão (por ter composição de 18% de cromo e 8% de níquel), composição química muito mais parecida com a liga utilizada no arame quando em comparação com o latão C 260, o que reduz o risco de corrosão galvânica e é um aço inoxidável com relativa alta conformabilidade mecânica quando comparado aos outros aços inoxidáveis. Por isso, o mesmo foi escolhido para os testes de substituição de material do terminal.

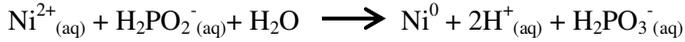
4.1.2 Materiais das camadas superficiais

Para as experiências de revestimento com camadas superficiais, foram aplicadas micro camadas de níquel e nanocamadas de polisilazanas (material polimérico).

4.1.2.1 Camada de níquel

Utilizou-se o método de revestimento por redução química, ou comercialmente conhecido como niquelação química (procedimento dominado pelo fornecedor da ThermoSystem). Este tipo de revestimento é obtido de íons metálicos existentes na solução. O metal é precipitado, formando uma base aderente à capa metálica. É um método conveniente para revestir peças de geometria complexa e interior de tubos que sejam

difíceis de serem revestidos por outros métodos. Como exemplo deste método tem-se a niquelação sem corrente elétrica, na qual se utiliza sal de níquel e, como redutor, solução de hipofosfito de sódio. Ocorre a reação:



O depósito de níquel contém de 8 a 10% de fósforo apresentando boa resistência à corrosão e forte aderência.

Uma solução redutora utilizada para essa niquelação é a seguinte:

NiCl ₂ .6H ₂ O (cloreto de níquel hexa-hidratado)	30 g/L
NaH ₂ PO ₂ . H ₂ O (hipofosfito de sódio)	10 g/L
H ₃ CCOONa (acetato de sódio)	50 g/L
pH	4-6

Pode-se citar como aplicações desta metodologia de revestimento: peças de máquinas, eixos, polias, engrenagens, prensas, êmbolos, bombas para cerveja, diodos, relês, acessórios tubulares, etc.

4.1.2.2 Camada de polisilazana

Quanto à camada de nanomaterial polimérico, as polisilazanas, testes de recobrimento foram executados devido à capacidade de aplicação em superfícies de materiais gerando proteção contra corrosão. Isto é possibilitado devido à reação das polisilazanas com superfícies úmidas e polares, formando uma camada parecida a um verniz [30].

Polisilazanas são compostos em que silício e nitrogênio formam a base da estrutura. Cada átomo de silício está ligado a dois átomos separados de nitrogênio e cada átomo de nitrogênio está ligado a dois átomos separados de silício. A cadeia é completada por átomos de hidrogênio. A Figura 12 mostra um exemplo de estrutura molecular de polisilazana [30].

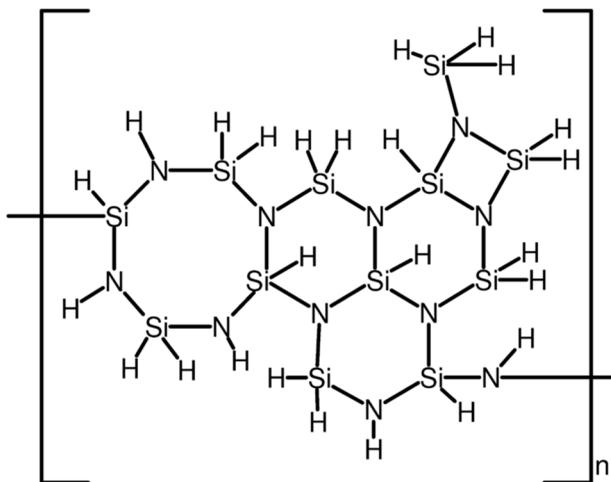


Figura 12 – Estrutura molecular idealizada de perhidropolisilazana [30]

4.2 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para complementar os testes práticos descritos durante a metodologia, algumas caracterizações e análises foram realizadas para estudo mais detalhado acerca das novas soluções em materiais.

As caracterizações finais foram as seguintes:

- análise de fotomicrografias obtidas por MEV;
- análises qualitativas de composição química através de EDX;
- experimento de corrosão: névoa salina.

4.2.1 Análises via MEV e via EDX

A caracterização via MEV é utilizada quando deseja-se investigar minuciosamente um material sólido. Através do microscópio eletrônico de varredura, ou MEV, pode-se enxergar camadas nanométricas de um sólido. Estas análises fornecem uma rica quantidade de informações, as quais são utilizadas para caracterizar e classificar os vários tipos de materiais existentes [31, 32].

As imagens mais frequentemente utilizadas são as de elétrons secundários, fornecendo informações como relevo da amostra e

porosidade; e as de elétrons retro-espalhados, as quais geram uma ideia de composição química da amostra [31, 32].

No presente estudo, a técnica foi utilizada para investigar as amostras tanto quanto aos produtos da corrosão bem como quanto às camadas superficiais aplicadas: niquelação e polisilazanas. Utilizou-se um equipamento da marca Jeol, modelo SSM-6390LV, instalado do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da UFSC.

Já a técnica de EDX é empregada por intermédio de uma sonda de Energia Dispersiva por Raios-X (EDX), a qual geralmente fica acoplada a um MEV, viabilizando a investigação no momento em que se está realizando uma análise de microscopia eletrônica de varredura.

O principal intuito desta caracterização é de informar qualitativamente quais são os elementos químicos existentes no sólido.

4.2.2 Testes de névoa salina

Estes procedimentos foram realizadas conforme norma ASTM B 117 – 03 [33]. Tal método de avaliação é bastante comum para avaliar o comportamento de materiais em relação à eventual corrosão em variados meios [21, 34].

Para este estudo, somente algumas combinações de amostras foram investigadas, já que a ideia era focar a avaliação no arame. Portanto, somente foram avaliados corpos de prova considerando-se os diferentes tipos de camadas superficiais estudados, conforme indicado na Tabela VIII.

Tabela VIII – Planejamento dos testes de névoa salina

código	liga terminal	camada superficial
t28	latão	-
t26	latão	niquelada
t12	latão	somente polisilazana [100:0], 130 °C por 1 h
t1	latão	somente polisilazana [10:90], 130 °C por 1 h
t11	latão	somente polisilazana [50:50], 130 °C por 1 h

Os testes consistem em avaliar-se as peças submetidas ao meio corrosivo em função do tempo. Para isto, foram capturadas imagens das amostras após 48 h e após 113 h. Os tempos foram planejados tendo por

objetivo, examinar-se o comportamento dos diferentes tipos de amostras.

Antes de iniciar-se os experimentos, todas as amostras passaram pelo processo de lavagem em um Soxlet (três ciclos). A solução empregada foi NaCl 5%, isto é 5 partes de NaCl para 95 partes de água. Os corpos de prova foram fixados em fios de náilon para identificação. A temperatura da câmara foi de 35 °C, conforme Norma ASTM B 117 – 03.

As resistências foram distribuídas nas barras 1 e 2, conforme o esquema da Figura 13 e foto da Figura 14 a seguir:

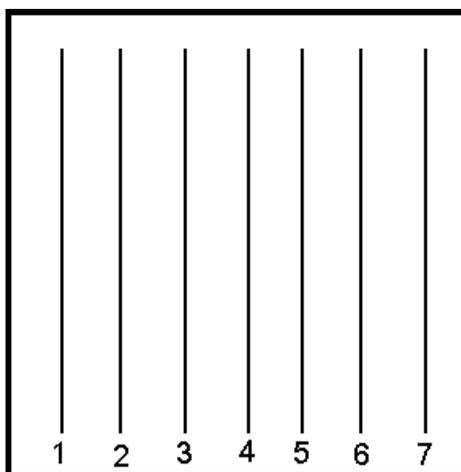


Figura 13 – Esquema mostrando as barras da câmara



Figura 14 – Foto exibindo o posicionamento real das barras com os conjuntos de resistências (arame + terminal) selecionados

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente serão apresentados e discutidos os resultados referentes à metodologia de trabalho e, por fim, os resultados das caracterizações realizadas.

5.1 RESULTADOS DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A fim de relatar os resultados alcançados, a seguinte sequência será descrita: testes de imersão segundo a Norma ASTM G31 [27], testes de vida útil, teste em campo na casa de 10 colaboradores da ThermoSystem e acompanhamento do lote piloto com análise comparativa do índice de devoluções, antes e depois da implantação da melhoria.

5.1.1 Testes para otimização do banho de polisilazana

Como parâmetros de teste foram analisados:

- concentração de polisilazana e do solvente xilol;
- tempo de cura;
- temperatura de cura;
- existência, ou não, de camada de niquelação anterior;
- liga do terminal elétrico.

Depois de aplicadas as camadas, alguns testes preliminares de vida útil foram realizados a fim de averiguar-se a influência das mesmas nas amostras. Após esta investigação foi constatado que a camada ideal tendo em vista a relação custo / benefício é a que contém 10% de polisilazana.

Sobre a temperatura e tempo de cura, foi escolhido 130 °C por 1 h, reduzindo-se o tempo de aplicação em comparação a 24 h em temperatura ambiente. Caso necessitasse esperar 24 h para a cura, o procedimento tornar-se-ia inviável levando-se em conta a linha de montagem da empresa, pois se constituiria numa etapa bastante demorada, a qual aumentaria o custo final de produção, sem agregar valor.

Para as camadas de polisilazanas aplicadas sobre as amostras que já continham uma camada de níquel, o resultado não foi satisfatório, visto que não existia aderência desta nova camada.

Quanto à aplicação da camada de polisilazana sobre o material do terminal, nenhuma dificuldade foi encontrada.

Apesar das análises preliminares citadas, decidiu-se testar todas as combinações em vida útil tendo em vista buscar-se o melhor desempenho independentemente de custo de matéria-prima e processo. Para os testes seguintes (vida útil, imersão, campo e lote piloto), apenas os melhores resultados foram experimentados.

5.1.2 Testes de vida útil

Dos testes de rápida duração (vida útil e imersão), os testes de vida útil certamente são os mais importantes na escolha da melhor combinação para a sequência do trabalho, já que a simulação do componente em serviço é real, ou seja, a resistência é montada no chuveiro e todos os tipos de esforços a qual é submetida ocorrem na prática.

Conforme já informado na Tabela III, várias combinações foram experimentadas. Os resultados obtidos estão indicados na Tabela IX. Para cada combinação, testaram-se 10 amostras a fim de obter-se uma melhor confiabilidade estatística.

Analisando-se a Tabela IX, percebe-se que o teste t25 (camada de niquelação e terminal inox), apresentou o melhor resultado, já que resistiu 1210 dias em vida útil, seguido pelo teste t27, com 691 dias (sem camada e com terminal inox).

Já pela Tabela percebe-se que todos os testes sem camada de polisilazana resistiram mais do que os testes nos quais a camada polimérica foi aplicada.

Para aprimorar o exame dos resultados obtidos, foram plotados quatro gráficos a fim de se fazer análises combinatórias das variáveis. As linhas verticais sobre as barras nos gráficos representam os desvios padrão. Os dados confrontados foram:

- Durabilidade média em dias de vida útil, concentração de camada de polisilazana;
- Durabilidade média em dias de vida útil, tempo e temperatura de cura da camada de polisilazana;
- Durabilidade média em dias de vida útil, camada de Ni anterior à aplicação da camada de polisilazana;
- Durabilidade média em dias de vida útil, tipo de liga do terminal;
-

Tabela IX – Resultado dos testes de vida útil

código	concentração (polisilazana:xilol)	tempo e temperat. de cura	aplicação camada Ni anterior	liga terminal	resultado vida útil (média de dias)
t1	[10:90]	TA / 7 dias	com	latão C 260	192
t2	[50:50]				57,6
t3	[100:0]				0
t4	[10:90]	130 °C / 1 h			211,2
t5	[50:50]				96
t6	[100:0]				0
t7	[10:90]	TA / 7 dias	sem		172,8
t8	[50:50]				38,4
t9	[100:0]				0
t10	[10:90]	130 °C / 1 h			153,6
t11	[50:50]				96
t12	[100:0]				0
t13	[10:90]	TA / 7 dias	com	inox 304	230,4
t14	[50:50]				57,6
t15	[100:0]				0
t16	[10:90]	130 °C / 1 h			211,2
t17	[50:50]				115,2
t18	[100:0]				0
t19	[10:90]	TA / 7 dias	sem		441,6
t20	[50:50]				134,4
t21	[100:0]				0
t22	[10:90]	130 °C / 1 h			384
t23	[50:50]				153,6
t24	[100:0]				0
t25	-	-	com	inox	1209,6

				304	
t26	-	-	com	latão C 260	499,2
t27	-	-	sem	inox 304	691,2
t28	-	-	sem	latão C 260	326,4

O primeiro gráfico, indicado na Figura 15, mostra que, em média, as amostras recobertas com a concentração com 10% de polisilazana e 90% de solvente [10,90] duraram 250 dias, as amostras recobertas com concentração [50,50] 94 dias, as amostras recobertas com concentração [100,0] 0 dias e as amostras sem camada de polisilazana apresentaram vida útil média de 682 dias. Comparando-se os dois melhores resultados: sem camada e [10,90], verificou-se que os testes sem camada de polisilazana apresentam 63% a mais de vida útil quando em operação.

Tal resultado mostrou que existe uma tendência de diminuição da durabilidade do componente em função do aumento da quantidade de polisilazana. Tanto é que com 100% de polisilazana os resistores rompiam assim que eram ligados pela primeira vez. Provavelmente o fenômeno ocorria devido ao isolamento térmico proporcionado pela camada, já que o constituinte principal do material é a sílica.

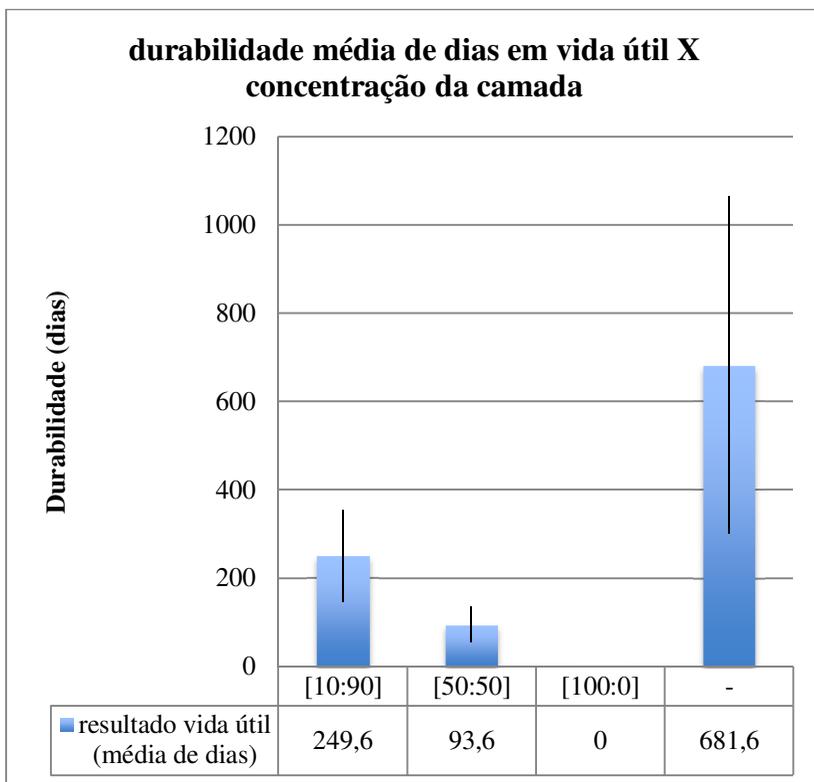


Figura 15 – Resultado durabilidade X concentração da camada de polisilazana

O segundo gráfico, indicado na Figura 16, mostra que em média as amostras curadas à temperatura ambiente durante sete dias apresentaram 110 dias de vida útil. Já os corpos de prova curados a 130 °C por 1 h suportaram 118 dias de vida útil. Caso a camada de polisilazana fosse aprovada, certamente iria se aplicar a cura a 130 °C por 1 h, pois além de gerar cerca de 7% a mais de durabilidade, para a linha de produção seria um processo muito mais ágil comparando-se à outra metodologia experimentada.

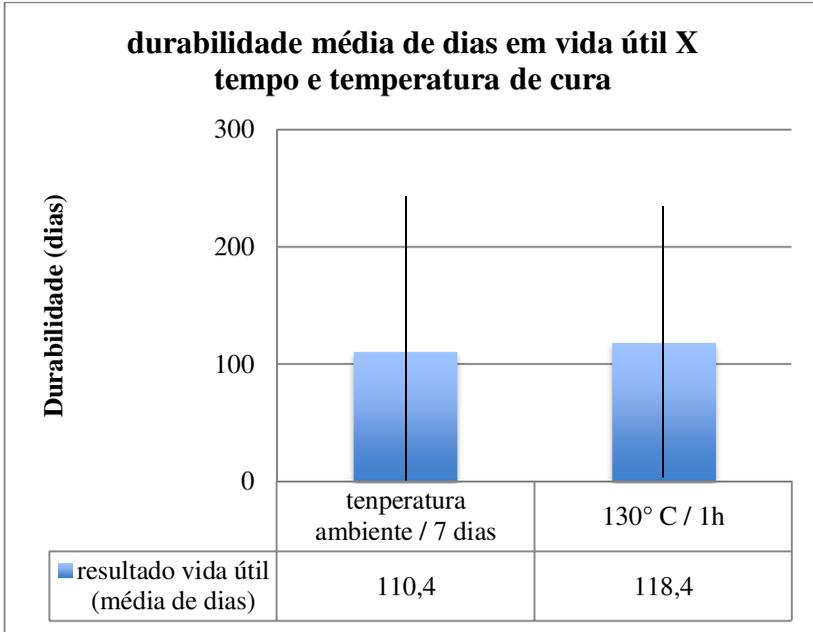


Figura 16 – Resultado durabilidade X tempo e temperatura de cura da camada de polisilazana

Analisando-se o terceiro gráfico, Figura 17, percebe-se que os corpos de prova com camada de niquelação anterior apresentaram, em média, 206 dias em vida útil, enquanto que as amostras sem camada de niquelação anterior à aplicação da camada de polisilazana suportaram 185 dias. Este resultado já era esperado, pois segundo a bibliografia consultada [14], as camadas de niquelação aumentam a resistência à corrosão do componente. Entretanto, mesmo com a diferença de aumento de vida útil em 10%, dificilmente a metodologia seria implementada, devido ao alto custo para aplicação dos dois tipos de camada. Para aprovação da aplicação das duas camadas o resultado deveria ser muito superior a 10% para tornar-se viável economicamente.

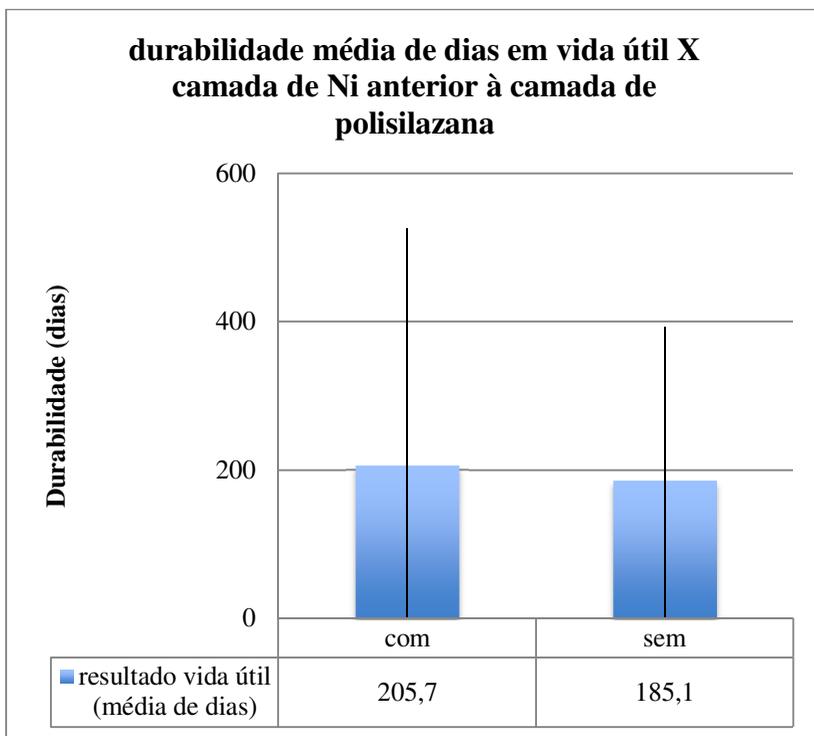


Figura 17 – Resultado durabilidade X camada de niquelação anterior à camada de polisilazana

O quarto gráfico, apresentado na Figura 18, informa que as resistências montadas com o terminal de latão C260 resistiram, em média, 132 dias. Já as montadas com o terminal de aço inoxidável 304, duraram 259 dias em vida útil, o que representa 50% a mais de vida útil. Este resultado também já era esperado, pois segundo a literatura, além de o aço inoxidável possuir uma resistência à corrosão muito superior ao latão, não foi observada a corrosão galvânica.

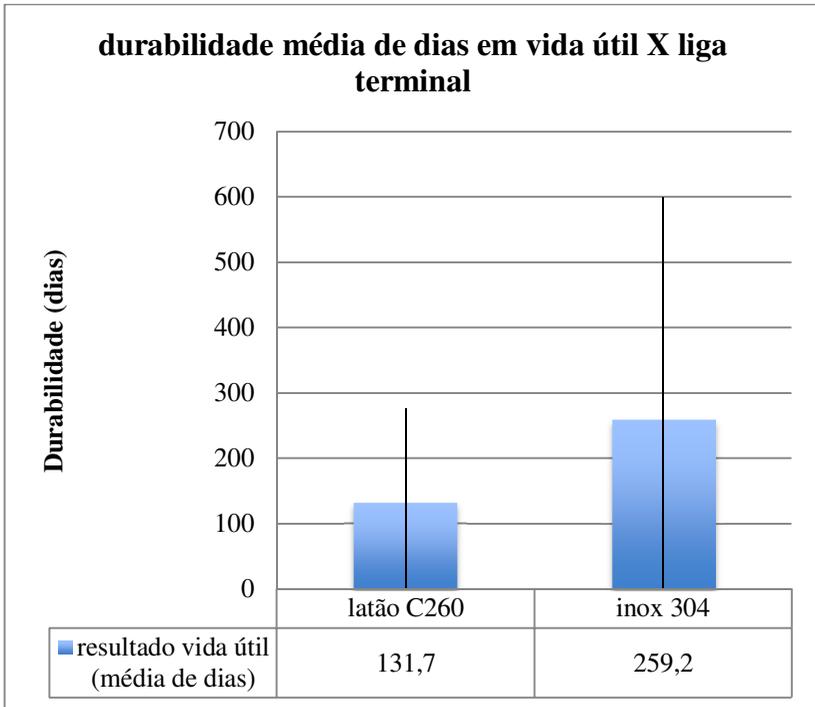


Figura 18 – Resultado durabilidade X liga do terminal para qualquer camada

O quinto e último gráfico, apresentado na Figura 19, indica que as amostras recobertas somente com camada de niquelação no conjunto arame e terminal obtiveram o melhor desempenho, com uma média de 854 dias em vida útil. Também é percebido que as resistências sem camada duraram, em média, 509 dias em vida útil e que as amostras que obtiveram recobrimento de polisilazana e niquelação mais polisilazanas não desempenharam bem nos testes, resistindo 131 dias e 98, em média, respectivamente.

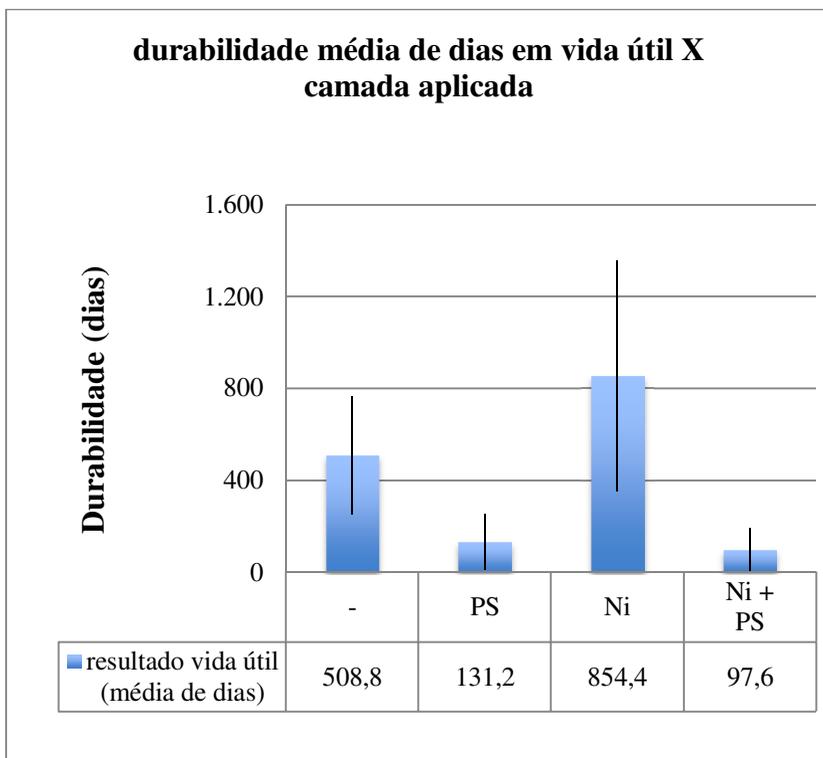


Figura 19 – Resultado durabilidade X tipo de camada aplicada (sem camada, somente polisilazana, somente niquelação, niquelação + polisilazana)

Finalmente, sobre os testes de vida útil, conclui-se que:

- Os dois parâmetros de cura de polisilazana, analisados, não interferem de maneira significativa na vida útil das resistências;
- A camada de niquelação anterior à aplicação da camada de polisilazana não aumenta substancialmente a durabilidade do componente em serviço;

- O terminal de aço inoxidável suporta o dobro de tempo em uso comparado ao terminal de latão;
- A camada de polisilazana não aumenta a durabilidade do resistor;
- A aplicação somente de camada de niquelação e terminal inox apresentou sem sombra de dúvidas o melhor resultado, já que a amostra t25 suportou, em média, 1210 dias em vida útil. Logo na segunda posição veio a amostra t27, a qual possui terminal inox e não possui camada superficial (691 dias). Na terceira posição aparece o t26, com 499 dias em vida útil, o qual possuía camada de niquelação e terminal de latão. Todos os outros experimentos obtiveram resultados piores.

Com base nestes resultados, como a quantidade de peças é pequena, decidiu-se utilizar somente o melhor resultado (t25) para os testes em campo. Já para o lote piloto, prevendo-se possíveis complicações com a aplicação do terminal em aço inox, decidiu-se utilizar as três melhores combinações (t25, t27 e t26).

A partir das primeiras análises, já foram vislumbrados os melhores resultados. Então, embora experimentadas para os testes subsequentes apenas as amostras mais promissoras, a título de investigação científica, todos os testes planejados anteriormente foram executados. Esta decisão deu agilidade à implantação da melhoria em linha industrial, pois já a partir do primeiro semestre de 2011 foi realizado o lote piloto.

5.1.3 Testes de corrosão por imersão

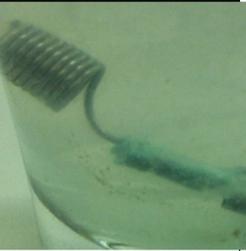
Os materiais analisados nesta bateria de testes foram as resistências já conformadas, unidas (terminal e arame), montadas e prontas para aplicação. Todos os corpos de prova permaneceram submersos em uma concentração de 1% em peso de NaCl em água, conforme recomendação da Norma ASTM G31 [27], a qual sugere que os testes sejam realizados, quando possível, em uma solução parecida com aquela na qual o componente é submetido quando em operação. Ademais, cuidados foram tomados no sentido de manter-se a temperatura constante, em torno de 20 °C a 22 °C, bem como todos os recipientes foram vedados para minimizar a evaporação da solução.

Fotografias foram capturadas no primeiro dia, depois de 10 dias e depois de 90 dias de imersão dos resistores. A fim de comparação, todas as combinações foram analisadas. Buscou-se fotografar a região de acoplamento entre terminal e arame, para examinar a ocorrência de

corrosão galvânica. Analisaram-se também as variáveis material do terminal e banho aplicado.

Os resultados são mostrados através das fotografias, na Tabela X.

Tabela X – Resultado dos testes de imersão

	0 dias	10 dias	90 dias
t28			
t26			
t13			
t1			



A fim de facilitar o entendimento da Tabela X, conforme já detalhado no item 3.1.1, os códigos significam:

- t28 = liga do terminal de latão, sem camada superficial;
- t26 = liga do terminal de latão, camada superficial de niquelação;
- t13 = liga do terminal de inox 304, camada superficial de polisilazana, concentração [10:90], curada em estufa a 130 °C, por 1 hora;
- t1 = liga do terminal de latão, camada superficial de polisilazana, concentração [10:90], curada em estufa a 130 °C, por 1 hora;
- t27 = liga do terminal de inox 304, sem camada superficial;
- t25 = liga do terminal de inox 304, camada superficial de niquelação;

Analisando-se as amostras, é visível que a amostrat28 apresentou o pior comportamento. Isso se percebe pela coloração esverdeada na superfície do terminal elétrico. O efeito ocorre devido à corrosão do cobre (latão), ou seja, existe a formação de uma camada de zinabre ou patina verde (formação de sulfetos de cobre ou, neste caso, cloretos de cobre), indicando que o material de latão apresentou oxidação. Geralmente a formação de patinas verdes está ligada ao contato de ligas de cobre com água [35].

A diferença entre as amostras t28 e t26 é que a segunda possui uma camada de niquelação adicionada à superfície dos dois componentes da

resistência. Visivelmente, a formação de zinabre é menor, o que indica que a resistência à corrosão melhorou neste teste em comparação ao primeiro.

Sobre as amostras t13 e t1, em que aplicou-se a camada de polisilazana, percebeu-se que a oxidação foi menor para o t13, o qual possuía o terminal em aço inox 304. Embora menor do que na amostra t28, mesmo com a camada superficial de polisilazana, percebeu-se uma leve formação de zinabre na amostra t1, a qual possuía terminal em latão.

Analisando-se a t27, a qual era formado por terminal inox 304 e sem camada protetora, o resultado foi melhor do que todos os três testes com aplicação do terminal em latão. Entretanto, o melhor de todos os testes foi o t25, o qual apresentou melhor qualidade superficial depois dos testes e era constituído por um terminal de inox 304 e recobrimento com niquelação no conjunto arame e terminal elétrico.

Como conclusão dos testes de imersão, qualitativamente verificou-se que o terminal de inox 304 comporta-se melhor do que o terminal de latão para todas as variações de camadas. Ademais, o melhor resultado obteve-se com o terminal de inox 304 e camada de níquel (t25). Isto acontece devido a dois motivos, conforme descrito na revisão da bibliografia: primeiro que o aço inoxidável 304 possui uma maior resistência à corrosão comparando-se com o latão C 260. Segundo, a camada de niquelação ajudou a aumentar esta resistência à corrosão. O fator que permitiu concluir que a camada de níquel se mostrou mais efetiva no combate à corrosão do que a de polisilazana foi o resultado dos testes de vida útil, já apresentado e discutido no item 5.1.2.

5.1.4 Testes em campo

Como explicado anteriormente na metodologia, a melhor combinação em vida útil seria experimentada em campo. O melhor resultado obtido foi: somente camada de niquelação e terminal em aço inoxidável 304, amostra t25.

Foram distribuídas 10 resistências para 10 colaboradores do setor de P&D da ThermoSystem, que as colocaram em seus chuveiros e acompanharam a durabilidade das mesmas. Como não havia um histórico de quanto tempo, em média, cada resistência permaneceria em operação, nas residências dos colaboradores escolhidos os testes de vida útil foram apenas qualitativos. Os resultados dos testes estão descritos

na Tabela XI, a qual mostra o nome do colaborador, cidade, fornecimento de água, data de instalação.

Como pode ser observado na Tabela XI, as resistências das amostras t25 estão em operação desde o mês de fevereiro de 2012 nas residências dos 10 colaboradores, espalhadas por 4 diferentes cidades: Tubarão, Florianópolis, Joinville e Jaguaruna. Segundo acompanhamento, após um ano e cinco meses nenhuma resistência apresentou problema.

Tabela XI – Acompanhamento dos testes em campo

Colaborador	Fornecimento Água	Instalação
Alceu Davet	Concessionária Joinville	19/02/12
André Martins	Concessionária Tubarão	16/02/12
Carlaine A bilino	Concessionária Tubarão	16/02/12
Eduardo da Silva	Concessionária Fpolis	19/02/12
Gabriel Beltrame	Poço artesiano	17/02/12
José Cardoso	Concessionária Tubarão	16/02/12
Lauro Pilatti	Concessionária Fpolis	19/02/12
Lucas Pagani	Concessionária Tubarão	16/02/12
Mayara Ramos	Concessionária Fpolis	19/02/12
Nicholas Gomes	Concessionária Tubarão	16/02/12

5.1.5 Lote piloto e acompanhamento de mercado

Anteriormente aos testes em campo, a linha de produção da ThermoSystem montou uma grande quantidade de resistências com camada de niquelação e terminal de latão (t26 – terceiro melhor resultado) para lote piloto e acompanhamento no mercado. Esta medida foi tomada porque percebeu-se que para aplicar um terminal inoxidável (amostras t25 e t27) em linha de produção necessitaria-se de um melhor desenvolvimento do componente, devido à dificuldade de montagem (etapa de união entre arame e fio), o que inviabilizaria a melhoria.

Isto aconteceu já no primeiro semestre de 2011. Desde então e até julho de 2012, o índice de devoluções foi monitorado a fim de analisar-se a eficácia da melhoria provocada pela alteração dos materiais, para a resistência. Na sequência são apresentados quatro diagramas de Pareto para o produto Ducha 8T, da ThermoSystem (Figura 20), quando houve

um surto de devoluções de duchas devido aos problemas relacionados à queima da resistência, julho de 2011 (Figura 21), janeiro de 2012 (Figura 22) e julho de 2012 (Figura 23), todos para amostras niqueladas e com terminal de latão.

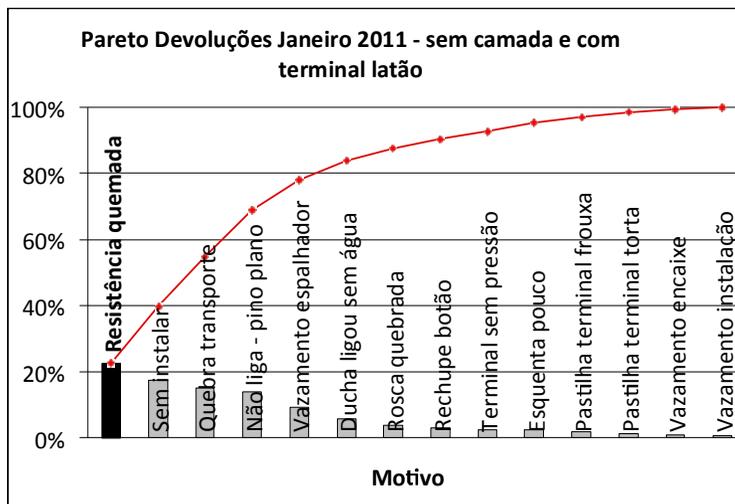


Figura 20 – Diagrama de Pareto: devoluções Ducha 8T jan/2011

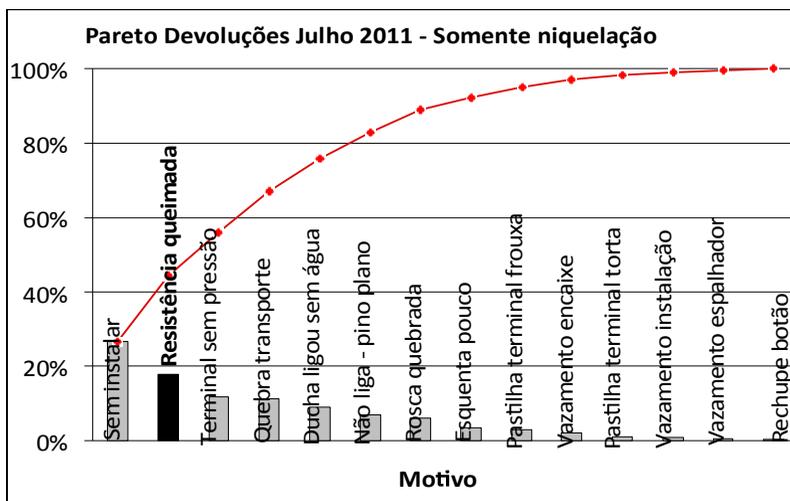


Figura 21 – Diagrama de Pareto: devoluções Ducha 8T jul/2011

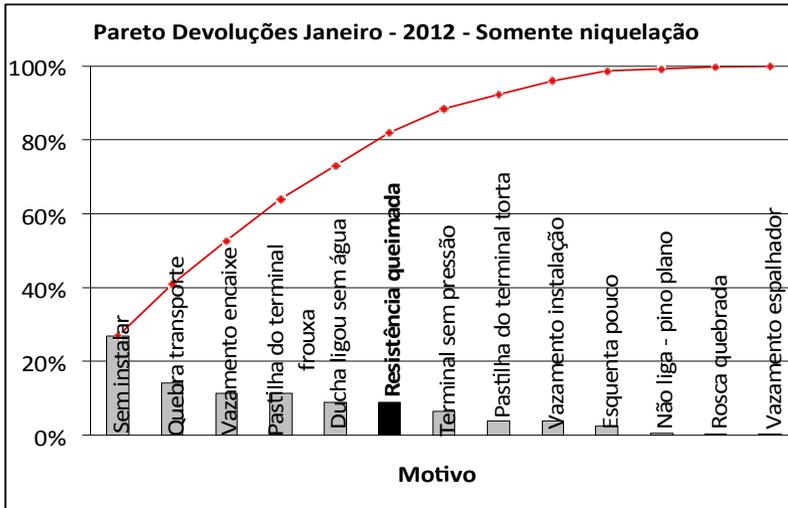


Figura 22 – Diagrama de Pareto: devoluções Ducha 8Tjan/ 2012

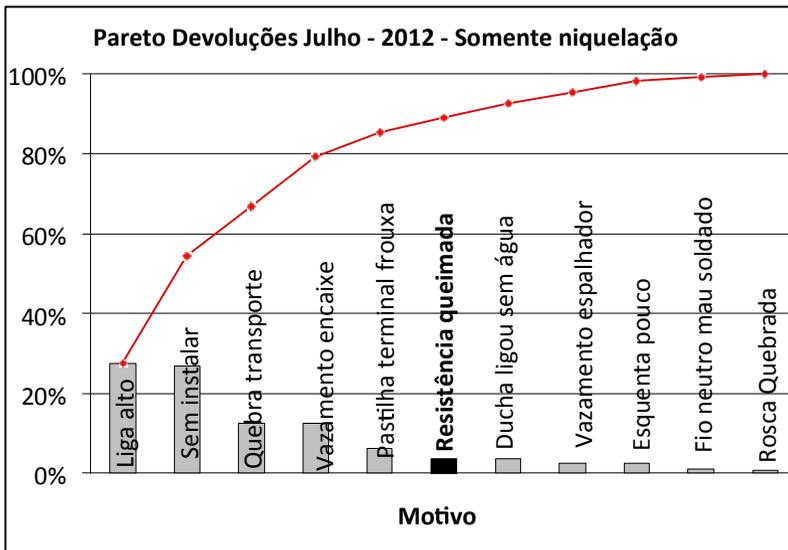


Figura 23 – Diagrama de Pareto: devoluções Ducha 8T jul/2012

Os resultados mostram que as devoluções de Duchas 8T relacionados à problemas com a resistência elétrica vem caindo substancialmente (de 23% para 3%) nos últimos meses.

Como aprimoramento, sugere-se um estudo mais forte na área de conformação mecânica (desenvolvimento de uma ferramenta com maior vida útil) para viabilizar a produção de uma resistência que tenha terminal de aço inoxidável e camada de niquelação para aumentar-se ainda mais o tempo de vida útil do componente em trabalho.

5.2 RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES

Para descrever os resultados obtidos com os testes de caracterização, a seguinte sequência será apresentada: análises por MEV, investigações de composição química via EDX e teste de névoa salina segundo a Norma ASTM B 117 – 03 [33].

5.2.1 Análises via MEV e EDX

Durante o trabalho, algumas análises via MEV e EDX foram executadas com o intuito de investigar-se a superfície das peças após uso e após aplicação das camadas protetoras de superfície. Inicialmente, serão mostradas fotomicrografias de resistências elétricas que apresentaram corrosão após uso. Na sequência as camadas superficiais serão analisadas.

As duas próximas fotomicrografias mostram uma resistência genérica (t28 – padrão, sem camada e terminal de latão) a qual foi analisada após uso em campo. Na Figura 24 está identificado o corte com alicate, para adequação da amostra ao MEV, a região de início de trinca e a região de fratura.

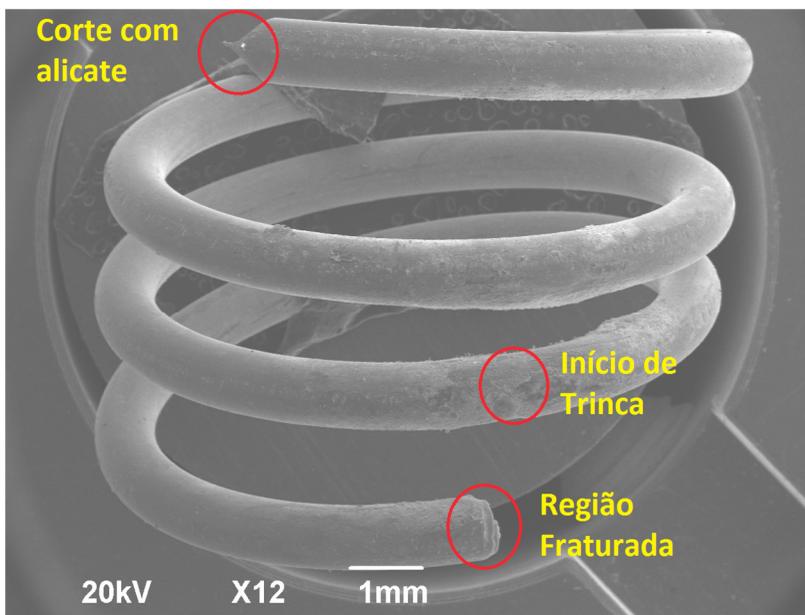


Figura 24 – Amostra com trinca e área com produtos de corrosão

Já na Figura 25, está ampliada a área de início da trinca da Figura 24. Percebe-se claramente que as trincas se originam em regiões de transição. Estas regiões foram analisadas quimicamente e foi constatada a presença de agentes promotores e de produtos de corrosão.

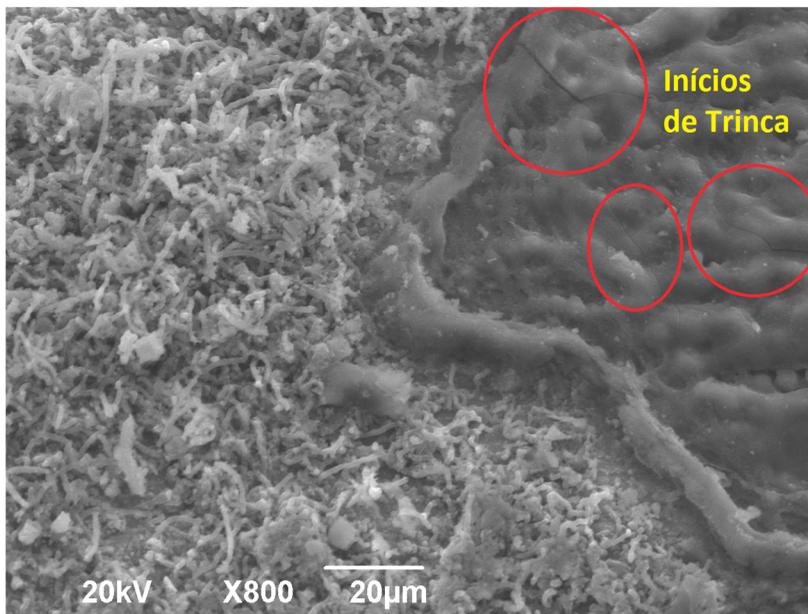


Figura 25 – Amostra com início da trinca e área com produtos de corrosão – vista da superfície

A presença de cálcio, existente em águas duras, evidencia um agente de corrosão e a presença de carbono indica a própria corrosão. Provavelmente a resistência foi utilizada em um local onde existia água dura. As Figuras 26, 27 e 28 mostram exemplos de análises químicas.

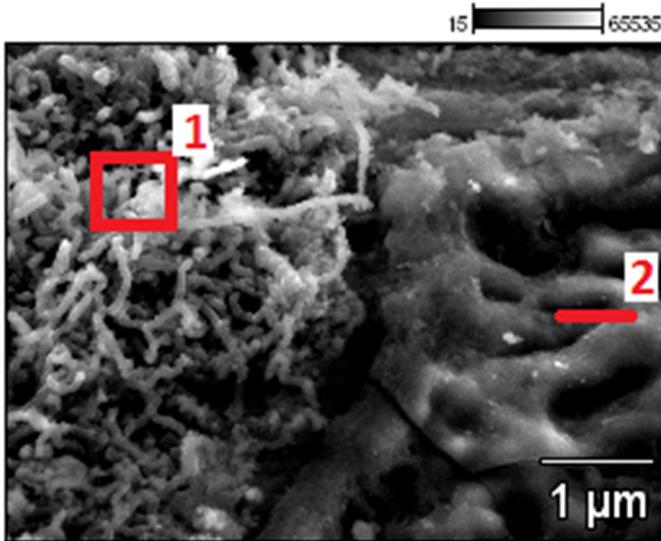


Figura 26 – Locais onde foram realizadas as análises químicas – vista da superfície

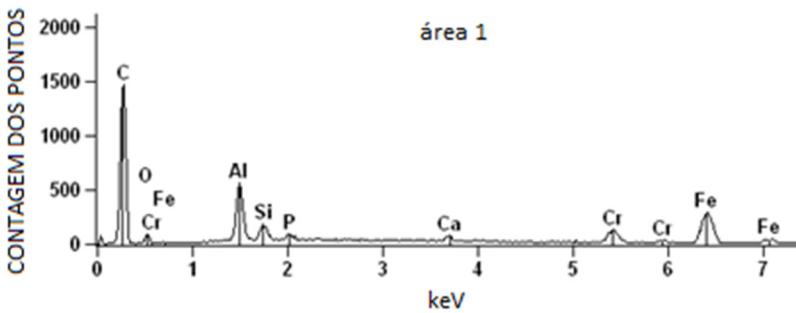


Figura 27 – Resultado da análise química realizada da área 1 da Figura 26

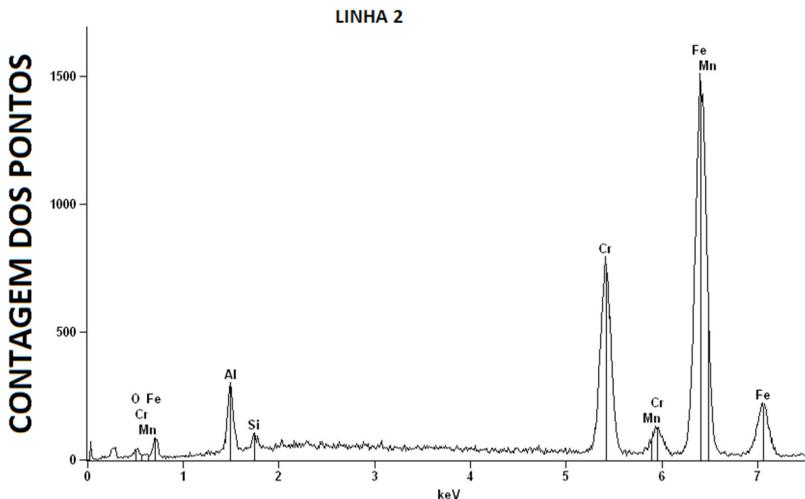


Figura 28 – Resultado da análise química realizada na linha 2 da Figura 26

A Figura 29 apresenta uma resistência t28, padrão – sem camada superficial e terminal de latão C260, após uso em campo a qual teve o rompimento na região de contato entre o arame de aço inoxidável Cr23Al5Fe e o terminal, ou seja, o componente sofreu o fenômeno de corrosão galvânica. O “efeito pilha” fica evidente, pois percebe-se que o terminal vai aumentando a sua espessura em detrimento da área de secção transversal do arame, a qual se reduz até que a fratura aconteça.

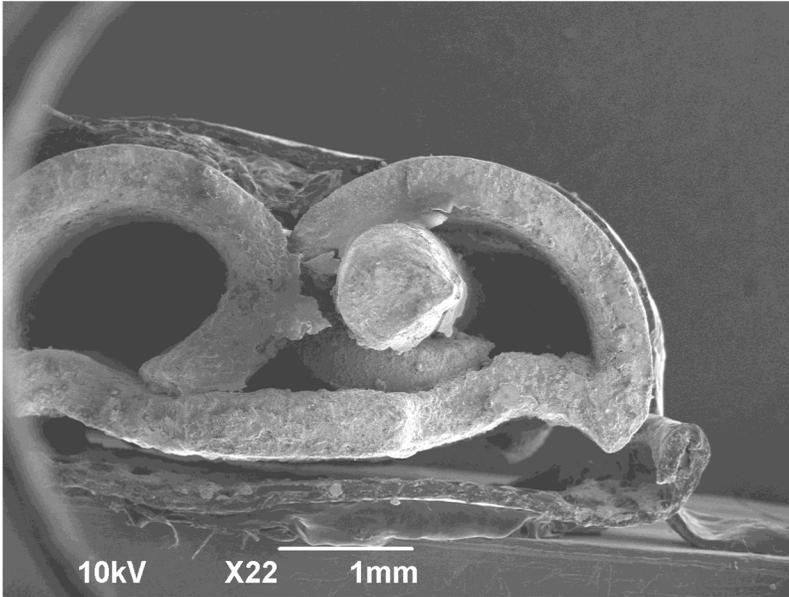


Figura 29 – Amostra após uso: ruptura devido à corrosão galvânica, sem camada – vista da superfície de ruptura

A Figura 30 apresenta uma amostra t7 após aplicação de polisilazana, com uma camada de [10:90], ou seja, 10% de polisilazana e 90% do solvente e terminal de latão C260. Por intermédio da análise da foto, percebe-se que provavelmente a camada ficou uniformemente distribuída ao longo de todo o arame, o que concorda com os melhores resultados obtidos nos testes de vida útil comparando-se esta concentração de polisilazana com as demais experimentadas.

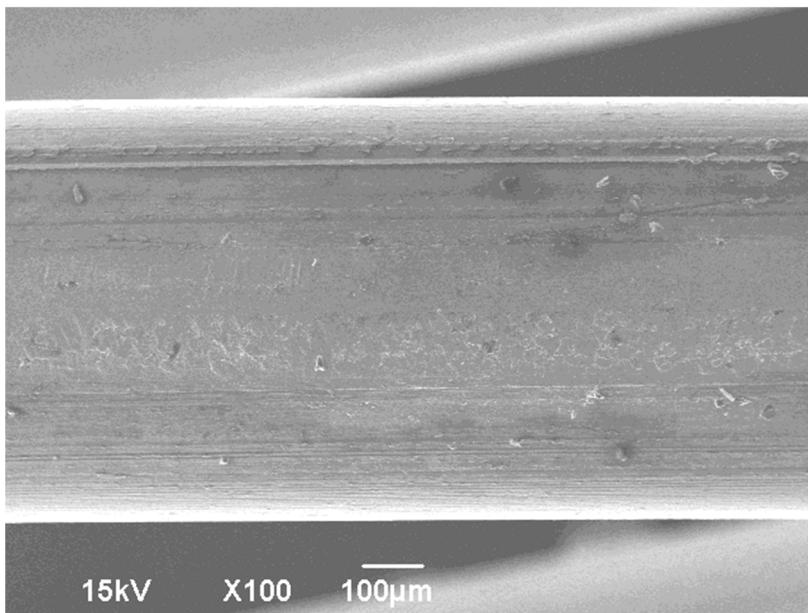


Figura 30 – Amostra após aplicação de camada de polisilazana, [10:90] – vista da superfície

Na sequência, a Figura 31 exibe uma amostra t9 após aplicação de polisilazana, com uma camada de [100:0], ou seja, 100% de polisilazana e 0% do solvente e com terminal de latão C260. Neste caso fica evidente que houve excesso do material polimérico, já que foi gerado inclusive um aumento do perímetro da resistência. Este aumento se deu sobretudo por conta da força da gravidade. Enquanto a resistência secava em estufa, após aplicação da camada, parte do material polimérico escoou acumulando-se na região inferior do fio. Isto justifica os piores resultados alcançados nos testes de vida útil para esta concentração, os quais mostraram que estes parâmetros não alcançam sequer um dia em vida útil.

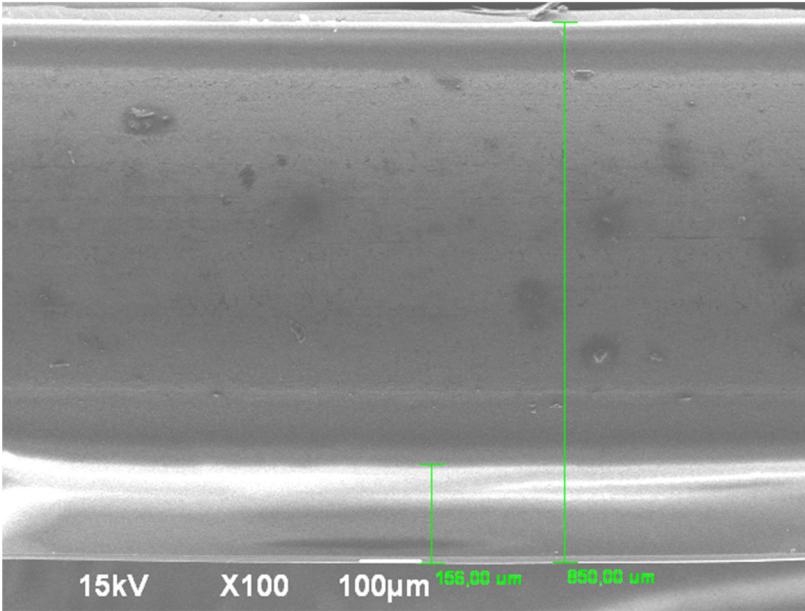


Figura 31 – Amostra após aplicação de camada de polisilazana, [100:0] - vista da superfície

A seguir são mostradas duas análises químicas pontuais (Figuras 32, 33 e 34) para confirmação da suposta camada de polisilazana nos pontos analisados. O principal constituinte deste material é o silício. Os demais são elementos de liga do aço e contaminações: Fe, Cr, Al, Ni, C, P.

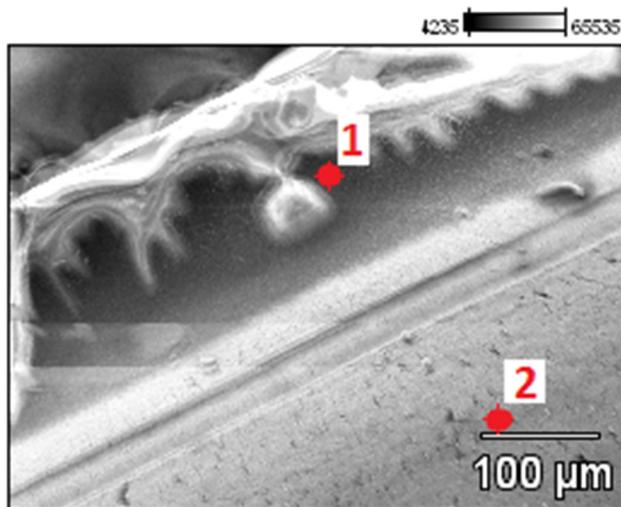


Figura 32 – Locais onde foram realizadas as análises químicas pontuais – vista da superfície

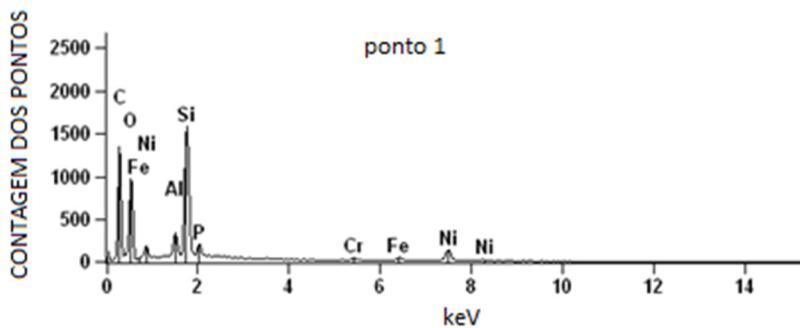


Figura 33 – Resultado da análise química realizada no ponto 1 da Figura 32

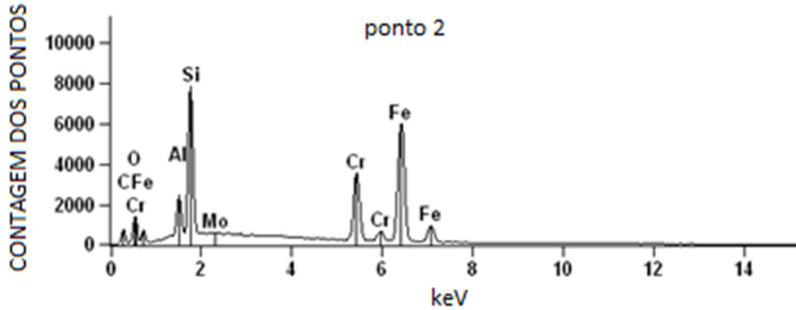


Figura 34 – Resultado da análise química realizada no ponto 2 da Figura 32

A diferença entre as análises químicas apresentadas nas Figuras 33 e 34 é, sobretudo, a concentração de ferro. Na região onde está presente a camada de polisilazana o elemento Fe é praticamente inexistente. Já na Figura 34, há uma alta concentração de Fe, devido a um não acúmulo de polisilazana na região. Com as análises, percebe-se que a força gravitacional influencia fortemente na homogeneidade da camada de polisilazana aplicada, comprometendo o desempenho da resistência.

As duas fotomicrografias subsequentes mostram análises de resistências após aplicação de camada de niquelação. Na primeira, Figura 35, é apresentada a menor camada encontrada. Enquanto na segunda, Figura 36, é apresentada a maior camada encontrada. Por meio das Figuras, nota-se que a camada varia de aproximadamente 1 μm até cerca de 3 μm . Mesmo com esta variação, a durabilidade destes componentes apresentou excelentes resultados em vida útil, sobretudo quando aliados ao terminal em aço inoxidável 304.

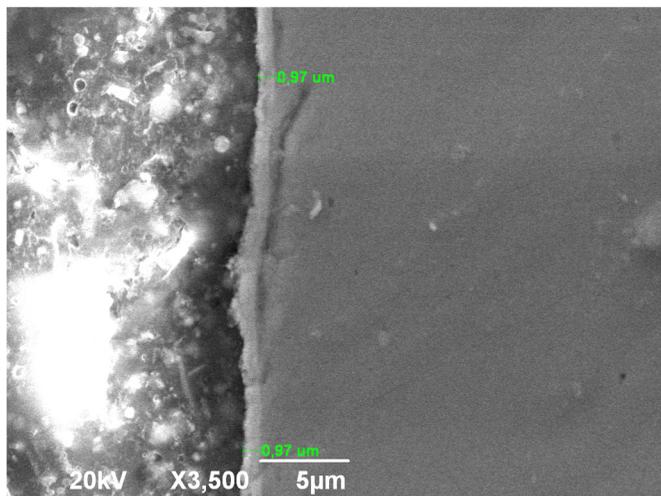


Figura 35 – Camada de Ni: menor espessura de camada encontrada – vista de corte

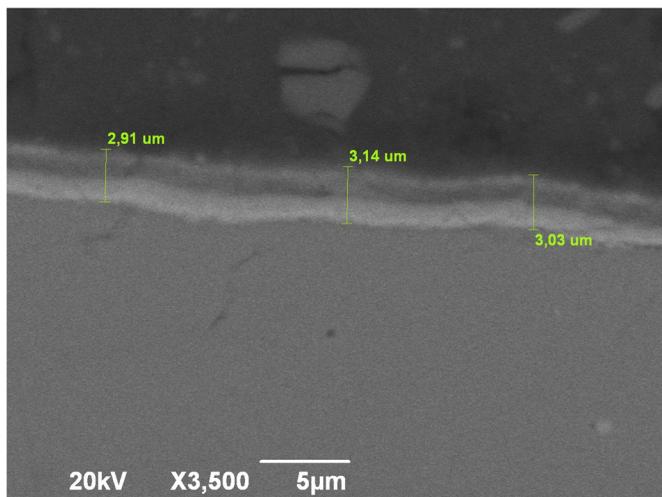


Figura 36 – Camada de Ni: maior espessura de camada encontrada – vista de corte

Nas Figuras a seguir são mostradas análises químicas pontuais (Figuras 37, 38 e 39) para confirmação da camada de níquel, nos pontos analisados.

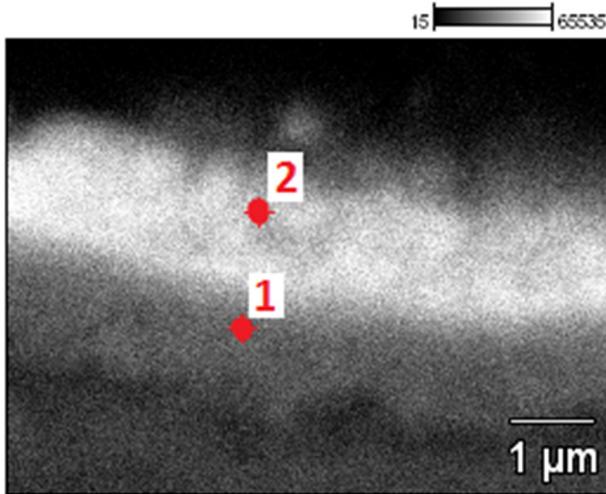


Figura 37 – Locais de onde foram realizadas as análises químicas pontuais – vista de corte da camada

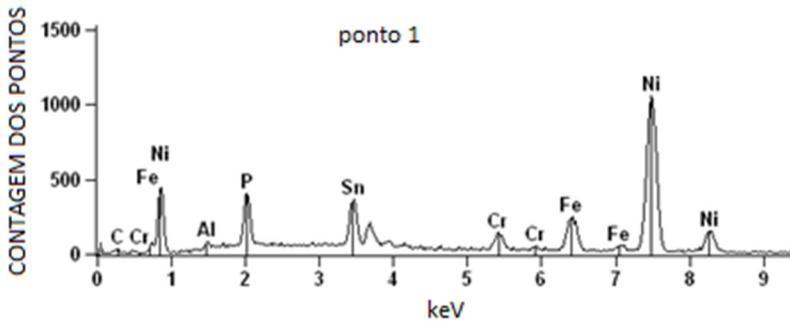


Figura 38 – Resultado da análise química no ponto 1 (camada de níquel) da Figura 37

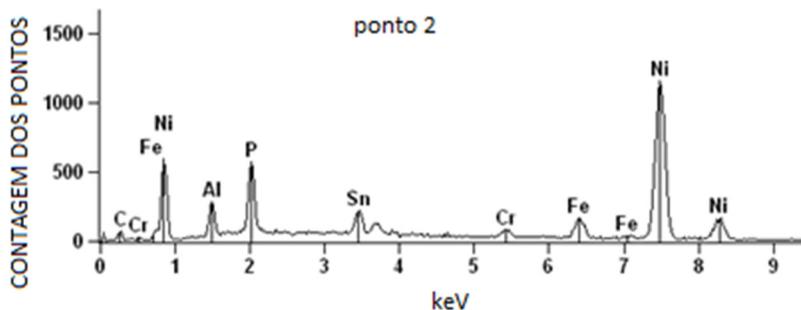


Figura 39 – Resultado da análise química realizada no ponto 2 (camada de níquel) da Figura 37

As análises químicas apresentadas nas Figuras 38 e 39 corroboram com a afirmação anterior, ou seja, a camada de níquel realmente existe na superfície da amostra e possui aproximadamente $3\mu\text{m}$ de espessura.

5.2.2 Teste de névoa salina

As Figuras 40-49 mostram fotografias de amostras submetidas aos testes de névoa salina, para durações de 48 horas e 113 horas de testes.

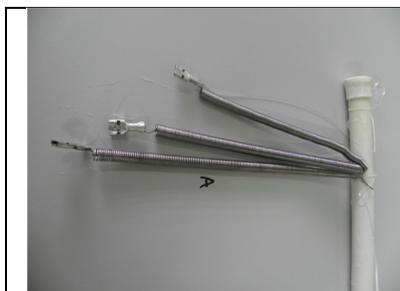


Figura 40 –Névoa salina:t28, 48 h



Figura 41 – Névoa salina: t28, 113 h



**Figura 42 – Névoa salina: t26,
48 h**



**Figura 43 – Névoa salina: t26,
113 h**



**Figura 44 – Névoa salina: t12,
48 h**



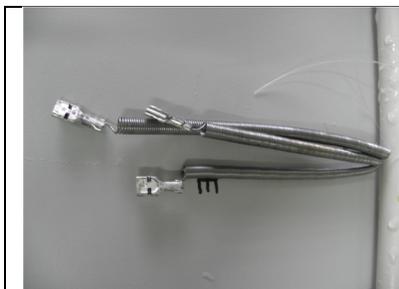
**Figura 45 – Névoa salina: t12,
113 h**



**Figura 46 – Névoa salina: t11,
48 h**



**Figura 47 – Névoa salina: t11,
113 h**



**Figura 48 – Névoa salina: t1,
48 h**



**Figura 49 – Névoa salina: t1,
113 h**

Pela análise visual, aparentemente as peças com camada de polisilazanas (fotos 46, 47, 48 e 49) estão mais corroídas. Entretanto, não se pode afirmar isto com 100% de certeza, visto que a aplicação das camadas para proteção frequentemente geram uma superfície com maior resistência a corrosão comparando-se com uma peça sem camada superficial aplicada.

Para trabalhos futuros, a fim de mensurar eventuais diferenças em relação à resistência à corrosão, além dos testes de vida útil realizados na empresa, são recomendados os testes de polarização linear e polarização potencio dinâmica.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Foram utilizadas duas frentes de trabalho para se tentar reduzir a queima prematura de resistências elétricas aplicadas em chuveiros da ThermoSystem. Na primeira frente, foram aplicadas camadas superficiais anticorrosivas de polisilazanas e niquelação. Na segunda, buscou-se evitar a corrosão galvânica por meio da substituição do terminal da resistência.

Inicialmente, os testes de otimização da camada de polisilazana mostraram que a melhor concentração a ser utilizada é 10% de material polimérico (polisilazana) e 90% de solvente, já que para maiores concentrações do polímero a vida útil do componente fica comprometida devido à heterogeneidade da camada, bem como pela isolamento térmica causada. Nada de relevante foi verificado considerando-se as distintas combinações de tempos e temperaturas de cura experimentados. Com os parâmetros experimentados, as amostras recobertas com filme de polisilazanas tiveram os piores resultados.

Os testes de vida útil indicaram que a melhor combinação experimentada é formada por uma resistência com camada superficial de niquelação e terminal de aço inoxidável 304, já que obteve-se um resultado de 1210 dias em vida útil, em média. Na segunda posição apareceu a combinação de uma resistência com terminal de aço inoxidável 304 e sem camada superficial, com uma média de 691 dias em vida útil. Em terceiro lugar ficou uma resistência acoplada com terminal de latão e recoberta com uma camada de niquelação, com 499 dias em vida útil, em média.

Com os testes de imersão, qualitativamente verificou-se que o terminal de inox 304 comporta-se melhor do que o terminal de latão para todas as variações de camadas. Ademais, também neste teste o melhor resultado foi obtido com o terminal de inox 304 e camada de níquel, amostra t25.

Sobre os testes em campo, mesmo com pouco tempo em operação (apenas 1 ano e 5 meses), pode-se afirmar que a resistência formada com terminal de aço inox e camada de niquelação possui um excelente desempenho, pois nenhuma das dez amostras, instaladas na casa dos colaboradores da empresa, rompeu após um ano e cinco meses. Caso a qualidade do componente não fosse alta, certamente alguma das amostras (resistências dos chuveiros) já teria rompido em alguma das residências.

Com os lotes piloto tiram-se as conclusões: primeiro: para aplicar um terminal inox em linha de produção necessita-se de um melhor desenvolvimento do componente, devido à dificuldade de montagem (etapa de união entre arame e fio). Por isso, escolheu-se passar em larga escala a combinação composta por terminal de latão e camada de níquel. Diagramas de Pareto mostram que o índice de devoluções vem caindo em função do tempo. Conforme pode ser observado no gráfico da Figura 50, em um ano e meio depois da aplicação da melhoria o número caiu de 22,55% para 3,57%, corroborando com a eficácia da nova solução.

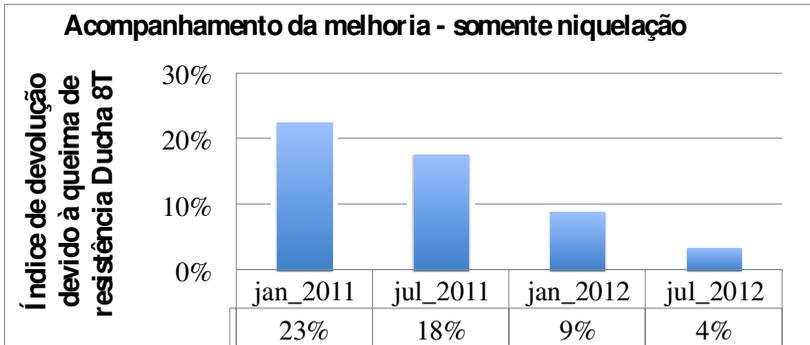


Figura 50 – Resposta da aplicação de camada de niquelação no índice de devoluções

Devido a esta constatação pode-se considerar que o problema está resolvido.

Para trabalhos futuros sugerem-se algumas recomendações. A primeira é desenvolver um terminal de aço inoxidável que seja aplicado em linha de produção ou, até mesmo, adaptar o ferramental a fim de ser capaz de produzir resistências elétricas com este tipo de terminal. Sabe-se que o desgaste das ferramentas de corte é muito superior quando se conforma terminais de aço inoxidável do que quando se conforma terminais de latão. A segunda recomendação é executar outros testes de corrosão: polarização linear, polarização potencio dinâmica, e um teste específico para corrosão galvânica segund a Norma ASTM G71, com o objetivo de investigar-se com mais detalhes o comportamento das novas soluções em materiais para os componentes estudados. A terceira é sobre executar a cura da plisilazana a temperaturas entre 600 e 700 °C, com o intuito de formar um filme cerâmico na superfície dos resistores.

Por fim, o estudo promoveu um elevado aumento na qualidade dos produtos da marca ThermoSystem, porque a longo prazo o consumidor certamente aliará a marca a um produto diferenciado, o qual possui uma “resistência que não queima”. Tal fato vai impulsionar o desenvolvimento da organização, contribuindo para a expansão da mesma no mercado.

REFERÊNCIAS

- [1]. MUSILOVA, V., KRALIK, T., HANZELKA, P., SRNKA, A. **Effect of different treatments of copper surface on its total hemispherical absorptivity bellow 77 K.** Cryogenics, vol. 47, pp. 257 – 261, 2007.
- [2]. KHOPERIA, T. N., TABATADZE, T. J., ZEDGENIDZE, T. I. **Formation of micro circuits in micro electronics by electro less deposition.** Kefrochimica Arm. vol. 42, pp. 3049 – 3055, 1997.
- [3]. BENSALD, S., BRIGNONE, M., ZIGGIOTTI, A., SPECCHIA, S. **High efficiency Thermo-Electric power generator. Torino, Italy.** International journal of hydrogen energy, vol. 37, pp. 1385 – 1398, 2012.
- [4]. GARDELLEA, B., DUQUESNEA, S., VUE, C., BOURBIGOTA, S. **Thermal degradation and fire performance of polysilazane-based coatings.** Thermochemica Acta, vol. 519, pp. 28 – 37, 2011.
- [5]. LONGFEI H., MEISHUAN, L., CAIHONG, X., YONGMING, L., YANCHUN, Z. **A polysilazane coating protecting polyimide from atomic oxygen and vacuum ultraviolet**

- radiation erosion.** Surface & Coatings Technology, vol. 203, pp. 3338 – 3343, 2009.
- [6]. GÜNTNER, M., KRAUS, T., DIERDORF, A., DECKER, D., KRENKEL, W., MOTZ, G. **Advanced coatings on the basis of Si(C)N precursors for protection of steel against oxidation.** Journal of the European Ceramic Society, vol. 29, pp. 2061 – 2068, 2009.
- [7]. NANCY R. T. **"Seven Basic Quality Tools". The Quality Toolbox.** American Society for Quality, 2004.
- [8]. GARCIA, F. **Os Economistas. Pareto. Título Original: Manual d' Economia Política,** São Paulo, Nova Cultural, 1996.
- [9]. SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica.** Porto Alegre, Imprensa Livre, 1999.
- [10]. CHIAVERINI, V. **Processos de Fabricação e Tratamento,** vol. II, 2ª Edição, São Paulo, McGraw Hill, 1986.
- [11]. GIROTTO DE MATTOS, M; Zoppas Ferreira, J. **Aumento da resistência à corrosão em pregos com aplicação de lubrificantes utilizados em processos de trefilação.** Porto Alegre, 2º Seminário Regional de Siderurgia, 2011.

- [12]. BLECK, W. **Using the TRIP effect-the dawn of a Promising Group of Cold Formable Steel**. Aços: Perspectivas para os próximos 10 anos. Rio de Janeiro, Rede Aços, 2002.
- [13]. CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, 7ª Edição, São Paulo, ABM, 2005.
- [14]. GENTIL, V. **Corrosão**, 5ª Edição, Rio de Janeiro, LTC, 2007.
- [15]. EI-DAHSHAN, M. E., SHAMS EI DIN, A. M., HAGGAG, H. H.; **Galvanic corrosion in the systems titanium / 316 L stainless steel / Al brass in Arabian Gulfwater**. Desalination, vol. 142, pp. 161 – 169, 2002.
- [16]. JENKINS, H. D. B. **Chemical Thermodynamics at a Glance**. United Kingdom, Blackwell Publishing Ltd, 2008.
- [17]. S. JARUNGTAMMACHOTE, A. DUTTA. **Equilibrium modeling of gasification: Gibbs free energy minimization approach and its application to spouted bed and spout-fluid bed gasifiers**. Energy Conversion & Management, vol. 49, pp. 1345 – 1356, 2008.

- [18]. ASM Handbook – **Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection**. vol. 13A, 2003.
- [19]. TOVAR, R. S.; MONTAÑES, M. T.; ANTÓN, J. G. **Thermogalvanic corrosion and galvanic effects of copper and 316L stainless steel pairs in heavy LiBr brines under hydrodynamic conditions**, Corrosion Science, vol. 60, pp. 118 – 128, 2012.
- [20]. SAITO, K.; KUNIYA, J. **Mechano chemical model to predict stress corrosion crack growth of stainless steel in high temperature water**, Corrosion Science, vol. 43, pp. 1751 – 1766, 2001.
- [21]. RAHMAN, M. S.; DIVI, S.; CHANDRA, D.; DAEMEN, J. **Effect of different salts on the corrosion properties of friction type A607 steel rock bolt in simulated concentrated water**. Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 23, pp. 665 – 673, 2009.
- [22]. MELCHERS, R.; CHERNOV, B. B. **Corrosion loss of mild steel in high temperature hard fresh water**, Corrosion Science, vol. 52, pp. 449 – 454, 2010.
- [23]. CHEN, X.; WANG, X.; LIU, Q.; MI, F.; CHEN, Y.; LI, Y. **Effect of Micro Area pH Value of Formation of Different**

Rust Phases of Weathering Steel in Initial Corrosion Period,
Journal of Iron and Steel Research, vol. 17, pp. 69 – 72, 2011.

- [24]. GARCÉS, P.; SAURA, P.; ZORNOZA, E.; Andrade, C. **Influence of pH on the nitrite corrosion inhibition of reinforcing steel in simulated concrete pore solution,** Corrosion Science, vol. 53, pp. 3991 – 4000, 2011.
- [25]. TSUTSUMI, Y.; NISHIKATA, A.; TSURU, T. **Pitting corrosion mechanism of Type 304 stainless steel under a droplet of chloride solutions,** Corrosion Science, vol. 49, pp. 1394 – 1407, 2007.
- [26]. GÜNTNER, M.; SCHÜTZ, A.; GLATZEL, U.; WANG, K.; BORDIA, R. K.; GREIBL, O.; KRENKEL, W.; MOTZ, G. **High performance environmental barrier coatings, Part I: Passive filler loaded SiCN system for steel.** Journal of the European Ceramic Society, vol. 31, pp. 3003 – 3010, 2011.
- [27]. ASTM G31-72, **Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals,** vol. 03.02, 2004.
- [28]. ISO 9001: 2008 - **Sistemas de Gestão da Qualidade.**

- [29]. KANTHAL HANDBOOK, **Heating Alloys for Electric Household Appliances**, Kanthal, 2003.
- [30]. MAHN, M.; OSTEROD, F.; BRAND, S. **Farbe und Lack 114**, 22-24, 2008.
- [31]. SLÓWOKO*, W.; DRZAZGA, W.; PRASOL, H. **Equipment, for environmental technique in a standard SEM**. Materials Chemistry and Physics, vol. 81, pp. 224 – 226, 2003.
- [32]. WOROBIEC, A.; VERMAAK, S.; BROOKER A.; DARCHUCK L.; STEFANIAK E.; VAN GRIEKEN, R. **Interfaced SEM/EDX and micro-Raman Spectrometry for characterization of heterogeneous environmental particles — Fundamental and practical challenges**. Microchemical Journal, vol. 94, pp. 65 – 72, 2010.
- [33]. ASTM B 117 – 03: **Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus**, vol. 03.02, 2003.
- [34]. PARDO, A.; MERINO, S.; MERINO, M. C.; BARROSO, I.; MOHEDANO, M.; ARRABAL, R.; VIEJO, F. **Corrosion behaviour of silicon-carbide-particle reinforced AZ92 magnesium alloy**. Corrosion Science, vol. 51, pp. 841 – 849, 2009.

- [35]. RUTE FONTINHA, I.; MANUELA SALTA, M. **Corrosão e Conservação de Estátuas de Ligas de Cobre, Corro. Prot. Mater.**, vol. 27, 2008.

ANEXO A – INFRA-ESTRUTURA

- ThermoSystem Eletro Eletrônica LTDA

Etapas: montagem das resistências, testes de vida útil, testes de corrosão, testes de produtividade e desenvolvimento de lotes para mercado piloto;

- Laboratório de Sistemas Nanoestruturados – LabSiN – UFSC

Etapas: aplicação dos banhos de polisilazanas;

- HT Galvanoplastia

Etapas: aplicação dos banhos de níquel;

- Laboratório de Materiais – LabMat – UFSC

Equipamentos: lixadeiras e politrizes para preparação de amostras;

- Laboratório de Microscopia Eletrônica – LCME – UFSC

Equipamento: microscópio eletrônico de varredura;

- Financiamento: ThermoSystem Eletro Eletrônica LTDA