



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Fernando Schotten

**Desenvolvimento de um prensa cabos para aplicação submersa em
profundidade de até 50 metros de coluna d'água**

Joinville
2023

Fernando Schotten

**Desenvolvimento de um prensa cabos para aplicação submersa em
profundidade de até 50 metros de coluna d'água**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em engenharia e ciências mecânicas.
Orientador: Prof. Dr. Diogo Lôndero Da Silva

Joinville

2023

Ficha de identificação da obra

schotten, Fernando

Desenvolvimento de um prensa cabos para aplicação submersa em profundidade de até 50 metros de coluna d'água / Fernando schotten ; orientador, Diogo Lôndero Da Silva, 2024.

103 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Projeto robusto/Método de Taguchi. 4. Prensa cabos. I. Silva, Diogo Lôndero Da . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. III. Título.

Fernando Schotten

**Desenvolvimento de um prensa cabos para aplicação submersa em
profundidade de até 50 metros de coluna d'água**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado, em 19 de dezembro de 2023 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Régis Kovacs Scalice, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Simoni, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a. Joseane Pontes, Dr.(a)
Instituição Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Diogo Lôndero Da Silva, Dr.Eng.
Orientador

Joinville, 2023.

Este trabalho é dedicado à minha querida esposa, filhas e meus pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente dedico este trabalho a Deus, por ter proporcionado todas as oportunidades que tornaram possível a elaboração deste documento.

A minha esposa, que sempre me motivou a percorrer o caminho acadêmico e sempre compreendeu os momentos necessários de dedicação ao estudo. A está mulher, minha eterna gratidão.

Aos meus pais, que forneceram minha educação, e que sempre me incentivaram a estudar e seguir meus sonhos e principalmente pelo amor incondicional.

Aproveito para agradecer à Universidade Federal de Santa Catarina, ao departamento de Engenharia e Ciências Mecânicas, à portaria 078227 da CAPES e à empresa Weg Equipamentos Elétricos S/A.

Aos meus professores, especialmente ao Prof. Dr. Diogo Lôndero da Silva, pelo empenho, qualidade do ensino, confiança e por todo o conhecimento compartilhado no decorrer da elaboração deste trabalho.

Aos amigos, colegas de trabalho, em especial ao Eng. Diego Blasius pela contribuição técnica e a todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos vocês, meu sincero agradecimento.

“Ó, vida futura! Nós te criaremos.” (ANDRADE, Carlos Drummond de, 1930)

RESUMO

O oceano, que ocupa mais de 2/3 da área total da superfície terrestre é rico em recursos químicos, minerais, energéticos, entre outros. Então, diversas indústrias emergentes como, por exemplo, a indústria marítima de petróleo e gás, indústria química marinha, indústria de mineração em alto mar, estão desenvolvendo tecnologias para operar neste ambiente submerso. No Brasil, muitos dos produtos para aplicação submersa acabam sendo importados, porque não existem fornecedores nacionais qualificados para fornecê-los. Com falta de fornecedores nacionais, as empresas que necessitam de produtos deste segmento de mercado, recorrem à importação, o que acarreta em elevados custos e prazos de entrega. Dentre os componentes para aplicações submersas, destacam-se os prensa cabos que tem como funcionalidades isolar duas áreas distintas (área externa e parte interna da caixa de ligação) e aplicar uma trava mecânica nos cabos de conexões.

Neste trabalho, o método projeto robusto, além de técnicas como a casa da qualidade e *desing of standard*, foram aplicados para desenvolver um prensa cabos apto a operar a profundidade de até 50 metros de coluna d'água com uma redução de custo de 52 vezes comparado a um componente importado. Além do projeto conceitual, foi realizado um plano experimental ortogonal do tipo L32 (5^2) com 3 fatores de controle e 2 fatores de ruído, variando os fatores de controle em: Área de contato do cabo com a resina (2544 mm² até 3392 mm²), número de ancoras (1 até 3) e material externo do cabo (Silicone e EPS). Além disso, foram considerados como fatores de ruído o torque de aperto da porca (300 N*m até 450 N*m) e a pressão (5 bar até 20 bar). Durante a execução dos experimentos, a taxa de vazamento de água (g/h) foi considerada como a variável resposta do projeto. Os resultados obtidos foram analisados com a relação sinal/ruído do tipo menor é melhor, a técnica estatística ANOVA e a análise de regressão. Dentre os fatores considerados, verificou-se que o número de ancoras e a área do contato com o cabo não interferem na variável resposta do sistema. Adicionalmente, foi possível determinar que a combinação de parâmetros que elimina a taxa de vazamento de água corresponde a área com 3392 mm², 3 ancoras, material de EPS e torque de aperto de 450 N*m. Tal combinação não apresentou vazamentos em nenhum dos níveis de pressão utilizados na matriz experimental. Para validar estes resultados, realizou-se um novo experimento de longa duração, empregando a combinação de fatores que eliminaram os vazamentos. Considerando um período de 30 dias e pressão de 15 bar, que equivale a 150 metros de coluna d'água, novamente não foram observados vazamentos, comprovando o desempenho adequado do conceito de prensa cabos desenvolvido no trabalho.

Palavras-chave: Projeto robusto / Método de Taguchi, prensa-cabos, a prova d'água, grau de proteção IP68, projeto robusto.

ABSTRACT

The ocean, which occupies more than 2/3 of the total area of the Earth's surface, is rich in chemical, mineral and energy resources, among others. So, several emerging industries, for example, the maritime oil and gas industry, marine chemical industry, deep-sea mining industry, are developing technologies to operate in this submerged environment. In Brazil, many of the products for submerged application end up being imported, because there are no national suppliers qualified to supply them. With a lack of national suppliers, companies that need products from this market segment resort to imports, which leads to high costs and delivery times. Among the components for submerged applications, the cable glands stand out, which have the function of isolating two distinct areas (external area and internal part of the connection box) and applying a mechanical lock to the connection cables.

In this work, the robust design method, in addition to techniques such as the house of quality and design of standard, were applied to develop a cable gland capable of operating at depths of up to 50 meters of water column with a cost reduction of 52 times. compared to an imported component. In addition to the conceptual design, an orthogonal experimental plan of type L32 (5^2) was carried out with 3 control factors and 2 noise factors, varying the control factors in: Contact area of the cable with the resin (2544 mm² to 3392 mm²), number of anchors (1 to 3) and external cable material (Silicone and EPS). Furthermore, the nut tightening torque (300 N*m to 450 N*m) and pressure (5 bar to 20 bar) were considered as noise factors. During the execution of the experiments, the water leakage rate (g/h) was considered as the design response variable. The results obtained were analyzed using the lower-is-better signal-to-noise ratio, the ANOVA statistical technique and regression analysis. Among the factors considered, it was found that the number of anchors and the area of contact with the cable do not affect the variable response of the system. Additionally, it was possible to determine that the combination of parameters that eliminates the water leak rate corresponds to an area of 3392 mm², 3 anchors, EPS material and tightening torque of 450 N*m. This combination did not present leaks at any of the pressure levels used in the experimental matrix. To validate these results, a new long-term experiment was carried out, employing a combination of factors that eliminated leaks. Considering a period of 30 days and pressure of 15 bar, which is equivalent to 150 meters of water column, again no leaks were observed, proving the adequate performance of the cable gland concept developed in the work.

Keywords: Robust design / Taguchi method, cable glands, waterproof, IP68 degree of protection, robust design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rede de cabos submersos para transferência de dados	17
Figura 2 – Exemplos de utilização dos prensa cabos	19
Figura 3 – Representação esquemática da patente de prensa cabos	24
Figura 4 - Diagrama P.....	30
Figura 5 - Fluxograma das etapas da metodologia	38
Figura 6 - Casa da qualidade	41
Figura 7 – Diagrama P aplicado a problemática	43
Figura 8 – Aparato experimental para testes do prensa cabos	45
Figura 9 - Balança.....	46
Figura 10 – Torquímetro	47
Figura 11 - Manômetro	48
Figura 12 – Representação da área de contato com a resina com o cabo... 51	
Figura 13 – Amostras dos prensa cabos.....	55
Figura 14 - Etapa de aplicação da resina.....	56
Figura 15 - Pressurização do aparato experimental.....	57
Figura 16 - Coifa.....	62
Figura 17 - Representação esquemática do protótipo do prensa cabos.....	63
Figura 18 - Desvio padrão e relação S/N	67
Figura 19 - Falha destrutiva da combinação	68
Figura 20 - Dispersão dos resultados das combinações contra tratamentos	69
Figura 21 - Gráfico de efeitos para a média de taxa de vazamento (g/h).	71
Figura 22 - Locais de possíveis vazamentos	72
Figura 23 - Efeito da pressão de água contra a coifa.....	73
Figura 24 – Vazamento médio para os materiais de EPS e silicone.....	74
Figura 25 - Gráfico de resíduos.....	78
Figura 26 - Gráfico de efeitos para a média de taxa de vazamento (g/h).	80
Figura 27 - Gráfico de resíduos apenas para combinações com EPS.....	82
Figura 28 - Catálogo de prensa cabos a prova de explosão – Parte 1	96
Figura 29 - Catálogo de prensa cabos a prova de explosão – Parte 2	96
Figura 30 - Certificado de calibração da balança Toledo	97
Figura 31 - Certificado de calibração do torquímetro - Parte 1	98
Figura 32 - Certificado de calibração do torquímetro - Parte 2	99

Figura 33 - Certificado de calibração do manômetro - Parte 1	100
Figura 34 - Certificado de calibração do manômetro - Parte 2	101
Figura 35 - Certificado de calibração do manômetro - Parte 3	102
Figura 36 - Certificado de calibração do manômetro - Parte 4	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de artigos sobre método projeto robusto	27
Tabela 2 – Arranjos ortogonais	33
Tabela 3 – Matriz combinada	33
Tabela 4 – Matriz combinada	34
Tabela 5 – Plano experimental.....	50
Tabela 6 - Propriedades do material EPS e silicone	52
Tabela 7 - ANOVA de um experimento com dois fatores.....	58
Tabela 8 - Resultado dos testes	65
Tabela 9 - Comparação dos efeitos dos fatores de controle e ruído.....	70
Tabela 10 - Análise ANOVA para os efeitos sobre a taxa de vazamento (g/h)	75
Tabela 11 - Análise ANOVA de parâmetros de maior importância estatística	76
Tabela 12 - Análise dos coeficientes	77
Tabela 13 - Plano experimental L16 - sem o fator material	79
Tabela 14 - Análise de variância para taxa de vazamento (g/h).....	80
Tabela 15 - Análise dos coeficientes apenas com EPS	81
Tabela 16 - Parâmetros selecionados	83
Tabela 17 - Vazamento do dispositivo.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DOE	<i>Design Of Experiments</i> (Planejamento experimental)
Relação S/N	Relação sinal ruído
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (Análise de Variância)
IP68	<i>Ingress Protection</i> (proteção contra ingresso) 68
QFD	<i>Quality Function Deployment</i> (Implantação da Função Qualidade)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Projeto Auxiliado por Computador)
SQ	Soma dos Quadrados
GL	Graus de Liberdade
QM	Quadrado Médio
EPS	Poliestireno Expandido
API	<i>American Petroleum Institute</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
ETC	E outras coisas
TQM	<i>Total Quality Management</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
SN_{MAM}	Relação Sinal Ruído do tipo maior é melhor	[dB]
SN_{NEM}	Relação Sinal Ruído do tipo nominal é melhor	[dB]
SN_{MEM}	Relação Sinal Ruído do tipo menor é melhor	[dB]
n	Número de elementos	[-]
\bar{y}	Média de valores	[mg]
y_i	Valor individual	[mg]
s	Desvio padrão	[mg]
β_0	Intersecção da linha de regressão	[-]
β_1	Inclinação da regressão	[-]
A	Fator	[-]
B	Fator	[-]
AB	Interação entre o fator A e B	[-]
SQ	Soma dos quadrados	[-]
gl	Graus de liberdade	[-]
QM	Quadrado médio	[-]
N	Quantidade total de observações	[-]
R^2	Razão da soma dos quadrados	[-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	PRENSA CABOS	18
1.2	OBJETIVOS	20
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	APLICAÇÕES SUBMERSAS E PRENSA CABOS	22
2.2	MÉTODO PROJETO ROBUSTO	25
2.2.1	Etapas do projeto robusto	28
2.2.2	Desdobramento da Função Qualidade (QFD)	28
2.2.3	Diagrama P	30
2.2.4	Relação sinal ruído	30
2.2.5	Matrizes ortogonais	31
2.2.6	Análise de Variância (ANOVA)	34
2.2.7	Análise de regressão	35
2.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	PROJETO DO PRENSA CABOS	39
3.1.1	Aplicação do Desdobramento da Função Qualidade (QFD)	39
3.2	DIAGRAMA P - APLICADO AO PROJETO.....	41
3.3	APARATO EXPERIMENTAL.....	44
3.4	PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	48
3.4.1	Definição dos níveis do fator torque	52
3.4.2	Procedimento experimental	54
3.5	MÉTODO ANOVA E ANÁLISE DE REGRESSÃO.....	57
4	RESULTADOS	60
4.1	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DO PRENSA CABOS	60
4.2	ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS	64
4.2.1	Resultados do plano experimental de Taguchi	64
4.2.2	Análise de efeitos dos fatores	70
4.2.3	Análise de variância (ANOVA)	74
4.2.4	Análise de regressão	76
4.2.5	Regressão de dados do conceito com material de EPS	79
4.2.6	Seleção dos fatores de controle para minimizar a taxa de vazamento	82

4.3	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	83
5	CONCLUSÕES	87
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS.....	90
	ANEXO A – CATÁLOGO DE PRENSA CABOS A PROVA DE EXPLOÇÃO	96
	ANEXO B – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA BALANÇA	97
	ANEXO C – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TORQUÍMETRO	98
	ANEXO D – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO MANÔMETRO	100

1 INTRODUÇÃO

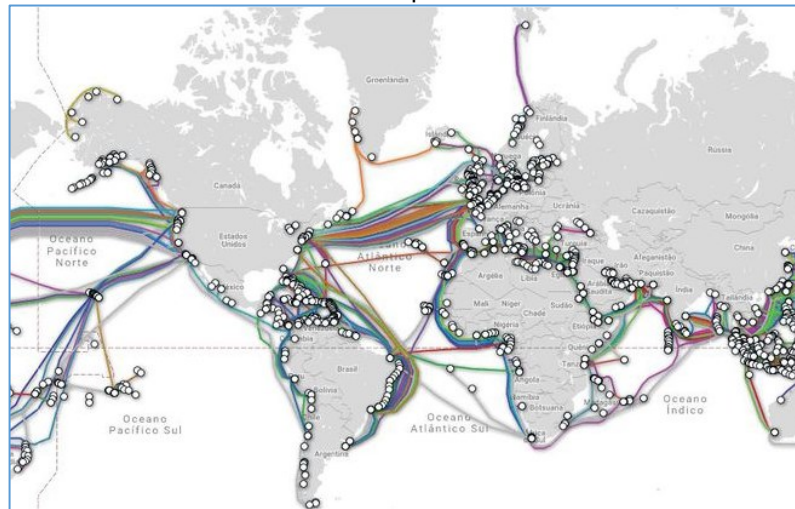
O conceito de projeto robusto, concebido nas décadas de 1940 a 1950, transcendeu seu contexto histórico e permanece como uma ferramenta vital e influente em diversas áreas até os dias atuais. Os princípios fundamentais estabelecidos nessa época, como análise de tolerância, planejamento de experimentos e métodos estatísticos, continuam a ser alicerces essenciais para a criação de sistemas e produtos capazes de resistir a variações e incertezas, promovendo confiabilidade e eficácia.

Analisando a rápida expansão da população humana está reduzindo a oferta de recursos terrestres, forçando diferentes nações a alterarem seu foco de desenvolvimento econômico para outras fontes, como o oceano. Isso porque o oceano, que ocupa mais de 2/3 da área total da superfície terrestre, é rico em recursos energéticos, químicos, minerais, entre outros. Observa-se que os seres humanos intensificaram as atividades submersas a partir do século XXI. Além disso, diversas indústrias emergentes como a indústria marítima de petróleo e gás, indústria química marinha, indústria de mineração em alto mar, entre outras, estão desenvolvendo tecnologias para operar neste ambiente submerso (Pan e Cui, 2020).

Estudos como o dos autores Aziz *et al.* (2012), Carlson *et al.* (2023), Seica e Packer (2007) e Rehman *et al.* (2023), evidenciam as dificuldades técnicas em aplicações submersas, principalmente devido ao ambiente inóspito no qual elas são realizadas e afirmam que todos os setores econômicos que dependem de operações submersas, tem a necessidade da utilização de cabos de transferência de dados ou eletricidade para o acionamento de máquinas e equipamentos.

Para uma melhor visão da abrangência do uso de tecnologias submersas, a Figura 1 mostra a rede de cabos submersos para transferência de dados, onde é possível observar uma maior densidade de cabos entre a Europa e os Estados Unidos, porém, as suas ramificações têm abrangência para todos os continentes do mundo. Importante enfatizar que, conforme Barros (2021), a rede de cabos submersos desempenha uma função vital análoga à dos nervos no corpo humano, sendo ela uma parte essencial do sistema mundial das comunicações que, se vier a falhar, nos remeterá instantaneamente de volta para o isolamento dos nossos antepassados.

Figura 1 – Rede de cabos submersos para transferência de dados



Fonte: Barros (2021)

Outro exemplo de aplicação submersa e a de robôs subaquáticos, como veículos operacionais remotos onde normalmente são desenvolvidos para missões militares. Nestas soluções, é normal o uso de um cabo, denominado cordão umbilical, entre o robô e a superfície a fim de transferir energia ou oxigênio (Huy *et al.*, 2023).

Conforme Takacs (2009), os cabos elétricos submersos são submetidos a condições adversas de operação como variação de pressão, temperatura, partículas suspensas, ambiente corrosivo, entre outros. Uma vez que a utilização de cabos submersos geralmente está atrelada a uma solução integrada com altos custos de implementação e manutenção, qualquer falha neste tipo de aplicação pode gerar uma significativa perda monetária. Devido aos possíveis impactos ambientais e econômicos que uma situação de falha pode acarretar, todos os componentes desenvolvidos para este tipo de aplicação devem ser projetados priorizando a confiabilidade.

Quando se trata de falhas em ambientes submersos, conforme já explanado, o custo pode ser expressivo, tanto no âmbito financeiro quanto humano ou ambiental. Um exemplo histórico de falha foi o naufrágio da plataforma de petróleo P36, que ocorreu no ano de 2011 e causou um prejuízo estimado de U\$\$ 500.000.000,00, além de uma multa ambiental de aproximadamente R\$ 100.000.000,00, além de ter ocasionado o óbito de 11 pessoas. A causa deste naufrágio foi a explosão que ocorreu em uma das colunas que controlavam o nível da plataforma e que operava de forma submersa exercendo um papel de estabilizador (Siqueira e Haiama-neurohr, 2006).

Ao analisar os processos de transferência de energia em ambiente submerso, frequentemente é possível identificar a necessidade de conexão no ponto inicial e final de cada cabo de transmissão. Estas conexões são realizadas na superfície do invólucro que protege o equipamento do meio externo e geralmente utilizam um componente denominado prensa cabos.

1.1 PRENSA CABOS

De acordo com Brumbach e Keljik (2016), prensa cabos são componentes do sistema de transmissão de dados ou energia empregados para proteger e fixar um cabo em um equipamento ou invólucro. Suas funções básicas são:

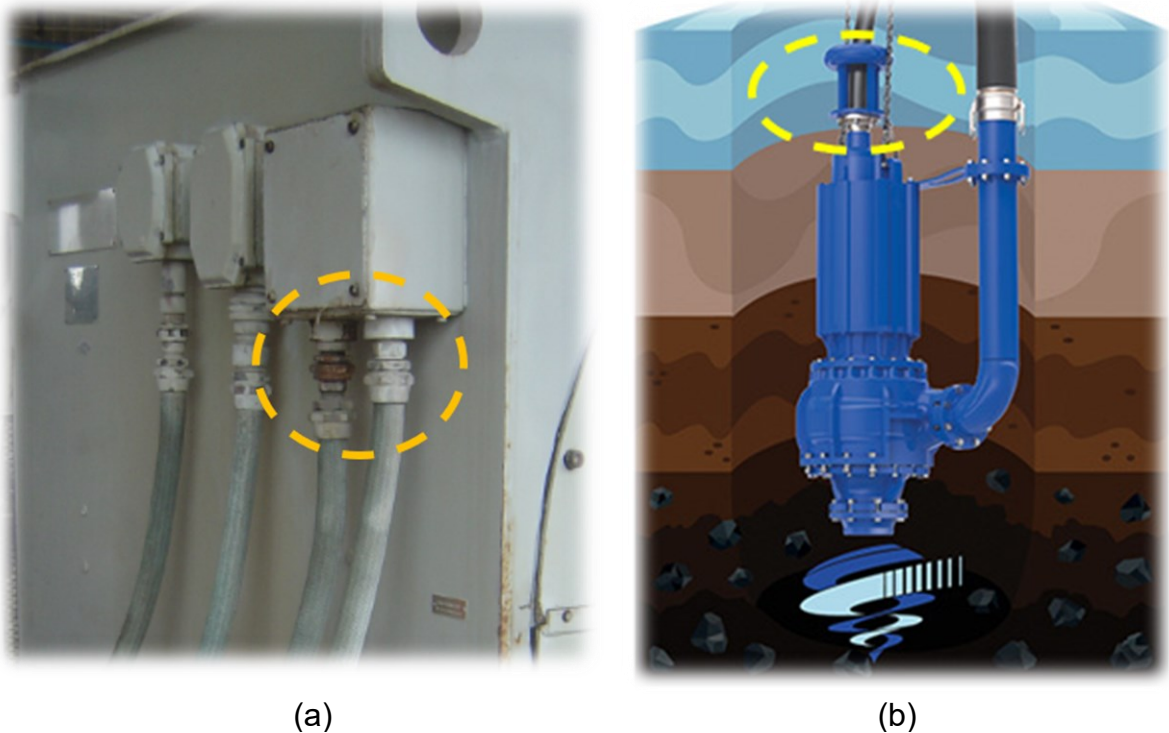
- Proteção mecânica: Função de absorver a força mecânica aplicada ao cabo em que está montado com intuito de preservar a conexão elétrica.
- Proteção de isolamento: Impedir a entrada de impurezas para o lado interno do equipamento ou invólucro. Dependendo do grau de proteção do equipamento, ele é capaz de impedir a entrada de água e gases.

Os prensa cabos são utilizados nos mais diversos produtos, mas seu maior destaque está em equipamentos desenvolvidos para aplicações industriais. A especificação de prensa cabos baseiam-se no tipo de aplicação e diâmetro do cabo, enquanto a instalação compreende a montagem do corpo principal do componente na parede do equipamento ou invólucro e aperto do elemento de vedação (Gomes, 2020).

Por exemplo, para ilustrar a seleção de um presa cabos, o Anexo A apresenta um catálogo de prensa cabos a prova de explosão, com grau de proteção IP66. Enfatiza-se que a seleção do componente é relativamente simples, além de, trazer informações adicionais atrelada a massa e dimensões do componente.

Adicionalmente, a Figura 2a destaca uma aplicação de prensa cabos para um equipamento industrial. Apesar da aparente simplicidade, prensa cabos para aplicações submersas, como destacado na Figura 2b, exigem uma série de cuidados durante a etapa de projeto e montagem para que forneçam alta confiabilidade. Salienta-se que neste tipo de aplicação, mesmo pequenos vazamentos podem levar a falha de todo o sistema ou operação. Adicionalmente, observa-se, que ainda não existem fornecedores nacionais para esse tipo de aplicação.

Figura 2 – Exemplos de utilização dos prensa cabos



(a) Fonte: (a) Elaborado pelo autor, 2023; (b) Pump, 2023

Os prensa-cabos submersíveis são essenciais para garantir a proteção adequada das conexões elétricas em ambientes hostis. Estes prensa-cabos devem atender a normas rigorosas, como *API Specification 17F*, que estabelece requisitos de projeto, fabricação, instalação e operação de equipamentos aplicados aos sistemas de controle de submarinos, inclusive prensa-cabos, com intuito de garantir sua confiabilidade e resistência às condições submarinas (American Petroleum Institute, 2021).

A indústria de energia renovável está com uma expansão significativa em aplicações subaquáticas, principalmente com seus parques eólicos *offshore* e usinas de energia das marés. Nesses ambientes, os prensa-cabos submersíveis desempenham um papel vital na proteção das conexões elétricas entre turbinas e sistemas de transmissão de energia em terra. É essencial que esses invólucros e consequentemente os prensa-cabos atendam a padrões reconhecidos, como a norma *NEMA 250*, para garantir a confiabilidade e a segurança operacional (National Electrical Manufacturers Association, 2021).

Como o projeto de equipamentos e sistemas para ambientes submersos é considerado complexo, torna-se necessário a utilização de métodos estruturados de desenvolvimento de produtos como o método projeto robusto. O método projeto

robusto, também conhecido por método de Taguchi, é um método estruturado de engenharia que auxilia no projeto de produtos, e processos, para que funcionem adequadamente sob várias condições de uso, sendo capazes de manter suas características de desempenho mesmo quando submetidos a diferentes fontes de variabilidade. Tais fontes de variabilidade são definidas como ruídos (Taguchi *et al.*, 2005).

1.2 OBJETIVOS

Com base nos fatos apresentados, este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um prensa cabos para aplicação submersa em profundidade de até 50 metros de coluna d'água.

Para atingir o objetivo geral são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Definição das condições e ambiente de operação;
- Criar um plano experimental, considerando fatores de controle e de ruído em diferentes níveis;
- Desenvolver um aparato experimental para investigar os efeitos dos fatores de controle sobre a estanqueidade dos protótipos de prensa cabos;
- Obtenção de uma base de dados experimental para analisar os parâmetros do projeto e com isto determinar quais são suas melhores e piores características;
- Analisar os dados experimentais para identificar os valores dos fatores de controle que atingem o grau de proteção IP68 nas condições de operação e que minimizam a variabilidade causada pelos fatores de ruído;
- Validar a solução encontrada realizando testes com um protótipo de prensa cabos produzidos com os parâmetros identificados na etapa de análise.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho é composta por cinco capítulos principais. O Capítulo 1 aborda a motivação para o estudo, oferecendo uma contextualização do tema e apresentando os objetivos gerais e específicos da pesquisa. No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica abrangente sobre aplicações submersas e prensa cabos, acompanhada das principais teorias relacionadas ao método projeto robusto.

No Capítulo 3, é detalhada a metodologia aplicada no trabalho, explanando de que forma a teoria foi aplicada à problemática em questão e fornecendo detalhes sobre o planejamento e execução dos experimentos. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, com base em análises e validações criteriosas.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, seguido do Capítulo 6, que lista sugestões para possíveis trabalhos futuros relacionados ao desenvolvimento de prensa cabos para aplicações submersas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as principais definições identificadas na literatura relacionadas com aplicações submersas, prensa cabos e o método projeto robusto de produtos. Dentro do método projeto robusto será explanado os conceitos que envolvem o diagrama P, relação sinal ruído, matriz ortogonal, análise de variância (ANOVA) e a análise de regressão.

Resumidamente, a seção 2.1 descreve uma introdução sobre aplicações submersas, além de trazer informações atreladas a patentes atreladas ao tema. A seção 2.2, apresenta método projeto robusto de forma genérica, explanando suas principais funções e técnicas possíveis de serem aplicadas, além de, apresentar uma visão geral do uso do método em diferentes aplicações.

A seção 2.2.1 descreve as etapas do método projeto robusto explanando seus conceitos. A seção 2.2.3 apresenta a teoria atrelada ao diagrama P, definindo o uso dos fatores de controle e ruído, fatores de sinal e fatores de resposta do sistema. A seção 2.2.4 define a relação sinal ruído e apresenta as equações para o sinal ruído do tipo nominal é melhor, menor é melhor e maior é melhor. Na seção 2.2.5, apresenta-se a teoria atrelada as matrizes ortogonais e explanando a teoria das matrizes combinadas e matrizes interna-externa.

A seção 2.2.6 apresenta a teoria atrelada a análise de variância, seguida da seção 2.2.7 que explana a análise de regressão com as definições matemáticas da técnica. Por último, a seção 2.3 apresenta uma síntese do capítulo, descrevendo os principais pontos de relevância das técnicas apresentas.

2.1 APLICAÇÕES SUBMERSAS E PRENSA CABOS

Ardelean e Minnebo (2023) avaliaram os parâmetros da costa terrestre e determinaram que mais de 20% da superfície global dos mares e mais de 40% do comprimento global da costa são altamente favoráveis para possíveis interconexões de energia submarina. Com base nisto, é possível verificar um espaço para ampliação do uso de interconexões, como no avanço do uso de tecnologias de geração de energia renováveis em alto mar, por exemplo.

Quando se trata de aplicações submersas, os componentes devem conter propriedades adicionais para atender os requisitos exigidos pela aplicação. Por exemplo, conforme Moreno *et al.* (2021), os cabos de alta tensão utilizados neste ambiente normalmente são compostos de várias camadas, incluindo: um núcleo condutor, uma camada dielétrica, uma barreira metálica dúctil estanque, uma série de armaduras radiais e axiais e camadas de polímero. Estas camadas têm a finalidade de garantir a impermeabilidade e criar resistência à fadiga devido ao próprio movimento da água.

Apesar dos prensa cabos serem utilizados a décadas, ainda existem estudos que visam otimizar e melhorar as características técnicas deste componente. Por exemplo, o estudo de Atkinson (2020) propôs uma nova maneira de fixação dos cabos de conexão de um motor, por meio de um modelo de prensa cabos projetado para atender grandes densidades de cabos na região da caixa ou invólucro. O dispositivo foi denominado como faixa de vedação e tem como principal vantagem a redução da área necessária para instalação dos cabos. O estudo aponta que este novo conceito é apto a utilização de cabos com diâmetro externo de até 54 milímetros e, dependendo do conjunto de cabos, pode acomodar até 41 cabos.

Em ambientes submersos, a questão de estanqueidade acaba sendo um desafio constante, devido ao ambiente dinâmico do fluxo da água aplicado aos componentes. Viespolia *et al.* (2020) afirmaram que nos cabos de transmissões de energia submersos, normalmente é utilizado uma camada estanque de chumbo devido as suas propriedades de estabilidade química e ductibilidade. Porém, devido ao carregamento cíclico aplicado por conta do ambiente, algumas destas ligas de chumbo podem apresentar deformações ou até mesmo falhas por fadiga.

MacAngus-Gerrard (2017) afirma que os prensa cabos utilizados nas aplicações em alto mar (*offshore*) normalmente são à prova de água e gases, devido ao ambiente inóspito de utilização. Para garantir a estanqueidade do componente, normalmente é utilizado um composto químico para preencher o volume entre o cabo e a parede interna do componente, porém, este tipo de construção normalmente está associado a desvantagem de que a desmontagem só é possível cortando este enchimento, o que resulta na necessidade de um novo prensa cabos para a remontagem do conjunto.

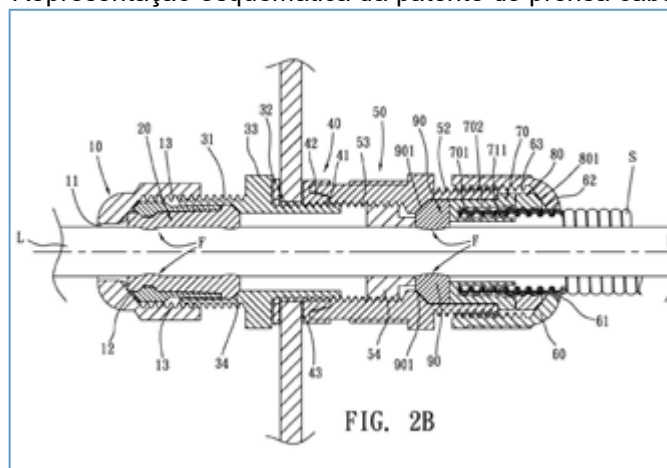
Hubbell Inc (2018) depositou uma patente que apresenta um modelo de prensa cabos com vedação através de um elastômero e acionamento por um parafuso

que força a compressão do elastômero entre o furo de alojamento e o cabo. Como grande vantagem, pode-se citar a possibilidade de usar diversas bitolas de cabo no mesmo componente reduzindo assim o portfólio de variações do produto para atender a diversidade de cabos.

Nagase e Nishino (2017) depositaram uma patente que visa aplicar uma junta de cerâmica para possibilitar a vedação entre 2 ambientes distintos, sendo que, em seu interior tem um furo de passagem no centro da junta. É possível de ser observado, um sistema de vedação por interferência, através de um encaixe com um ressalto projetado em uma das faces do componente.

Chiu (2010) depositou uma patente que apresenta um prensa cabos que tem aplicabilidade em cabos sensíveis, como em cabos de fibra ótica. Este prensa cabos, representado na Figura 3, garante a estanquidade e também apresenta características de proporcionar ao cabo resistência a tração em eventuais forças externas. Para proporcionar estas características, o prensa cabos tem uma isolação de metal juntamente com um anel de elastômero. No seu interior é possível identificar 3 pontos de contatos com o cabo, que são obtidos por meio de materiais elastoméricos e vedação mecânica resultante do aperto da porca do prensa cabos. Os pontos de contato com o cabo, estão presentes na Figura 3 e representados pelos números 20, 54 e 90.

Figura 3 – Representação esquemática da patente de prensa cabos



Fonte: Chiu (2010)

A NBR 60529 (2017) classifica os graus de proteção providos para os invólucros dos equipamentos elétricos. Nela estabelece-se que o grau de proteção

IP68, está associado a equipamentos protegidos contra a penetração de poeira e contato com as partes internas do invólucro. Adicionalmente, tais equipamentos devem ser protegidos contra os efeitos de imersão contínua em água, desde que sejam respeitadas as condições de imersão (temperatura, pressão, etc.) informadas pelo fabricante do produto.

Adicionalmente, mesmos aplicando todo o processo de projeto e fabricação de forma plena, vale ressaltar que a manutenção é a garantia de qualidade desempenham papéis cruciais em diversos setores industriais, impactando diretamente na eficiência operacional e na satisfação do cliente. A manutenção preventiva e preditiva, aliada a práticas de controle de qualidade robustas, contribui para a redução significativa de falhas e retrabalhos, resultando em processos mais estáveis e produtos finais de maior confiabilidade. Além disso, a implementação de sistemas de gestão da qualidade, como o TQM (do inglês, *Total Quality Management*) e o *Six Sigma*, proporciona uma abordagem estruturada para identificar e corrigir problemas, promovendo a melhoria contínua e a excelência operacional (Ross e Perry, 2017).

2.2 MÉTODO PROJETO ROBUSTO

O método projeto robusto, também conhecido como método de Taguchi, tem como objetivo manter as características de desempenho de um produto, ou processo, próximas ao seu valor nominal, mesmo quando este for submetido a diferentes fontes de variabilidade, conhecidas como ruídos (Taguchi *et al.*, 2005).

Conforme Mehat e Kamaruddin (2012), o projeto robusto é um método de engenharia estruturado, usado para projetar produtos e determinar a configuração ideal dos parâmetros controláveis. Quando se utiliza o método de forma sistêmica, busca-se determinar a combinação de variáveis que melhora o desempenho de qualidade e custo do produto simultaneamente. Outra característica do método está na sua capacidade de captar o comportamento físico do produto ou processo com uma quantidade reduzida de experimentos, dispensando a realização de testes com todas as combinações. Desta forma, reduzindo o tempo e recursos empregados na etapa experimental.

As variáveis ou fatores de ruído são aquelas responsáveis por causar variabilidade, distanciando a resposta do produto ou processo do seu valor

especificado. Um dos principais objetivos do método é selecionar os níveis dos fatores de controle que otimizam a característica de qualidade definida, para que o processo seja robusto ou insensível à variação causada pelos parâmetros de ruído (Robinson *et al.*, 2004).

Sendo assim, ruídos são fatores que causam variações no produto ou processo, fazendo com que suas características funcionais se distanciem do valor esperado. Existem basicamente três tipos de ruídos:

- ❖ Ruído devido a fatores externos. Exemplos: temperatura do ambiente, erro humano e carga não intencional.
- ❖ Ruído devido a fatores degenerativos. Exemplos: desgaste fora do projetado (atrito, carga), sujeira.
- ❖ Ruído devido a fatores de unidade: Exemplos como a baixa qualidade de matéria prima, torque aplicado a um parafuso ou a falha de operador.

Considerando os termos “*Taguchi method*” e “*robust design*” na base de dados scopus, foram identificadas publicações regulares desde os anos de 1960. Também se observa que a publicação de trabalhos apresentou um aumento exponencial a partir do ano de 2006, chegando a um número de 1675 publicações no período de janeiro a novembro de 2023.

Adicionalmente, a Tabela 1 mostra uma relação de artigos que empregaram o método projeto robusto em diferentes aplicações, tais como: soldagem, automação, usinagem, modelagem matemática, submersa, entre outros. A versatilidade do método em diferentes áreas de engenharia e a sua utilização por pesquisadores de diferentes países desde o ano de 2005 até a atualidade são evidenciados nos dados apresentados na Tabela 1. Destaca-se que 7 dos artigos listados foram realizados em aplicações submersas, que tem relação direta com o tema deste trabalho.

Tabela 1 – Relação de artigos sobre método projeto robusto

Compósitos	Ano	Autores	Origem
Usinagem	2005	Kwak	Correia do Sul
Modelo matemático	2005	Shin e Cho	Estados Unidos
Modelagem	2007	Wang <i>et al.</i>	República Popular da China
Usinagem	2008	Palanikumar	Índia
Usinagem	2008	Tsao, C. C.	Inglaterra
Usinagem	2008	Kivak <i>et al.</i>	Turquia
Usinagem	2009	Tzeng <i>et al.</i>	República Popular da China
Automação	2010	Hsiao. <i>et al.</i>	Taiwan
Soldagem	2011	Xiansheng <i>et al.</i>	China
Injeção plastica	2012	Mehat e Kamaruddin	Índia
Usinagem	2012	Barnabas e Tamizharasan	Índia
Usinagem	2013	Yildiz	Turquia
Submersa	2013	Doorman e Froystad	Noruega
Usinagem	2014	Siddiquee <i>et al.</i>	Índia
Estamparia	2015	Kuo e Chen	República Popular da China
Submersa	2015	Ardelean e Minnebo	Holanda
Usinagem	2016	Zainal <i>et al.</i>	Estados unidos
Usinagem	2016	Patil e Patil	Índia
Usinagem	2017	Singh <i>et al.</i>	Índia
Submersa	2018	Canepa <i>et al.</i>	Italia
Submersa	2019	Mueller <i>et al.</i>	Alemanha
Submersa	2019	Mueller <i>et al.</i>	Alemanha
Prototipagem	2020	Maurya <i>et al.</i>	Índia
Injeção plastica	2021	Li <i>et al.</i>	República Popular da China
Vulcanização	2021	Das e Chakraborty	Índia
Modelo matemático	2021	Jiang <i>et al.</i>	República Popular da China
Vibração	2021	Jiménez-Alonso <i>et al.</i>	Espanha
Indústrias metal-mecânica	2021	Bach <i>et al.</i>	Japão
Indústrias metal-mecânica	2021	Jiaqi <i>et al.</i>	República Popular da China
Indústrias metal-mecânica	2021	Souvik <i>et al.</i>	Canada
Indústrias metal-mecânica	2021	Zhang <i>et al.</i>	República Popular da China
Modelo matemático	2021	Le e Shin	Korea
Indústrias metal-mecânica	2021	Qiu <i>et al.</i>	Estados Unidos
Modelo matemático	2022	Lee <i>et al.</i>	Estados Unidos
Automação	2022	Mesmer <i>et al.</i>	Alemanha
Submersa	2022	Wu <i>et al.</i>	República Popular da China
Usinagem	2023	Khandey e Arya	Malásia
Indústrias metal-mecânica	2023	Hu <i>et al.</i>	República Popular da China
Indústrias metal-mecânica	2023	Tian <i>et al.</i>	República Popular da China
Compósitos	2023	Hiwa <i>et al.</i>	Iraque
Submersa	2023	Madani <i>et al.</i>	Argélia

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

2.2.1 Etapas do projeto robusto

De acordo com Taguchi *et al.* (2005), existem três etapas no projeto do produto ou do processo: projeto de sistema (engenharia), projeto de parâmetros (experimental) e projeto de tolerâncias. Das três etapas, o projeto dos parâmetros de Taguchi é frequentemente identificado como crucial na otimização do processo.

O projeto de sistema é a concepção de um produto ou processo a ser utilizado, onde pode ser aplicada novas ideias, conceitos e conhecimentos nas áreas de ciência e tecnologia. Neste caso, podem ser utilizados pela equipe de projeto para determinar a combinação apropriada de materiais, peças, processos, e outros fatores que irão satisfazer as especificações funcionais e econômicas do produto.

O projeto de parâmetro é usado para obter os níveis otimizados dos parâmetros do processo, com objetivo de se elevar as características de qualidade e determinar os valores dos parâmetros do produto, baseado nos valores otimizados do processo. As variáveis do sistema são analisadas para determinar a forma como o produto ou processo reage com os fatores de ruído, que são incontroláveis no sistema. Portanto, o projeto de parâmetro pretende encontrar os níveis de parâmetros de processo adequados para tornar o sistema menos sensível as variações de ruídos, isto é, para tornar o sistema robusto, para que assim o produto tenha um melhor desempenho.

A última etapa da abordagem do método é o projeto de tolerância, que é utilizado quando as tolerâncias para os produtos ou processos são estabelecidos para minimizar a soma dos custos de produção e qualidade.

2.2.2 Desdobramento da Função Qualidade (QFD)

O Desdobramento da Função Qualidade (QFD, do *inglês Quality Function Deployment*) é uma metodologia sistemática que visa traduzir as necessidades e expectativas dos clientes em características de qualidade específicas para um produto ou serviço. Ele envolve uma série de técnicas e ferramentas que permitem a identificação e priorização das características que são mais importantes para os clientes, bem como a incorporação dessas características no projeto, produção e entrega do produto ou serviço. O QFD facilita a comunicação e a colaboração entre diferentes partes interessadas, ajudando as empresas a melhorar continuamente a satisfação do cliente e a competitividade do produto ou serviço no mercado. (Akao, 1990).

O Desdobramento da Função Qualidade (QFD) surgiu no Japão nas décadas de 1960 e 1970, em resposta à necessidade de melhorar a qualidade dos produtos e serviços, especialmente na indústria automotiva. Foi desenvolvido principalmente por engenheiros da Toyota, notadamente por Yoji Akao e Shigeru Mizuno. O QFD ganhou destaque internacional após sua introdução nos Estados Unidos em meados da década de 1980. (Hauser e Clausing, 1988).

Este método contém diversas etapas a serem realizadas para se obter sucesso em sua aplicação, sendo eles:

- Identificação das necessidades dos clientes;
- Tradução das necessidades dos clientes em características de qualidade;
- Desenvolvimento da Casa da Qualidade;
- Priorização das características;
- Desdobramento das características para os processos de produção;
- Acompanhamento e melhoria contínua;

Entre seus recursos, a matriz de QFD, também conhecida como Casa da Qualidade, é uma ferramenta visual que relaciona as necessidades dos clientes (geralmente representadas na parte superior da matriz) com as características do produto ou serviço (geralmente representadas nas colunas da matriz). As células da matriz mostram a relação entre as necessidades dos clientes e as características do produto, indicando a importância de cada característica para atender às necessidades dos clientes. (Hauser e Clausing, 1988).

Devido ser um método genérico, atualmente existem variações do QFD, cada uma adaptada para diferentes tipos de produtos e serviços. Alguns dos principais tipos incluem:

- QFD de Produto: Usado para desenvolver produtos e sistemas.
- QFD de Processo: Aplicado para melhorar processos de produção e operações.
- QFD de Serviço: Utilizado para projetar e melhorar serviços.
- QFD de Software: Adaptado para o desenvolvimento de software e sistemas de tecnologia da informação.

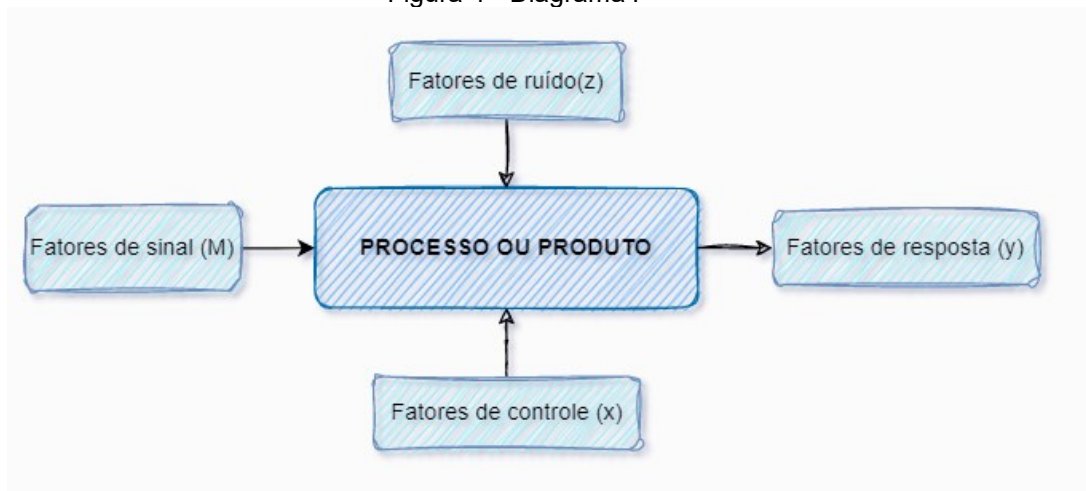
Adicionalmente, o QFD pode ser integrado com outras metodologias de qualidade, como *Six Sigma*, *Lean Manufacturing* e *Design for Six Sigma*, para fornecer

uma abordagem mais abrangente para melhoria de processos e produtos. A integração dessas metodologias pode resultar em benefícios adicionais, como redução de defeitos, eliminação de desperdícios e aumento da eficácia global do sistema.

2.2.3 Diagrama P

O diagrama P é uma técnica utilizada no método Projeto Robusto para a visualização do funcionamento de um produto ou processo, onde sua denominação literal é diagrama de parâmetros. O esquemático do diagrama pode ser visualizado na Figura 4. Os fatores de controle são parâmetros de projeto controláveis usados para otimizar o desempenho do sistema, cujo qual, deve gerar os fatores de resposta desejados. Fatores de ruído são parâmetros associados a quaisquer fontes de variação que não podem ser controladas, mas que afetam os fatores de resposta. Já o fator de sinal é aquele que o cliente utiliza intencionalmente para alterar os fatores de resposta de acordo com a sua necessidade (Arnér, 2014).

Figura 4 - Diagrama P



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

2.2.4 Relação sinal ruído

A relação sinal ruído (S/N) é um indicador de desempenho empregado para quantificar a robustez de projeto, que leva em consideração a média e a variabilidade. Na definição da relação S/N, o termo "sinal" representa o valor da variável resposta,

enquanto o "ruído" representa a variabilidade da variável resposta causada pela presença dos fatores de ruído. O método contém três fórmulas matemáticas denominadas, maior é melhor, nominal é melhor e menor é melhor (Mehat e Kamaruddin, 2012).

Como definido por Taguchi *et al.* (2005), quando se trata da relação sinal ruído do caso maior é melhor, o resultado que se espera para a variável resposta é infinito ou o maior possível. A equação resultante para esta situação é expressa por

$$SN_{MAM} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2.1)$$

Para o caso nominal é melhor, a relação S/N é expressa por

$$SN_{NEM} = -10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s} \right)^2 \quad (2.2)$$

Enquanto para o caso menor é melhor, a relação S/N é expressa por

$$SN_{MEM} = -10 \log(s^2 + \bar{y}^2) \quad (2.3)$$

onde o desvio padrão (s) é calculado por

$$s = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (2.4)$$

e a média (\bar{y}) é obtida como

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad (2.5)$$

2.2.5 Matrizes ortogonais

De acordo com Mehat e Kamaruddin (2012) as matrizes ortogonais são empregadas na etapa experimental do projeto para estimar os principais efeitos do

produto ou processo usando um número reduzido de condições experimentais. Tal característica tem a capacidade de reduzir os custos de pesquisa e desenvolvimento.

Ao contrário do planejamento fatorial completo que considera todas as possíveis combinações dos fatores de controle, as matrizes ortogonais propõem o uso de apenas algumas destas combinações, selecionadas de forma a captar o comportamento físico do sistema com um número reduzido de experimentos. Assim, o uso destas matrizes permite estudar simultaneamente o efeito de vários parâmetros, obtendo o máximo de informações sobre o processo com um número reduzido de experimentos (Mehat e Kamaruddin, 2012).

A determinação do arranjo ortogonal depende da quantidade de fatores de controle, juntamente com seus respectivos níveis (Phadke, 1989). Para cada arranjo é determinado um número máximo de níveis e fatores sendo que, quanto maior a quantidade de fatores, maior será a quantidade de testes a serem executados (combinações). Os demais arranjos estão dispostos na Tabela 2, acompanhados do número de combinações, número máximo de fatores e número máximo de fatores com um determinado nível. Por exemplo, em um arranjo ortogonal L4, serão realizados 4 experimentos com no máximo 3 fatores e 2 níveis.

Tabela 2 – Arranjos ortogonais

Arranjo ortogonal	Número de combinações	Número máximo de fatores	Número máximo de fatores com esses níveis			
			2	3	4	5
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-
L16	16	15	15	-	-	-
L16	16	5	-	-	5	-
L1	18	8	1	7	-	-
L25	25	6	-	-	-	6
L27	27	13	-	13	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
L32	32	10	1	-	9	-
L36	36	23	11	12	-	-
L36	36	16	3	13	-	-
L50	50	12	1	-	-	11
L54	54	26	1	25	-	-
L64	64	63	63	-	-	-
L64	64	21	-	-	21	-
L81	81	40	-	40	-	-

Fonte: Adaptado de PHADKE, 1989.

Conforme Arnér (2014), existem duas possibilidades para combinar os fatores de controle e de ruído em um plano experimental, sendo elas a matriz combinada e a matriz interna-externa.

Em uma matriz combinada os fatores de controle e ruído são inseridos em uma única matriz. Este exemplo de matriz pode ser visualizado através da Tabela 3.

Tabela 3 – Matriz combinada

Controle		Ruído	Resposta
A	B	C	y
-1	-1	-1	y1
1	-1	-1	y2
-1	1	-1	y3
1	1	-1	y4
-1	-1	1	y5
1	-1	1	y6
-1	1	1	y7
1	1	1	y8

Fonte: Adaptado de ARNÉR, 2014.

Por sua vez, uma matriz interna-externa, é composta de duas matrizes separadas. A matriz interna é responsável em definir os fatores de controle, enquanto a matriz externa define os fatores de ruído. Este exemplo de matriz pode ser visualizado através da Tabela 4, onde uma matriz interna com 4 fatores de controle está representada na metade esquerda e a matriz externa é apresentada na metade direita, considerando 2 fatores de ruído.

Tabela 4 – Matriz combinada

Fatores de controle				Fatores de ruído			
				E = -1	E = 1	E = -1	E = 1
A	B	C	D	F = -1	F = -1	F = -1	F = -1
-1	-1	-1	-1	y11	y12	y13	y14
1	-1	-1	1	y21	y22	y23	y24
-1	1	-1	1	y31	y32	y33	y34
1	1	-1	-1	y41	y42	y43	y44
-1	-1	1	1	y51	y52	y53	y54
1	-1	1	-1	y61	y62	y63	y64
-1	1	1	-1	y71	y72	y73	y74
1	1	1	1	y81	y82	y83	y84

Fonte: Adaptado de ARNÉR, 2014.

2.2.6 Análise de Variância (ANOVA)

A Análise de Variância, normalmente conhecida pela sigla ANOVA, é uma técnica utilizada de forma complementar dentro do método projeto robusto e tem como objetivo auxiliar na análise dos resultados experimentais. Utilizando o método, de forma gráfica, torna-se possível analisar a influência dos fatores na resposta do sistema. Além disso, é possível também entender melhor as fontes de variação, pois são identificados os níveis dos parâmetros que reduzem a variação (Arnér, 2014).

Os resíduos de um planejamento fatorial têm grande importância na adequação do modelo (Montgomery, 2001). A análise a ser aplicada com o ANOVA considera que as observações sejam normal e independentemente distribuídas, com a mesma variância para cada um dos tratamentos ou níveis de fator. Por tratar-se de uma consideração, deve ser validado através da análise de resíduos, que são as diferenças entre as observações e seus valores estimados (ou ajustados) a partir do modelo estatístico utilizado. Para facilitar a análise, a grande maioria dos sistemas que

processam os cálculos do ANOVA, trazem uma visão gráfica da probabilidade normal de resíduos, onde, o gráfico plotará os resíduos contra os níveis dos fatores e aplica uma comparação com a dispersão dos resíduos.

Adicionalmente, a equação de contribuição é um método estatístico fundamental na análise de dados que busca avaliar o impacto relativo de uma variável ou fator sobre a variabilidade total observada em um conjunto de dados. Essa fórmula é frequentemente utilizada para determinar a proporção de variação explicada por uma variável específica em relação à variação total dos dados. O cálculo da contribuição é feito conforme (Okasha *et al.*, 2012):

$$\text{Contribuição \%} = \frac{\text{soma dos desvios quadrados}}{\text{soma total dos desvios quadrados}} \quad (2.6)$$

A Equação 2.6 representa a soma dos quadrados dos desvios em torno da média atribuível à variável ou fator de interesse. Isso reflete a parte da variabilidade nos dados que pode ser explicada por essa variável específica. Por outro lado, o denominador, a soma total dos desvios quadrados, engloba a variabilidade global dos dados, independentemente da variável em questão.

2.2.7 Análise de regressão

A análise de regressão do ANOVA é uma técnica estatística utilizada para avaliar a relação entre uma variável dependente contínua e uma ou mais variáveis independentes (também chamadas de preditoras ou explicativas). Essa análise é frequentemente usada para investigar a influência das variáveis independentes na variável dependente e determinar se existe uma relação significativa entre elas.

Este método, pode ser utilizado para determinar o modelo que otimiza o processo estudado, maximizando ou minimizando o valor esperado (Montgomery, 2001). O caso de regressão linear simples considera um único regressor ou preditor x e uma variável de resposta Y . O valor de Y para cada valor de x pode ser expresso por

$$E(Y | x) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2.7)$$

Onde, β_0 é a intersecção e β_1 a inclinação, cujo qual, são coeficientes desconhecidos da regressão.

As estimativas de mínimos quadrados da intersecção e da inclinação no modelo de regressão linear simples são

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (2.8)$$

onde, $\hat{\beta}_1$ é calculado por

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad (2.9)$$

e a média das respostas (\bar{y}) é obtida por

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.10)$$

e a média dos fatores individuais (\bar{x}) é obtida por

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.11)$$

Com base nas equações acima, e ajustando as variáveis, a linha ajustada de regressão é

$$\bar{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (2.12)$$

2.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Por meio da revisão bibliográfica, foram investigados os fundamentos essenciais relativos às aplicações submersas e à utilização de prensa-cabos. Essa abordagem permitiu evidenciar a significativa importância que essas tecnologias desempenham na vida da humanidade, como na transmissão de dados e energia em ambientes submersos. Ao explorar esses temas, é possível compreender como essas

soluções desempenham um papel fundamental na melhoria das condições de vida e na evolução contínua da sociedade, ao mesmo tempo que a sua falha pode ter consequências desastrosas para a transmissão de dados, energia elétrica e produção de gás e petróleo. Dentre os artigos e patentes analisadas, foram encontradas 7 publicações que utilizaram o método projeto robusto em aplicações submersas. No entanto, nenhum deles teve como foco o desenvolvimento de prensa cabos, indicando a carência de estudos neste tipo de componente.

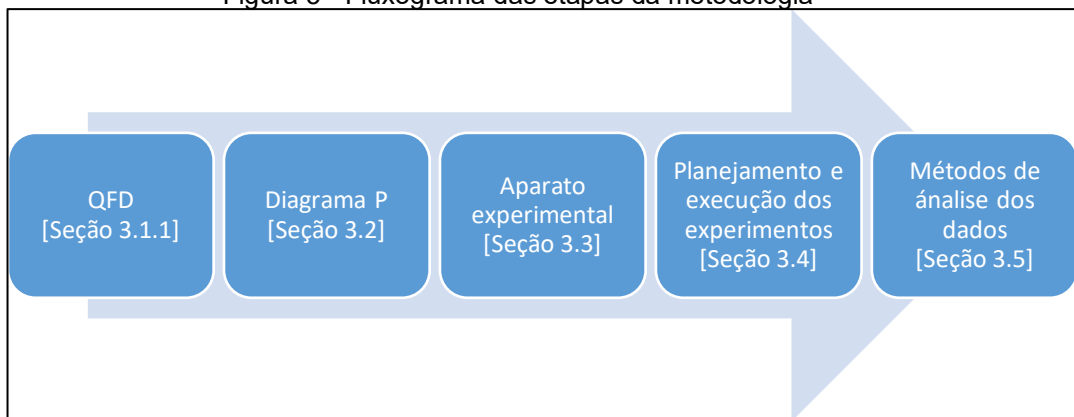
Outra contribuição da revisão bibliográfica foi a identificação das principais definições relacionadas ao método do projeto robusto, bem como a explanação de suas principais técnicas e indicadores, tais como o diagrama P, a relação sinal-ruído, a matriz ortogonal, a análise de variância (ANOVA) e a regressão. Todos esses fundamentos desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento do trabalho, conforme será apresentado nos capítulos a seguir.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia empregadas para atingir os objetivos estabelecidos no presente trabalho. Tal metodologia é composta por um conjunto de técnicas de engenharia que serão detalhadas. Uma visão geral das etapas do desenvolvimento do presa cabos, que é o tema central deste trabalho, é apresentada no fluxograma da Figura 5.

Como pode ser observado na Figura 5, inicialmente foi aplicada a técnica do QFD, seguida da construção do Diagrama P. Na sequência, todo o aparato experimental é meticulosamente definido, abrangendo tanto insumos quanto ferramentas auxiliares. Posteriormente, é desenvolvido um planejamento detalhado e executado as etapas experimentais para a coleta de dados. Por fim, são aplicados métodos de análise de dados, tais como ANOVA e regressão, seleção dos fatores que minimizam a resposta do sistema, além de, entender o comportamento do sistema nas diversas configurações testadas.

Figura 5 - Fluxograma das etapas da metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Todo o processo de desenvolvimento do projeto, bem como as atividades experimentais, foram realizados na WEG, que é em uma empresa multinacional de fabricação de motores elétricos sediada na cidade de Jaraguá do Sul, Santa Catarina. A empresa concedeu o espaço, programas de computador e os equipamentos necessários para a condução do projeto, testes e análise dos dados.

Este capítulo foi organizado em diferentes seções. A seção 3.1 irá apresentar as considerações para o projeto do presa cabos, seguida da seção 3.2 que irá

descrever o diagrama P desenvolvido para o projeto, explanado com detalhes cada fator analisado. A seção 3.3 apresentará o aparato experimental e insumos que serão necessários para realização dos testes práticos, sendo seguida da seção 3.4, que irá explanar o planejamento experimental juntamente com o procedimento dos testes que serão realizados. Por último, a seção 3.5 irá explanar como o método ANOVA e a regressão será aplicada com base nos resultados dos dados obtidos através da execução dos experimentos.

3.1 PROJETO DO PRENSA CABOS

O presente projeto visou desenvolver uma solução para a fixação de cabos ou fios aplicado em ambientes submersos, atingindo um grau de proteção IP68, cujo qual, estará apto a operar em profundidades de até 50 metros de coluna d'água sem infiltrar água para dentro do invólucro que está sendo montado. É essencial garantir que esses cabos estejam adequadamente protegidos e ancorados, a fim de evitar danos, mau funcionamento ou riscos de segurança da aplicação.

Uma das maneiras mais eficazes de garantir a fixação adequada dos cabos é por meio do uso de prensa-cabos. Neste projeto, buscou-se projetar e fabricar um prensa-cabos eficiente, com foco na durabilidade, facilidade de instalação e compatibilidade com uma ampla variedade de tamanhos de cabos.

Além disso, também foi considerada a facilidade de uso e manutenção do prensa-cabos, considerando aspectos como a acessibilidade para a instalação e remoção dos cabos, bem como a resistência a condições ambientais adversas.

Por fim, para ter sido possível alcançar todos os objetivos citados, foi utilizado os métodos desdobramento da função qualidade, diagrama P e *desing of standard*. Os detalhes estão detalhados nas próximas seções.

3.1.1 Aplicação do Desdobramento da Função Qualidade (QFD)

Ao aplicar o QFD no conceito do presa cabos, primeiramente foi avaliado e discutido quais os requisitos que são importantes considerando a visão do cliente. As informações foram extraídas das especificações técnicas de cotações de produtos aptos a operar de forma submersa. Dentre os requisitos funcionais, foi determinado a

fácil montagem, a prova d'água, vida útil de no mínimo quatro meses, versátil e de baixo custo.

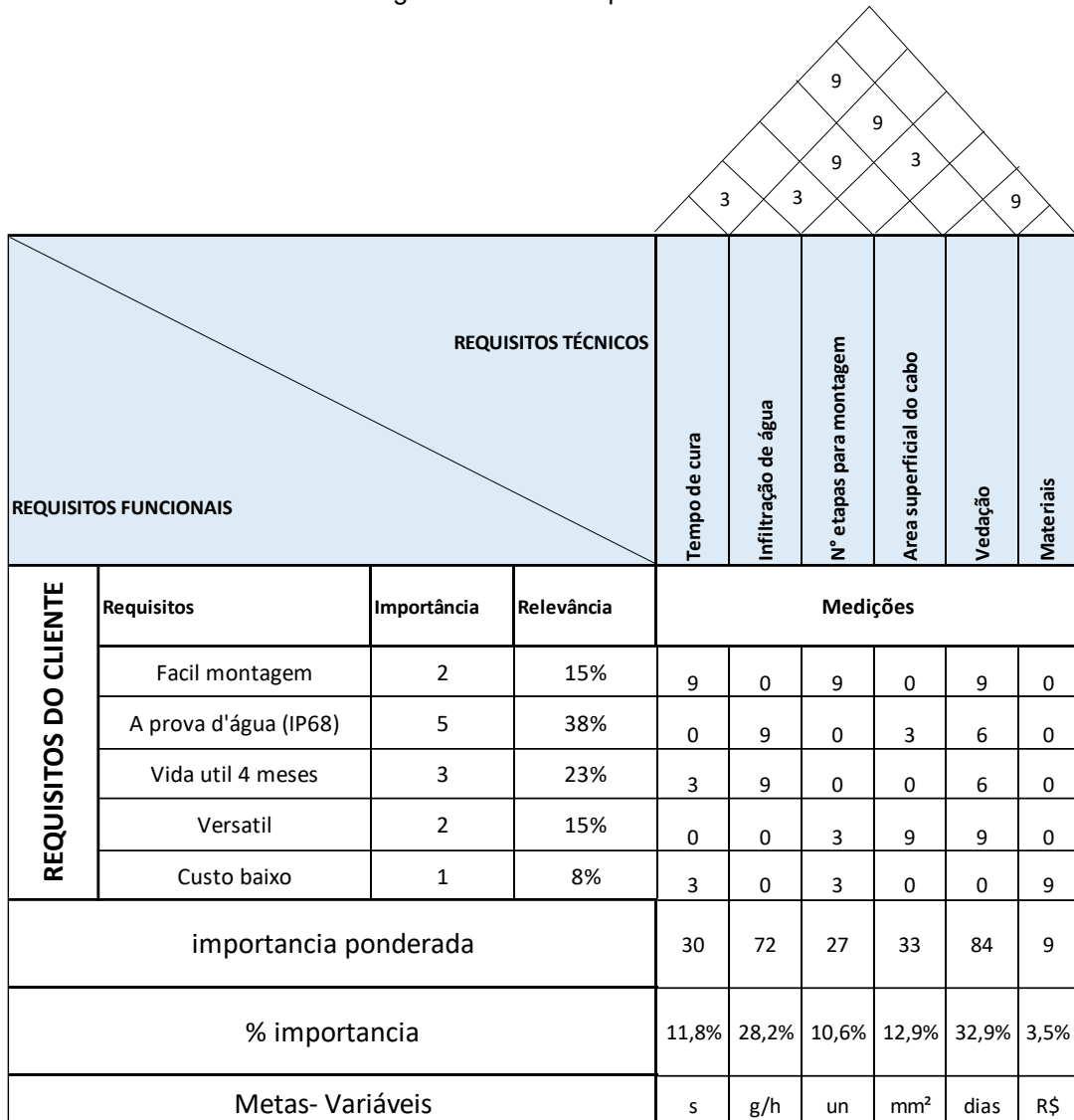
A representação gráfica obtida para o QFD do prensa cabos analisado neste trabalho é apresentada na Figura 6. Após os requisitos funcionais terem sido determinados, foram executadas algumas discussões com uma equipe técnica da empresa composta de 4 engenheiros, dispendendo um total de 16 horas de análise. Nestas discussões, teve-se o objetivo de converter os requisitos funcionais em requisitos técnicos, sendo debatido todos os requisitos funcionais, seus impactos no projeto e sua importância para o cliente. Os requisitos técnicos estipulados foram o tempo de cura, infiltração de água, número de etapas para montagem, área superficial do cabo, vedação e materiais (ver Figura 6).

Em uma terceira etapa da análise, foi determinado a relevância que cada requisito técnico tem em função dos requisitos funcionais. Observou-se que o requisito funcional de maior relevância é o item denominado “a prova d'água (IP68)” com 38% de relevância.

Por último, para determinar quais características funcionais (técnicos) que tem maior importância para atendimento dos requisitos do cliente, foram calculadas a importância ponderada. Com base nos resultados obtidos, determinou-se que as características funcionais mais importantes são: a vedação (32,9%) seguido da infiltração de água (28,2%).

Com o auxílio do método QFD, foi possível, converter desejos do cliente, muitas vezes intangíveis, em requisitos técnicos e adicionalmente ainda determinar qual a importância de cada requisito representa perante aos desejos do cliente. Estas informações são extremamente importantes, para que, no momento do projeto possa dar ênfase nas qualidades do produto que de fato geram maior satisfação e valor para o cliente.

Figura 6 - Casa da qualidade



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.2 DIAGRAMA P - APLICADO AO PROJETO

O diagrama P, apresentado na Figura 7, identifica as principais variáveis envolvidas no projeto do prensa cabos sob questão. O significado físico de cada variável apresentada no diagrama P da Figura 7 é detalhado a seguir.

Variável resposta

- Do lado direito do diagrama P é apresentada a variável resposta, que é a taxa de vazamento de água no prensa cabos. Neste trabalho, optou-se na unidade de gramas de água por hora (g/h).

Fatores de controle

- Área de contato da resina com o cabo: Um fator de importância para o projeto é a capacidade do produto de acomodar cabos de diferentes diâmetros. Essas variações têm o potencial de afetar significativamente a resposta do sistema;
- Quantidade de ancoras: Um recurso técnico empregado com o intuito de assegurar a aderência da resina ao corpo do prensa-cabos, bem como de funcionar como um redutor de pressão e um obstáculo caso ocorra a infiltração de água entre a resina e a estrutura interna do prensa-cabos;
- Resina: Componente responsável por realizar a vedação entre o cabo e o prensa cabos;
- Material externo do cabo: Trata-se do revestimento externo do cabo. É importante notar que diferentes fabricantes podem oferecer o produto com características físicas diversas, como exemplo, o material do revestimento que pode variar;

Fatores de ruído

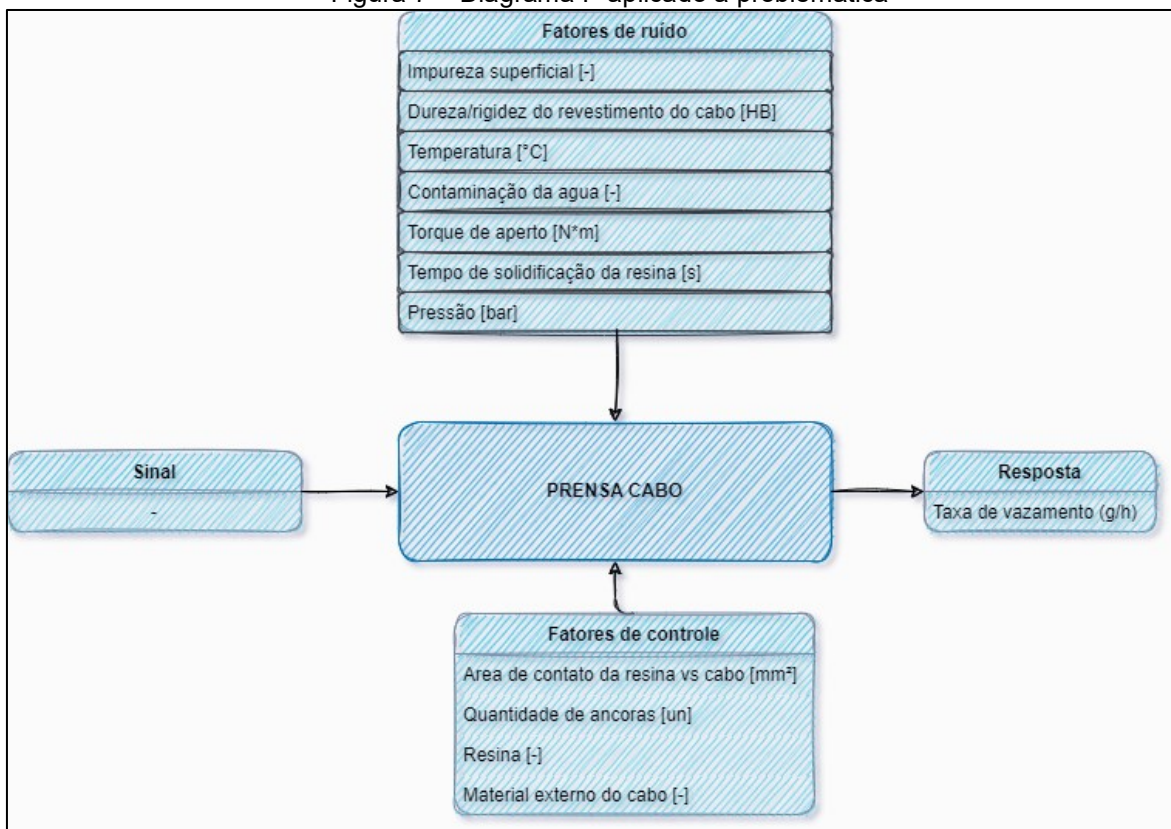
- Pressão da coluna d'água: Fator que determina a profundidade em que o componente está operando;
- Impureza superficial: Qualquer resíduo que pode estar na superfície de aplicação da resina;
- Dureza/Rigidez do revestimento do cabo: Devido os diversos fornecedores de cabos, é normal existir diferenças na rigidez ou revestimento dos cabos.
- Temperatura: Fator variável existente no uso do produto e também presente no processo da montagem;

- Contaminação da água: A água pode conter diversas impurezas que estarão em contato com o prensa cabos em sua operação;
- Torque de aperto: Fator presente no processo de montagem do produto, que é realizado de forma manual;
- Tempo de solidificação da resina: Tempo necessário entre a aplicação da resina até o momento em que o prensa cabos esteja apto para montagem e submersão;

Fatores de sinal

Não foram identificados fatores de sinal, ou seja, para este produto, não existe um parâmetro a ser utilizado pelo cliente com a finalidade de alterar a resposta do sistema.

Figura 7 – Diagrama P aplicado a problemática



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com os parâmetros do projeto estabelecidos e representados no diagrama P, foi realizada uma modelagem assistida por computador (CAD), utilizando o programa

computacional Solidworks para viabilizar a produção dos protótipos. Nesta etapa, foram especificados os materiais a serem utilizados no projeto com base nas técnicas de suporte ao projeto de produtos e no método *desing for standard*. Conforme Pahl *et al.* (2007) o método *desing for standard* busca adicionar ordem ao projeto, restringir variações, reduzir os custos do processo, estoque e custos indiretos.

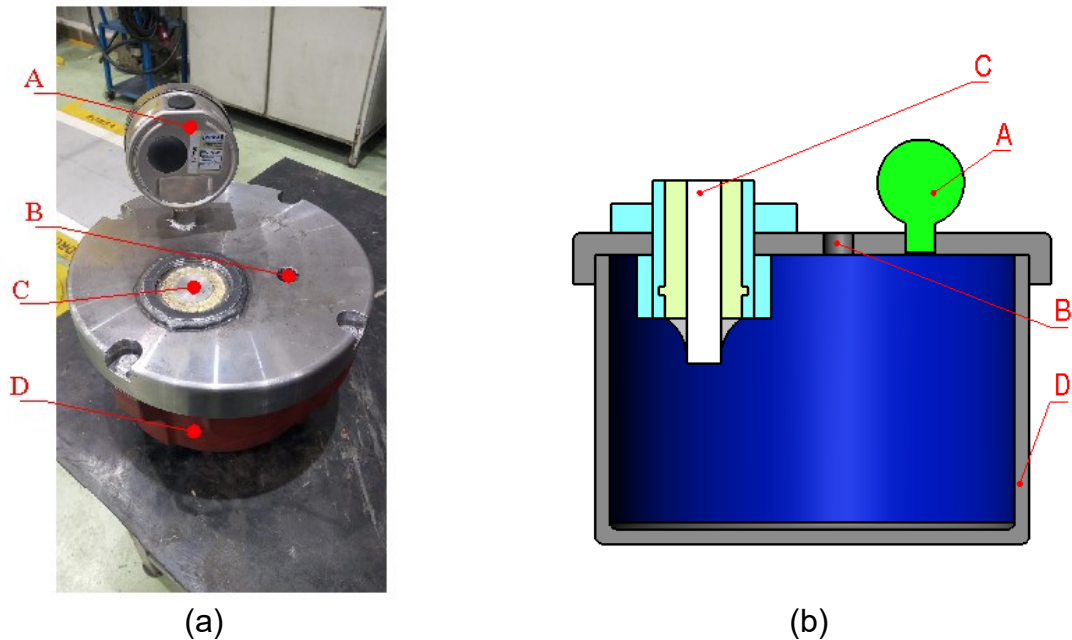
Os detalhes técnicos do projeto estão dispostos no capítulo de resultados deste trabalho.

3.3 APARATO EXPERIMENTAL

Para reproduzir as principais condições de uso do prensa cabos proposto e obter uma base de dados experimental em um ambiente controlado, foi necessário desenvolver um aparato experimental.

A Figura 8a mostra uma foto do aparato experimental utilizado durante os experimentos, enquanto a Figura 8b exibe uma representação esquemática em corte transversal do mesmo. Basicamente, o aparato possui um invólucro de aço (D) e uma tampa onde é possível instalar o manômetro (A) para medição da pressão, um duto de entrada de água (B), onde é instalada uma válvula seccionadora. A região da tampa também possui um orifício, onde foram fixados os diferentes protótipos dos prensa cabos (C). Durante os testes, a região interna do aparato experimental, ilustrada na cor azul escuro na Figura 8b, fica inundada com água pressurizada para simular as condições de uso do produto.

Figura 8 – Aparato experimental para testes do prensa cabos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para pressurização do invólucro com água, uma bomba hidráulica foi utilizada. Esta bomba hidráulica era acionada até que a pressão indicada pelo manômetro atingisse o valor desejado. Tal procedimento permitiu o controle da pressão interna do aparato experimental, de acordo com os diferentes níveis de pressão necessários para cada teste experimental.

A água doce apresenta uma pequena variação atrelada a sua massa específica quando submetida a variação de pressão, sendo que para uma temperatura de 20°C a 1,013 bar a massa específica é de 998 kg/m³, enquanto para a mesma temperatura, porém, a 50,66 bar, a água apresenta uma massa específica de 1000 kg/m³ (Halliday *et al.*, 2002).

Por conta da baixa variação da massa específica em diversos níveis de pressão é possível utilizar a massa de água infiltrada no teste para determinar a taxa de vazamento de água do sistema, sem afetar significativamente o resultado. A equação que define a taxa de vazamento (TV) é:

$$TV = \frac{\text{massa de água}}{\text{tempo}} \quad (3.1)$$

onde, para os testes executados para este trabalho, a massa foi mensurada em gramas (g), o tempo mensurado em horas (h), sendo assim, a unidade final da taxa de vazamento é gramas por hora (g/h).

Para mensurar a massa de água infiltrada durante cada teste, um material esponjoso foi utilizado, acomodando-o em volta do prensa-cabos de tal maneira que viabilizou a absorção de toda água que infiltrava do aparato experimental. Para cada teste e repetição, um novo material esponjoso era designado e utilizado, sendo devidamente pesado antes do teste e logo após a finalização do teste. A diferença entre o peso inicial e o peso final do material esponjoso representa a massa de água infiltrada no teste.

A execução de cada combinação, teve duração de 1 hora, sendo cronometrada por um cronometro.

A balança do modelo 3026 da marca Toledo foi utilizada para mensurar a massa de água infiltrada em cada teste e a pesagem dos componentes da resina. Este equipamento tem uma precisão de 2 g, sendo assim, garante uma incerteza de medição de 4 g. Importante salientar que a balança apresenta um selo do Inmetro e calibração válida até o ano de 2024. Para maiores detalhes sobre o certificado de calibração, favor verificar o Anexo B. A Figura 9a evidencia a balança e a Figura 9b apresenta detalhes do visor e selos de certificação.

Figura 9 - Balança



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

No processo de montagem, devido a um fator de ruído ser o torque de aperto da porca, foi utilizado o torquímetro da marca Gedore. Este equipamento tem a capacidade de aplicar torque entre uma faixa de 140 a 760 N*m, sendo que, contém o certificado de calibração 33009/23 que está detalhado no Anexo C. A Figura 10a apresenta o torquímetro e a Figura 10b mostra que o mesmo havia sido calibrado para a realização dos experimentos.

Figura 10 – Torquímetro



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A pressão manométrica da água pressurizada dentro do aparato experimental foi medida com um manômetro analógico da marca Wika e modelo 233.50.100. Este manômetro possui um certificado de calibração (Anexo D) e conta com uma divisão de escala de 0,5 bar, sendo indicado para uma faixa de pressões de 0 a 25 bar. A Figura 11 evidencia detalhes deste manômetro em seu uso.

Figura 11 - Manômetro



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O manômetro faz a leitura da pressão manométrica, que é a medida da pressão de um fluido em relação à pressão atmosférica local. Se necessário, pressão absoluta do fluido pode ser obtida somando-se o valor da pressão manométrica com o da pressão atmosférica local. (Munson, 2016).

3.4 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Conforme ilustrado no diagrama P da Figura 7, foram identificados quatro fatores de controle e sete fatores de ruído no sistema. Entretanto, para a elaboração do plano experimental, é fundamental identificar quais desses fatores têm uma probabilidade maior de afetar a resposta do sistema. Essa ação visa a eliminação dos fatores pouco relevantes e, conseqüentemente, diminuição dos custos relacionados à execução dos experimentos.

Nesse contexto, uma avaliação com a equipe técnica da empresa foi realizada. Tal análise baseou-se na experiência da equipe com o uso de prensa-cabos no portfólio de produtos da empresa, bem como na análise das especificações técnicas fornecidas pelos clientes nas cotações de produtos adequados para operações submersas.

Após a análise, os fatores de ruídos selecionados para a etapa experimental foram a pressão da coluna d'água e o torque de aperto da porca. Por sua vez, os

fatores de controle selecionados foram a área de contato entre a resina e o cabo, a quantidade de ancoras e o material externo do cabo.

Para elaborar o planejamento dos experimentos foram utilizadas as matrizes ortogonais de Taguchi, que permitem identificar experimentalmente o efeito físico dos fatores de controle sobre a resposta, com o número reduzido de experimentos (Arnér, 2014).

Para compor o planejamento fatorial, com base nos fatores relevantes para a resposta, foram determinados como fatores de controle a área de contato da resina com o cabo, quantidade de ancoras e o material externo do cabo. Além disso, foi considerado os fatores de ruído denominados torque de aperto e pressão. Descrevendo por meios da metodologia, será realizado um plano fatorial completo com uma matriz ortogonal L32(5²), sendo adotado a técnica de matriz combinada.

A Tabela 5, evidencia o plano experimental proposto para este estudo, no qual estão dispostos os valores dos níveis que os fatores serão aplicados. Importante salientar que o efeito do torque e pressão são os fatores de ruído considerados no processo de desenvolvimento, uma vez que podem apresentar uma ampla faixa de valores durante a utilização do prensa cabos.

Tabela 5 – Plano experimental

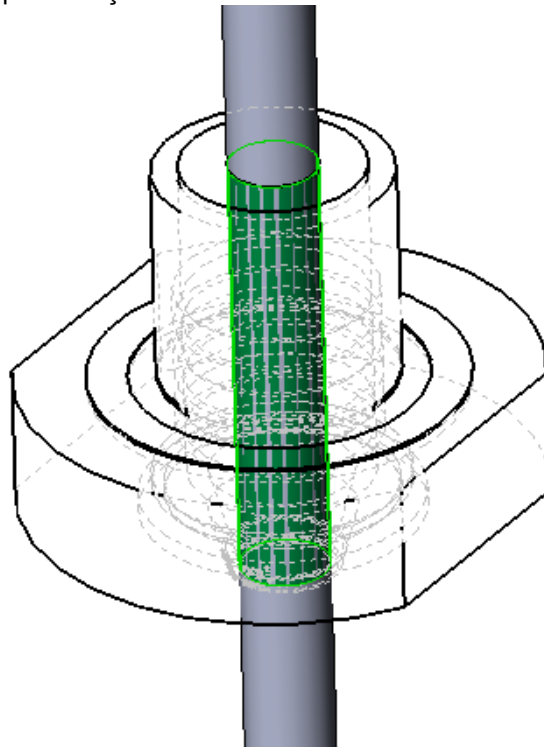
Combinação [-]	Fatores Controle			Fatores de ruído	
	Area [mm ²]	Ancoras [un]	Material [-]	Pressão [bar]	Torque [N*m]
1	2544	1	Silicone	5	300
2	2544	1	Silicone	20	300
3	3392	1	Silicone	5	300
4	3392	1	Silicone	20	300
5	2544	3	Silicone	5	300
6	2544	3	Silicone	20	300
7	3392	3	Silicone	5	300
8	3392	3	Silicone	20	300
9	2544	1	EPS	5	300
10	2544	1	EPS	20	300
11	3392	1	EPS	5	300
12	3392	1	EPS	20	300
13	2544	3	EPS	5	300
14	2544	3	EPS	20	300
15	3392	3	EPS	5	300
16	3392	3	EPS	20	300
17	2544	1	Silicone	5	450
18	2544	1	Silicone	20	450
19	3392	1	Silicone	5	450
20	3392	1	Silicone	20	450
21	2544	3	Silicone	5	450
22	2544	3	Silicone	20	450
23	3392	3	Silicone	5	450
24	3392	3	Silicone	20	450
25	2544	1	EPS	5	450
26	2544	1	EPS	20	450
27	3392	1	EPS	5	450
28	3392	1	EPS	20	450
29	2544	3	EPS	5	450
30	2544	3	EPS	20	450
31	3392	3	EPS	5	450
32	3392	3	EPS	20	450

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A determinação de cada nível dos fatores foi estabelecida com em aplicações que apresentam semelhanças com o presente estudo. Para o fator área de contato com o cabo, foram determinados os níveis de 2544 mm² e 3392 mm². Está é a área superficial, onde a resina está em contato com o corpo externo do cabo. Na Figura 12, foi destacado em verde a região que representa a área de contato do cabo com a

resina. O valor de 2544 mm² representa a área superficial de um cabo com área de seção transversal de 50 mm² e o valor de 3392 mm² representa a área superficial de um cabo com área de seção transversal de 95 mm². O principal objetivo da determinação destes níveis, está atrelado na necessidade da avaliação se a área que a resina está em contato com cabo influencia na resposta, além de, validar que o prensa cabos opera com uma faixa de diâmetros de cabos.

Figura 12 – Representação da área de contato com a resina com o cabo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

As ancoras, conforme explanado na seção 3.2, têm a finalidade de assegurar a aderência da resina no prensa cabos e atua como um redutor de pressão de água, caso infiltre. Devido a isto, foi determinado os níveis de 1 e 3 ancoras. O principal objetivo é avaliar se apenas 1 ancora irá afetar a resposta no sistema.

Para o fator de material, foi determinado os fatores de EPS e silicone porque apresentam propriedades diferentes e podem afetar a resposta do sistema. A Tabela 6 evidencia as principais propriedades do material de EPS e silicone.

Tabela 6 - Propriedades do material EPS e silicone

Material	Definição	Isolamento Térmico	Flexível	Resistência Elétrica
EPS	É um tipo de plástico espumado, leve e isolante térmico. É frequentemente utilizado como revestimento para proteção mecânica e isolamento térmico.	Bom isolante térmico, ajudando a proteger os cabos contra variações de temperatura	Não	Oferece algum isolamento elétrico, porém não eficaz quanto o silicone.
Silicone	É um polímero sintético que possui propriedades elastoméricas, o que significa que é flexível e resistente.	Possui propriedades isolantes térmicas, mas destaca-se especialmente pela capacidade de resistir a temperaturas extremas	Sim	conhecido por sua excelente resistência elétrica, tornando-o adequado para aplicações elétricas e eletrônicas

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para a pressão, foi determinado os níveis de 5 bar e 20 bar. O nível inferior é o valor da pressão que representa 50 metros de coluna d'água, cujo é o objetivo de operação do prensa cabos disposto neste trabalho e o nível de 20 Bar foi determinado com a intenção de forçar a falha no sistema, uma vez que, esta pressão é 4 vezes maior do que o proposto originalmente.

3.4.1 Definição dos níveis do fator torque

Conforme Hibbeler (2015), o torque necessário para apertar uma porca em uma liga de metal depende de vários fatores, incluindo o diâmetro da rosca da porca, o material da liga de metal, o coeficiente de atrito entre as roscas da porca e do parafuso, e o objetivo desejado (por exemplo, evitar o afrouxamento ou garantir um aperto específico). Tais parâmetros são relacionados pela equação

$$T = K * D * F \quad (3.2)$$

onde, T é o torque (N*m), K é o coeficiente de atrito, D é o diâmetro médio do parafuso (mm) e F é a força de aperto desejada (N).

A rosca e o corpo do prensa cabos é composto pela liga de alumínio 6351-T6, tendo um limite de resistência a tração de 304 MPa e limite de escoamento de 277 Mpa.

O coeficiente de atrito (K) é específico para o tipo de rosca e o lubrificante utilizado e deve ser determinado experimentalmente ou consultando tabelas de referência. Um valor inicial de referência para roscas não lubrificadas em ligas de alumínio é o valor próximo de 0,15 (Smith, 2010).

O valor da força máxima de aperto desejada é calculado com base na área da seção transversal do tubo da rosca, multiplicado pelo limite de escoamento do material.

$$F = A * L_e \quad (3.3)$$

onde F é a força máxima de aperto (N), L_e é o limite de escoamento (Mpa) e A é a área (mm²), sendo calculada por

$$A = \frac{\pi}{4 * \left(\frac{d_e + d_i}{2}\right)^2} \quad (3.4)$$

Onde d_e representa o diâmetro externo da rosca (mm) e d_i o diâmetro interno da rosca (mm).

Diante dos valores apresentados, aplicando a Equação 3.3, chega-se a um torque de referência de 1920 N*m.

No primeiro teste prático, antes de iniciar a execução do planejamento experimental, ao tentar aplicar o torque previamente estabelecido, ocorreu o travamento das roscas da porca com o parafuso no torque próximo de 600 N*m, inviabilizando o uso da amostra.

A porca, que foi projetada com espessura de 15 mm e contém 10 filetes de rosca. Em uma análise da causa do problema, foi possível identificar que a rosca da

porca não suportou a carga exercida e acabou rompendo seus filetes e ocasionando o seu travamento junto ao corpo do prensa cabos.

Diante da falha destrutiva da amostra, foi estabelecido um coeficiente de atrito de 0,1 e o limite de escoamento com 31,5% do limite total do material, resultando em 95,76 Mpa. Reaplicando a Equação 3.3, obteve-se o torque de aperto de 450 N*m que foi utilizado como nível máximo do fator de controle atrelado ao torque de aperto da porca.

Para determinar o nível inferior (300 N*m), foi aplicado a analogia da diferença entre o ponto de falha (600 N*m) e o ponto de sucesso (450 N*m) e de forma empírica foi constatado que um torque de 300 N*m já apresenta uma boa aderência entre a porca e o prensa cabos, sendo que, em um processo de fabricação, sem o uso de um torquímetro adequado, o mesmo pode ser montado neste torque de forma errônea, justificando o uso deste valor como um nível do fator de ruído.

3.4.2 Procedimento experimental

A execução do procedimento experimental tem um papel fundamental na pesquisa científica, permitindo a investigação e validação de hipóteses, a obtenção de dados empíricos e o avanço do conhecimento em diversas áreas do saber. A capacidade de conduzir experimentos de forma sistemática e rigorosa é essencial para a produção de evidências sólidas e confiáveis, que sustentam descobertas e teorias científicas (Creswell e Creswell, 2017).

Esta seção aborda detalhes do procedimento experimental adotado neste trabalho, explorando os desafios e particularidades de cada uma das 6 etapas do processo, apresentadas a seguir.

1. Preparação das amostras dos prensa cabos: Cada tratamento do planejamento experimental empregou uma amostra específica de prensa cabos, conforme a Tabela 5. Por este motivo, foi necessário produzir e separar previamente a amostra a ser utilizada em cada tratamento. As 34 amostras empregadas para a realização dos testes são apresentadas na Figura 13.

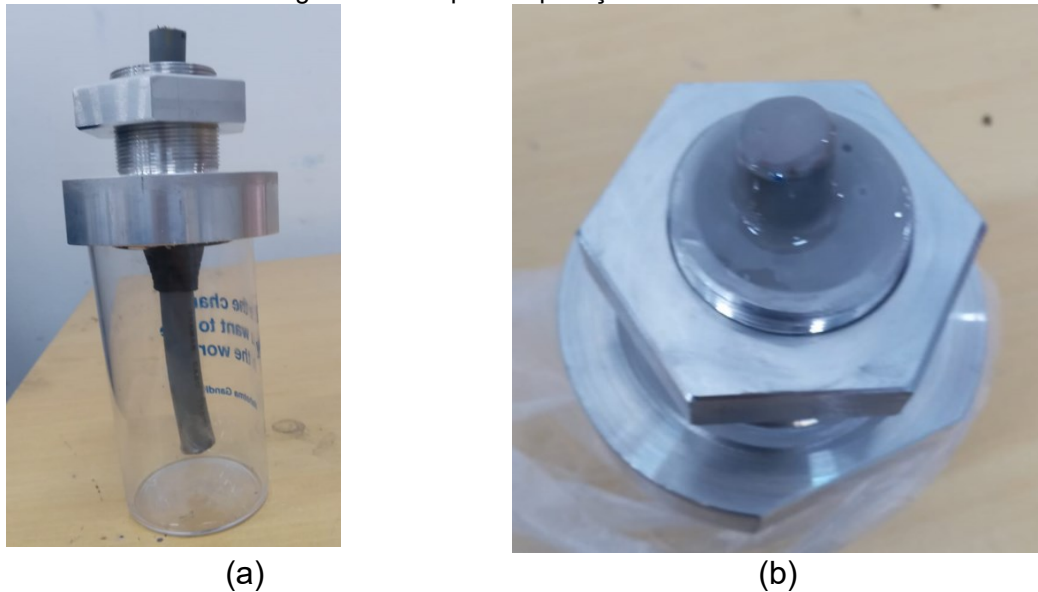
Figura 13 – Amostras dos prensa cabos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

2. Preparação dos materiais: Nesta etapa foram separados todos os materiais que são necessários para execução do teste da combinação. Estes materiais são o prensa cabos, resina, cabo, aparato experimental, chaves, entre outros.
3. Preparação do cabo do cabo: Para não haver infiltração de água através da parte interna do cabo, foi necessário aplicar uma camada de cola de secagem rápida nas duas extremidades do cabo (ver Figura 14b). Adicionalmente, é de valia enfatizar que todos os cabos utilizados nos experimentos foram cordados com o mesmo comprimento, mantendo assim, uma padronização na preparação das amostras.
4. Aplicação da resina: Nesta etapa, ocorre a montagem do cabo no conjunto prensa cabos e a aplicação da resina no seu interno. Para isto, primeiramente é realizada a preparação da resina, misturando os compostos conforme orientação do fabricante, e na sequência o cabo é centralizado no prensa cabos e o volume entre o cabo e a parte interna do prensa cabos é preenchida com a resina. Após a aplicação da resina, é necessário aguardar o tempo de cura para que posteriormente possa seguir com o processo. A Figura 14a evidencia o conjunto do prensa cabos antes da aplicação da resina e a Figura 14b evidencia uma vista superior do conjunto logo após a aplicação da resina.

Figura 14 - Etapa de aplicação da resina



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

5. Montagem do prensa cabos na tampa do aparato experimental: Após o período de cura da resina, o prensa cabos foi montado na tampa do aparato experimental, utilizando-se um torquímetro para aplicar o torque especificado na porca superior do componente.
6. Pressurização do aparato experimental: Inicialmente, monta-se o conjunto da tampa com o prensa cabos no corpo do aparato experimental. Com auxílio da bomba hidráulica, preenche-se a região interna do aparato para que todo o ar seja eliminado e se inicie o processo de pressurização. Quando a pressão atinge o valor desejado, a válvula é fechada e a bomba desligada. A Figura 15 exibe o conjunto do aparato experimental pressurizado em 20 bar, sendo a amostra do prensa cabos indicada logo atrás do manômetro.

Figura 15 - Pressurização do aparato experimental

Prensa cabos

Manômetro



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Caso ocorra infiltração e a pressão do aparato experimental venha a diminuir mais que 15% do valor estabelecido inicialmente, a bomba é ligada novamente e a pressão interna corrigida para o valor especificado no teste.

Com o intuito de identificar potenciais discrepâncias, cada condição experimental apresentada na Tabela 5 foi repetida três vezes, permitindo, obter os dados necessários para o cálculo do valor médio e desvio padrão da taxa de vazamento em cada combinação de fatores de controle e ruído analisada.

3.5 MÉTODO ANOVA E ANÁLISE DE REGRESSÃO

O método análise de variância (ANOVA) foi utilizado para auxiliar no processo de determinação dos fatores de controle e ruído, que possuem efeito significativo sobre a variável resposta. O objetivo da técnica é analisar a variação média dos resultados dos testes e demonstrar quais são os fatores que possuem efeito estatisticamente significativo para a resposta do sistema (Montgomery, 2001).

Para explanação do método, a Tabela 7 foi apresentada as principais equações envolvidas no método ANOVA, considerando dois fatores representados pelas letras A e B, testados em 2 níveis. As colunas da tabela mostram para cada uma das fontes de variação - A, B, AB e erro, as respectivas somas dos quadrados (SQ), os graus de liberdade (gl), os quadrados médios (QM) e a estatística do teste F - razão f. Com base nos resultados obtidos para a estatística f associados aos fatores A e B, determina-se se os efeitos de tais fatores são significativos (Montgomery, 2001).

Tabela 7 - ANOVA de um experimento com dois fatores

Fonte de variação	SQ	gl	QM	Razão f
A	$SQ_A = \frac{1}{4n} [a + ab - b - 1]^2$	$a - 1$	$QM_A = \frac{SQ_A}{gl_A}$	$f = \frac{QM_A}{QM_{erro}}$
B	$SQ_B = \frac{1}{4n} [b + ab - 1 - a]^2$	$b - 1$	$QM_B = \frac{SQ_B}{gl_B}$	$f = \frac{QM_B}{QM_{erro}}$
AB	$SQ_{AB} = \frac{1}{4n} [b + ab - 1 - a]^2$	$(a - 1)(b - 1)$	$QM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{gl_{AB}}$	$f = \frac{QM_{AB}}{QM_{erro}}$
ERRO	$SQ_{erro} = SQ_{total} - SQ_A - SQ_B - SQ_{AB}$	$ab(n - 1)$	$QM_{erro} = \frac{SQ_{erro}}{gl_{erro}}$	
TOTAL	$\sum y_n^2 - \frac{y^2}{2^k * n}$	$N - 1$		

Fonte: Adaptado de Montgomery, 2023.

O método ANOVA também é empregado em conjunto com a análise de regressão, permitindo identificar quais dos coeficientes ajustados para o modelo matemático apresentam efeito sobre a variável resposta. Neste caso, o objetivo é decompor a variação total na variável dependente em duas componentes: variação explicada pelo modelo de regressão e variação não explicada, denominada erro.

As equações básicas relacionadas com a obtenção de um modelo de regressão já foram apresentadas na seção 2.2.7. Uma grandeza largamente utilizada para julgar a adequação de um modelo de regressão é a razão da soma dos quadrados, que é expressa por

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_e}{SQ_t} \quad (3.1)$$

onde SQ_e é a soma dos quadrados de erro e SQ_t a soma dos quadrados total.

A razão R^2 indica se as mudanças observadas na variável resposta são causadas pelas variáveis independentes do modelo, onde $0 \leq R^2 \leq 1$, sendo que quanto mais próximo de 1 o resultado, maior será a representatividade dos dados experimentais obtido pela análise de regressão dos dados.

4 RESULTADOS

Desde o início deste projeto, é possível de reconhecer a importância de superar os desafios associados ao ambiente submerso, onde as pressões e condições severas de uso, representam obstáculos significativos. Até o momento, os esforços se concentraram na pesquisa e no desenvolvimento de um prensa cabos que não apenas atenda a esses requisitos rigorosos, mas que traga avanços tecnológicos para o segmento.

Ao longo deste capítulo, serão analisados os dados obtidos e discutidas as implicações dos resultados para a aplicação prática da tecnologia desenvolvida. Os resultados aqui apresentados representam um passo significativo em direção à expansão das fronteiras do conhecimento e à superação dos desafios enfrentados na exploração de ambientes submersos. Este trabalho contribui para a evolução da tecnologia submersa, fornecendo uma solução robusta e confiável para uma ampla gama de aplicações, desde a pesquisa científica até a indústria de diferentes segmentos.

Resumidamente, a seção 4.1 irá explicar os resultados e detalhamento do projeto do prensa cabos desenvolvido. A seção 4.2 irá evidenciar a análise dos dados experimentais, detalhando análises do plano experimental, análise de efeitos dos fatores, análise ANOVA e de regressão.

A seção 4.3 irá apresentar a validação dos resultados, expondo em detalhes as condições aplicadas no teste de validação.

4.1 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DO PRENSA CABOS

Como apresentado no Capítulo 3 do presente trabalho, o desenvolvimento do projeto do prensa cabos, foi baseado no método projeto robusto, a técnica QFD, diagrama P e uma vasta pesquisa em bibliografias do tema deste trabalho.

A partir dos requisitos técnicos do prensa cabos, identificados com auxílio do QFD (ver seção 3.1.1), foram desenvolvidas especificações capazes de atender tais requisitos. As principais especificações técnicas selecionadas para o prensa cabos, como o tipo de resina e a coifa centralizadora, serão detalhadas a seguir.

Devido ao uso em ambiente submerso, foi necessário determinar o material do corpo do prensa cabos apropriado para este meio, porém, com baixo custo. Com

base nisto, foi selecionada a liga de alumínio 6351-T6 como matéria prima. Esta liga apresenta limite de resistência a tração de 304 MPa e limite de escoamento de 277 Mpa (Dassault Systèmes, 2022). Este material foi selecionado por apresentar um custo relativamente baixo, alta disponibilidade, ser de fácil manufatura e resistente a efeitos de corrosão.

Com intuito de realizar a vedação entre o diâmetro interno do prensa cabos e o cabo, foi identificada a necessidade de preencher o volume entre estes componentes com uma resina. Para isto, foi selecionada uma resina com propriedades exotérmicas denominada comercialmente como resina epóxi.

A resina epóxi é um tipo de polímero termofixo amplamente utilizado em diversas aplicações industriais e comerciais. É uma classe de polímero que passa por uma reação química de polimerização quando misturada com um endurecedor, resultando em um material rígido, resistente e de alta aderência. As resinas epóxi são conhecidas por suas propriedades mecânicas, adesivas e de resistência química, tornando-as ideais para aplicações como adesivos estruturais, revestimentos, laminação de compósitos e encapsulamento eletrônico (Callister e Rethisch, 2018).

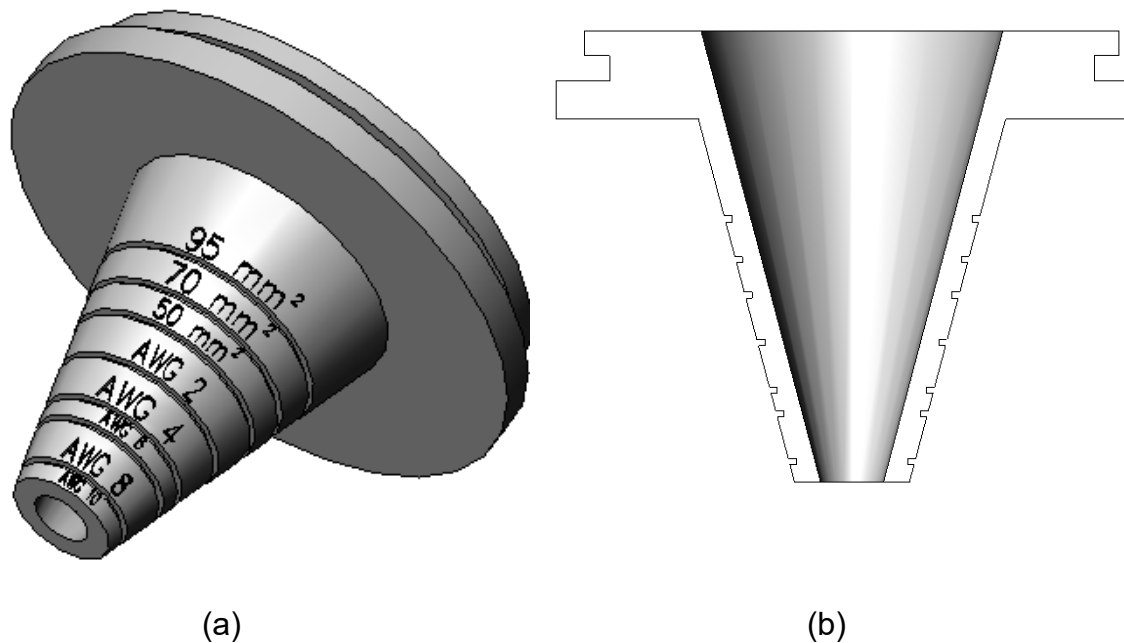
Adicionalmente, a escolha da resina epóxi deve-se ao fato dela ser recomendada para uso em isolações e apresenta alta resistência a rachaduras e choques térmicos.

Para auxiliar no processo de montagem, um centralizador de cabos, denominado coifa foi desenvolvido. A matéria prima desta coifa é borracha neopreme e tem um formato cônico que tem a função de forçar a centralização do cabo. Importante salientar que o produto pode ser usado para uma variação de cabos com áreas de secção transversal de 5,26 mm² até 95 mm². Como função secundária, esta coifa tem a finalidade de atenuar possíveis ações cíclicas submetidas ao cabo por conta do ambiente reduzindo a possibilidade de falha por fadiga. A Figura 16a apresenta o modelo de coifa em uma perspectiva tridimensional e a Figura 16b apresenta uma visão de um corte que atravessa o centro do componente onde destaca-se que a área interna do cone não contem ranhuras. Ambas as imagens (Figura 16a e Figura 16b) foi desenvolvida através do sistema CAD Solidworks.

A ranhura superior a região cônica tem a finalidade de ser um encaixe para a montagem, sendo que, devido a flexibilidade da borracha neopreme, a montagem no prensa cabos é realizado sem a necessidade de ferramentas, ou seja, apenas aplicando pressão com as mãos.

Para simplificar a operação e reduzir a probabilidade de erros na montagem, a região cônica contém marcações que representam a utilização para as principais variações de cabos. Os valores representados correspondem a secção transversal do cabo e o rebaixo logo abaixo de cada variação representa o local para o operador realizar o corte da coifa para viabilizar a montagem no cabo. Os valores representados com AWG representam bitolas de cabos usando o sistema de medidas *American Wire Gauge*.

Figura 16 - Coifa



Fonte: autor, 2023.

Com todos os componentes definidos, uma montagem do prensa cabos foi desenvolvido com o auxílio do software Solidworks e seus componentes foram orçados para futura fabricação. Para simplificar o entendimento, a Figura 17 apresenta a montagem em uma seção de corte originada do centro do prensa cabos.

Analisando os custos do projeto, observou-se que este conceito apresenta uma redução de custo equivalente a 52 vezes o valor que seria dispendido para adquirir um prensa cabos equivalente através do sistema de importação, além que, este projeto é composto com materiais de alta disponibilidade no mercado nacional,

garantindo assim um tempo de obtenção do produto no mínimo 12 vezes menor se comparado ao processo de importação.

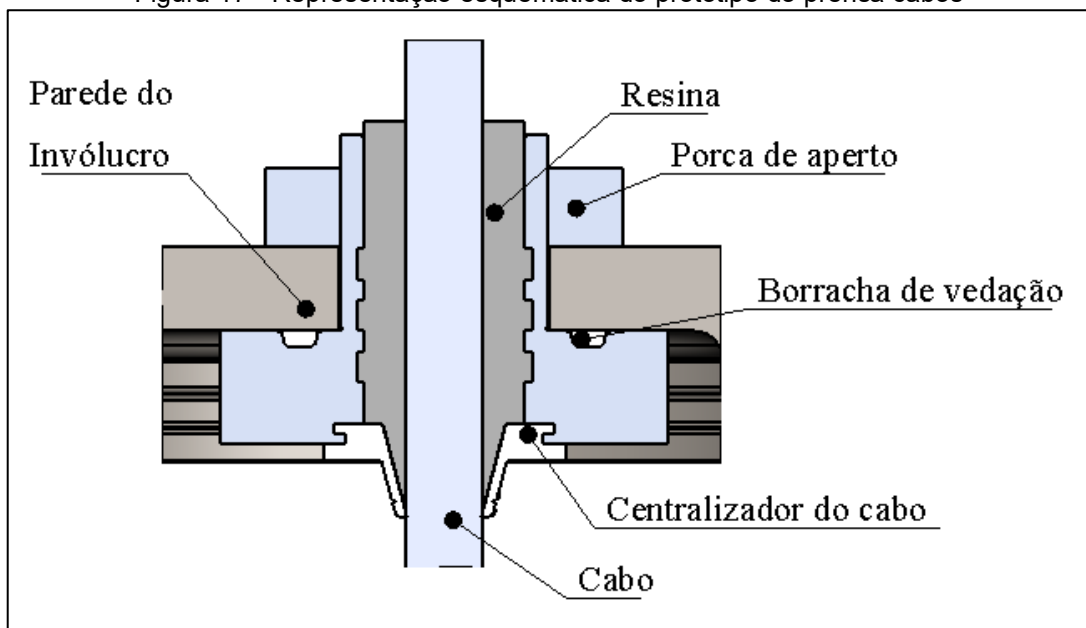
Apresentando os detalhes da Figura 17, destaca-se que a parede do invólucro está representando o local de montagem do prensa cabos. A borracha de vedação, tem a finalidade de vedar, impedindo que a água infiltre por meio da interface da parede do involucro e o corpo externo do prensa cabos.

O centralizador do cabo é composto pela coifa. Salienta-se que o corpo do prensa cabos contém uma ranhura que acomoda perfeitamente a ranhura da coisa, realizando desta forma um encaixe mecânico.

A resina preenche o espaço entre o interno do prensa cabos até o diâmetro externo do cabo. Devido ao fato que no momento que é realizada a aplicação, a resina apresenta-se no estado liquido, sendo assim, os canais das ancoras são preenchidos de forma automática devido ao efeito da gravidade, visto que, a resina é aplicada com o prensa cabos na posição vertical.

A porca de aperto é o componente que tem a finalidade de permitir a montagem e desmontagem do equipamento, além de, ser o responsável em aplicar a pressão necessária para que a borracha de vedação consiga desempenhar seu papel com eficiência.

Figura 17 - Representação esquemática do protótipo do prensa cabos



Fonte: autor, 2023.

4.2 ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção do trabalho serão apresentadas as análises da fase experimental do projeto de prensa cabos. Na seção 4.2.1 serão apresentados os resultados obtidos a partir do plano experimental de Taguchi e a análise dos dados, explanando a relação S/N e o comportamento do aparato experimental durante os testes. Na seção 4.2.2 serão apresentadas as análises dos efeitos dos fatores perante a taxa de vazamento de água. Na seção 4.2.3 é explanado a análise ANOVA, onde é calculado e evidenciado os fatores com relevância estatística e sua contribuição para o sistema. Na seção 4.2.4 é realizado e explanado a análise de regressão do sistema. Visando aproximar o sistema de regressão do modelo real, a seção 4.2.5 apresenta uma nova regressão de dados, porém, considerando apenas as combinações do material EPS. Na seção 4.2.6 apresenta a seleção dos fatores de controle que minimizam a taxa de vazamento de água no sistema.

4.2.1 Resultados do plano experimental de Taguchi

Conforme apresentado na seção 3.4, um plano experimental ortogonal do tipo L32 com três fatores de controles e dois fatores de ruído foi utilizado neste trabalho. A Tabela 8 mostra os resultados da taxa de vazamento correspondentes às 32 combinações testadas neste trabalho, que tiveram suas medições repetidas 3 vezes. Os protótipos testados apresentaram resultados dispersos que analisando sem métodos de engenharia, dificilmente seria possível entender a contribuição de cada fator na resposta do sistema.

Na Tabela 8, destaca-se como tratamento dos resultados as colunas de desvio padrão (s), relação sinal ruído do tipo menor é melhor (S/N) e coeficiente de variação (COV).

Conforme Bussab e Morettin (2017), o COV é uma medida estatística que expressa a variabilidade relativa de um conjunto de dados em relação à média. Ele é usado para comparar a dispersão de dados em diferentes conjuntos, especialmente quando esses conjuntos têm médias diferentes. A equação para o COV é:

$$COV = \frac{s}{\bar{y}} \quad (4.1)$$

onde, s é o desvio padrão e \bar{y} é a média.

As colunas abaixo do tópico “Vazamento”, indicadas pelos números 1, 2 e 3, representam a repetição do teste da mesma combinação. Ressalta-se que a pressão apresenta na tabela, conforme explanado na sessão 3.3, é a pressão manométrica.

Tabela 8 - Resultado dos testes

Combinação [-]	Fatores Controle			Fatores de ruído		Vazamento			Vazamento médio [g/h]	s [g/h]	S/N [dB]	COV [%]
	Area [mm ²]	Ancoras [un]	Material [-]	Pressão [bar]	Torque [N*m]	1 [g/h]	2 [g/h]	3 [g/h]				
1	2544	1	Silicone	5	300	192	198	194	194,7	3,1	-45,8	1,6%
2	2544	1	Silicone	20	300	68	68	70	68,7	1,2	-36,7	1,7%
3	3392	1	Silicone	5	300	110	116	110	112,0	3,5	-41,0	3,1%
4	3392	1	Silicone	20	300	50	54	60	54,7	5,0	-34,8	9,2%
5	2544	3	Silicone	5	300	120	136	124	126,7	8,3	-42,1	6,6%
6	2544	3	Silicone	20	300	78	60	60	66,0	10,4	-36,5	15,7%
7	3392	3	Silicone	5	300	100	102	96	99,3	3,1	-39,9	3,1%
8	3392	3	Silicone	20	300	56	60	62	59,3	3,1	-35,5	5,1%
9	2544	1	EPS	5	300	20	34	28	27,3	7,0	-29,0	25,7%
10	2544	1	EPS	20	300	52	60	60	57,3	4,6	-35,2	8,1%
11	3392	1	EPS	5	300	36	30	40	35,3	5,0	-31,1	14,2%
12	3392	1	EPS	20	300	66	62	56	61,3	5,0	-35,8	8,2%
13	2544	3	EPS	5	300	30	36	32	32,7	3,1	-30,3	9,4%
14	2544	3	EPS	20	300	58	62	66	62,0	4,0	-35,9	6,5%
15	3392	3	EPS	5	300	24	26	30	26,7	3,1	-28,6	11,5%
16	3392	3	EPS	20	300	64	60	60	61,3	2,3	-35,8	3,8%
17	2544	1	Silicone	5	450	160	150	156	155,3	5,0	-43,8	3,2%
18	2544	1	Silicone	20	450	10	16	10	12,0	3,5	-21,9	28,9%
19	3392	1	Silicone	5	450	120	136	124	126,7	8,3	-42,1	6,6%
20	3392	1	Silicone	20	450	10	16	14	13,3	3,1	-22,7	22,9%
21	2544	3	Silicone	5	450	98	100	104	100,7	3,1	-40,1	3,0%
22	2544	3	Silicone	20	450	16	16	300	110,7	164,0	-45,9	148,2%
23	3392	3	Silicone	5	450	110	102	110	107,3	4,6	-40,6	4,3%
24	3392	3	Silicone	20	450	20	22	28	23,3	4,2	-27,5	17,8%
25	2544	1	EPS	5	450	0	0	0	0,0	0,0	∞	-
26	2544	1	EPS	20	450	0	0	0	0,0	0,0	∞	-
27	3392	1	EPS	5	450	0	0	0	0,0	0,0	∞	-
28	3392	1	EPS	20	450	0	0	0	0,0	0,0	∞	-
29	2544	3	EPS	5	450	0	0	0	0,0	0,0	∞	-
30	2544	3	EPS	20	450	0	0	0	0,0	0,0	∞	-
31	3392	3	EPS	5	450	0	0	0	0,0	0,0	∞	-
32	3392	3	EPS	20	450	0	0	0	0,0	0,0	∞	-

Fonte: autor, 2023.

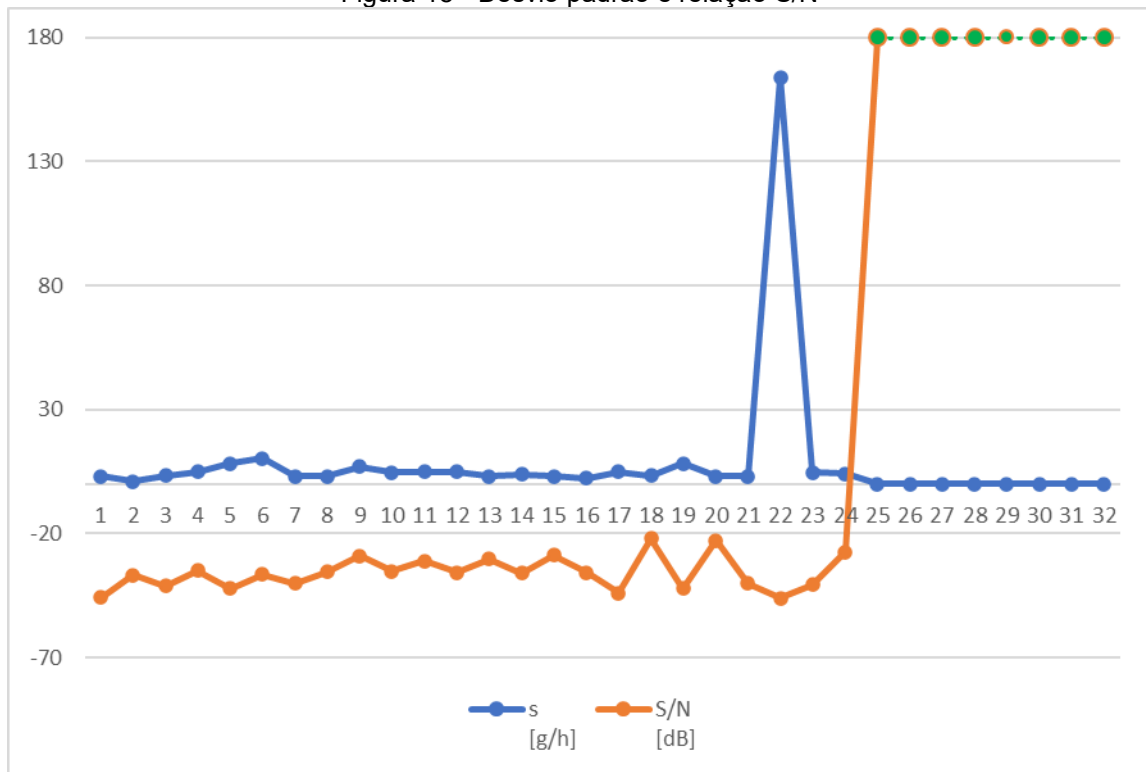
Com base nos resultados, pode-se observar que as combinações 25 a 32 não apresentaram vazamento durante os testes. Avaliando superficialmente, identifica-se que as combinações com maior vazamento médio contêm o fator do material de silicone. Outro ponto relevante é que o vazamento médio teve variações de 0 até 194,7 g/h, evidenciando que um ou mais fatores estão influenciando na resposta do sistema. O efeito dos fatores considerados será explanado com maior detalhe na seção 4.2.2.

Em uma visão simplista, as combinações 25 a 32 não apresentaram vazamento e por ventura se pode pensar em aplicar uma destas configurações para ser usado no modelo final, porém, se fosse aplicado esta tratativa, existira uma perda grande de informação como por exemplo o efeito entre a área, ancoras e pressão, visto que os níveis inferior e superior estão presentes nestas combinações. Outro ponto relevante é que a análise detalhada destes resultados permite o entendimento dos mecanismos envolvidos na operação do prensa cabos sobre diferentes condições. Por exemplo, a falta desta análise compromete a avaliação entre os efeitos dos níveis atrelados ao torque, pressão e material do cabo, ou seja, não teria uma definição técnica do motivo que houve vazamento de água nas demais combinações. Tal conhecimento é necessário para futuros desenvolvimentos do prensa cabos.

A Figura 18 evidencia os resultados da relação S/N e do desvio padrão (s) de cada tratamento, na qual o eixo vertical do gráfico apresenta os valores da relação S/N e do desvio padrão, sendo a linha azul representando o desvio padrão (s) e a linha laranja representando a relação S/N conforme legenda, e o eixo horizontal representa cada um dos 32 tratamentos. Para elaboração do gráfico, foi utilizado a relação S/N menor é melhor, expressa pela Equação 2.3. A decisão de utiliza-la está atrelado ao fato da necessidade de obter a menor taxa de vazamento do sistema. O desvio padrão foi calculado através da equação 2.4.

Destaca-se que os valores da relação S/N tendem ao infinito para as combinações de 24 a 32. Na Figura 18, estes valores que tendem ao infinito estão destacados com a cor verde, sendo que, graficamente a exibição foi saturada no topo de escala do gráfico.

Figura 18 - Desvio padrão e relação S/N



Fonte: autor, 2023.

Verifica-se, pela Figura 18, que para valores mais altos da relação S/N, que indicam maior robustez da condição, os valores de desvio padrão são mais baixos. O que faz sentido, pois quanto maior for a relação S/N, mais robusto estará o processo e, conseqüentemente, menor será a sua variabilidade e o vazamento médio. Por outro lado, a combinação 22 que apresentou o maior desvio padrão, contém a pior relação S/N do gráfico. Extraindo os pontos extremos da relação S/N que é do lado positivo os valores que tendem ao infinito e do negativo que é o valor da combinação 22, identifica-se uma variação pequena nos dados, dando uma impressão de gráfico com características de “dentes de serra” que indicam variabilidade dos dados.

Com base nos resultados da Tabela 8, também elaborou-se a Figura 18 onde observa-se que as combinações com maior valor da relação S/N correspondem aos tratamentos 25 a 32, nos quais os valores da relação S/N tenderam a $+\infty$, devido ao fato que média da taxa de vazamento e o desvio padrão resultou em 0 g/h, sendo estas as condições de maior robustez, quando comparada às demais.

Destaca-se que durante a realização dos experimentos, observou-se uma falha destrutiva do protótipo do prensa cabos na terceira repetição da combinação

número 22. Tal falha provocou o vazamento de praticamente toda a água pressurizada no interior do aparato experimental. Para evitar que tal resultado criasse um ponto fora do padrão da base de dados, decidiu-se por atribuir a ele um valor de 50% maior que os maiores valores observados (condição 1), o que equivale a 300 g/h. Após a avaliação do protótipo, ficou evidente que a falha destrutiva ocorreu devido à falta de aderência do cabo de silicone à resina, o que resultou no desprendimento do cabo e, conseqüentemente, em uma taxa de vazamento anormal. A Figura 19 evidencia o cenário da falha, sendo que a seta em vermelho representa o sentido em que o cabo se moveu devido à ação da pressão de 20 bar, após o desprendimento da resina epóxi da superfície do cabo. Após a desmontagem do aparato experimental, foi identificado que o cabo estava totalmente livre, sendo possível removê-lo. A falha destrutiva da combinação 22 também é evidente na Figura 18, onde é possível verificar o maior valor do desvio padrão e o menor valor da relação S/N, em relação às demais condições.

Figura 19 - Falha destrutiva da combinação

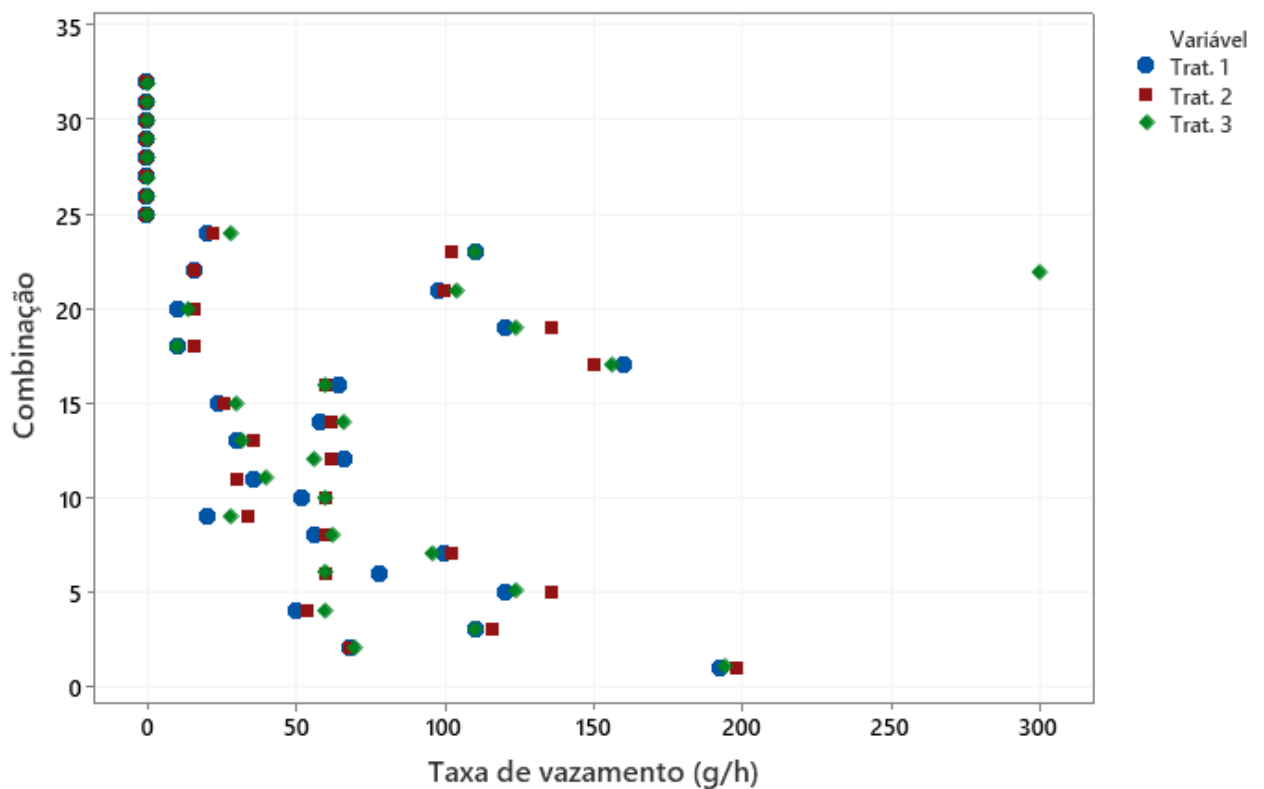


Fonte: autor, 2023.

Uma comparação dos resultados da taxa de vazamento para cada condição analisada na Tabela 8 é apresentada na Figura 20, permitindo observar a dispersão

dos dados. Por exemplo, as medições realizadas com a combinação 1 apresentam média um pouco inferior a 200 g/h e uma pequena variação, enquanto a combinação 19 apresenta taxa de vazamento médio próxima a 125 g/h, mas com dispersão maior que a combinação 1. Novamente, fica evidente o bom desempenho das combinações 25 a 32, que não apresentaram vazamentos em nenhuma das três medições (0 g/h). Adicionalmente, é possível observar o efeito dos fatores de ruído sobre os diferentes tipos de protótipos. Por exemplo, observa-se que as combinações 3 e 4, que foram realizadas com o mesmo conceito de protótipo (ver Tabela 8), apresentaram valores médios distintos, 112 e 55 g/h respectivamente, e diferentes dispersões. Tal diferença é justificada pelo efeito das diferentes combinações dos fatores de ruídos aplicadas a cada uma destas condições. O mesmo raciocínio é válido para as demais combinações apresentadas na Figura 20.

Figura 20 - Dispersão dos resultados das combinações contra tratamentos



Fonte: autor, 2023.

4.2.2 Análise de efeitos dos fatores

Após a análise realizada na seção 4.2.1, tornou-se evidente a presença de uma interação significativa entre os fatores considerados no experimento e a taxa de vazamento medida nos diferentes conceitos de prensa cabos propostos neste trabalho. Por este motivo, o propósito principal desta seção é conduzir uma interpretação minuciosa dos efeitos dos fatores sobre a resposta do sistema.

A Tabela 9 exibe os valores médios da taxa de vazamento para os níveis mínimo (1) e máximo (2) de cada fator. Desta forma, o valor de 71,5 g/h corresponde ao valor médio da taxa de vazamento de todos os resultados da Tabela 8 obtidos com o fator de ruído “Pressão” no nível mínimo (5 bar). Por sua vez, a linha delta na Tabela 9 demonstra a diferença entre os resultados dos níveis 1 e 2 para cada fator. Com base nos resultados obtidos, é possível observar que os fatores que tiveram o maior impacto, ou seja, apresentaram o maior delta entre os níveis, em ordem de importância, são: material, torque, pressão, área e ancoras.

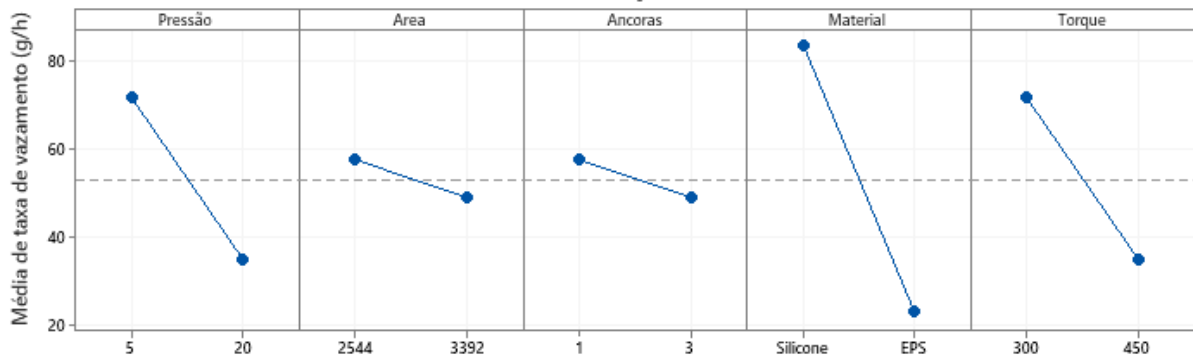
Tabela 9 - Comparação dos efeitos dos fatores de controle e ruído

Nível	Pressão	Área	Ancoras	Material	Torque
1	71,5 g/h	57,4 g/h	57,4 g/h	83,5 g/h	71,5 g/h
2	34,7 g/h	48,7 g/h	48,8 g/h	22,7 g/h	34,6 g/h
Delta	36,84	8,66	8,58	60,75	36,92

Fonte: autor, 2023.

Com o auxílio dos dados da Tabela 9, foi possível obter os efeitos que cada fator de controle causa na resposta do sistema, conforme apresentado na Figura 21. Por exemplo, observa-se que ao mudar o material do silicone para o EPS ocorre uma redução na taxa de vazamento média de cerca de 80 g/h para 20 g/h. Importante salientar que apenas esta informação não valida se o fator tem influência estatística na resposta do sistema, ou seja, a imagem traz apenas uma visão da tendência, sem de fato comprovar o efeito. Para comprovar estatisticamente quais os fatores que são relevantes no fator resposta deve-se aplicar a análise de variância (ANOVA) aos dados obtidos experimentalmente, conforme será apresentado na seção 4.2.3.

Figura 21 - Gráfico de efeitos para a média de taxa de vazamento (g/h).

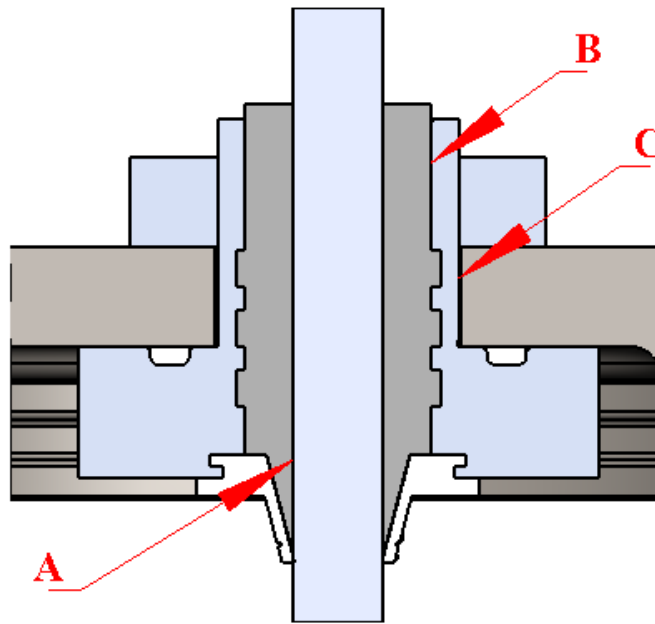


Fonte: autor, 2023.

Na Figura 21 pode-se observar que o aumento da pressão resulta na queda da taxa de vazamento média, de aproximadamente 70 g/h para 35 g/h. Este resultado é contra intuitivo, pois, conforme estabelecem os princípios da mecânica dos fluidos, o aumento da pressão exercida em um escoamento incompressível por um duto com secção de passagem fixa, deve resultar em um aumento da vazão. (Fox *et al.*, 2006).

Para explicar tal comportamento, foi conduzida uma análise detalhada para identificar os possíveis pontos de infiltração de água no sistema. Os resultados dessa análise estão apresentados de forma clara na Figura 22. Pode-se notar a existência de apenas três potenciais locais, onde vazamentos de água podem ocorrer no sistema. Esses locais críticos são: a lacuna entre o diâmetro externo do cabo e a camada de resina (designado como "A" na Figura 22), o espaço entre o diâmetro interno do prensa-cabos e a resina (identificado como "B"), e a região situada entre a tampa do aparato e a superfície externa do prensa-cabos (indicado como "C").

Figura 22 - Locais de possíveis vazamentos



Fonte: autor, 2023.

Ao fazer uma análise preliminar dos pontos destacados na Figura 22, pode-se esperar que quanto maior a pressão no sistema, maior será a taxa de vazamento. No entanto, como já mencionado, essa suposição não se aplica a este sistema específico, devido a uma particularidade dos materiais utilizados. Para explicar esse comportamento, é fundamental destacar que durante a realização dos experimentos, não houve nenhum vazamento na região do diâmetro interno do prensa-cabos em relação à resina (ponto "B").

Essa observação é fundamental para entender a dinâmica do sistema e os fatores que influenciam a taxa de vazamento, indicando que a pressão não é o único componente crítico. Outros fatores, já mencionados anteriormente, como o material e as ancoras, podem estar desempenhando um papel mais significativo na ocorrência de vazamentos, o que requer uma análise mais detalhada para determinar as relações entre esses parâmetros e a taxa de vazamento.

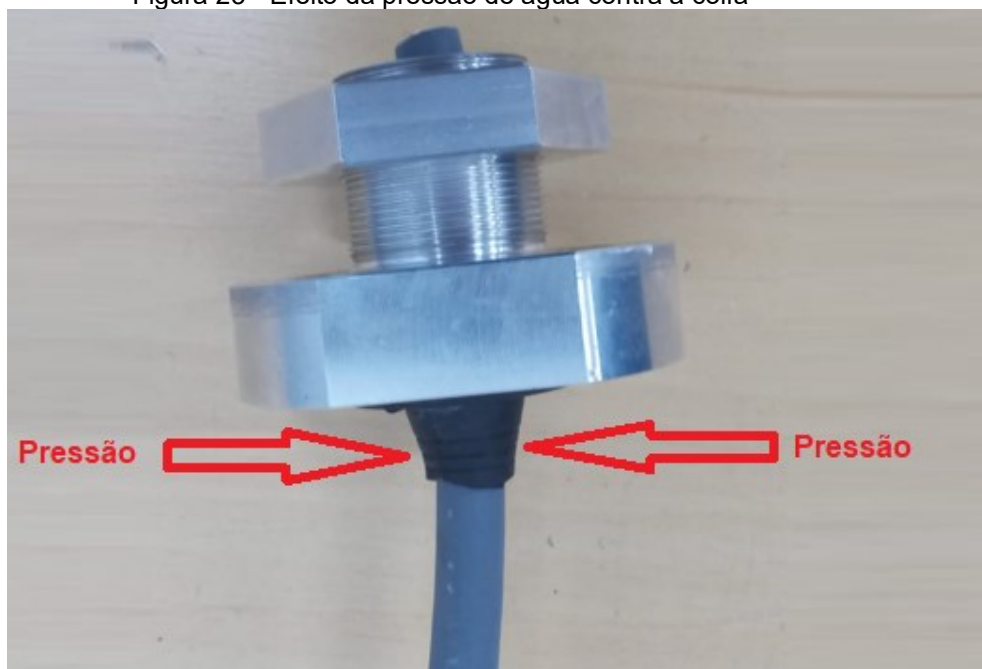
Retornando aos resultados da Tabela 8, nas combinações de 9 a 16, onde houve uma taxa de vazamento exclusivamente entre a tampa do aparato *versus* externo do prensa cabos (ver região C Figura 22), observa-se que conforme se aumenta a pressão, a taxa de vazamento aumenta também. Diante destes dados, presume-se que o comportamento inesperado entre pressão e taxa de vazamento,

ocorra na região entre o diâmetro externo do cabo *versus* resina (ver região A Figura 22).

Como anteriormente ilustrado na Figura 19, ocorreu uma falha de natureza destrutiva durante o teste da combinação 22, resultando no desprendimento completo do cabo da camada de resina. A partir deste teste destrutivo e dos dados coletados na Tabela 8, especificamente nas combinações 17 a 24, onde foram registrados vazamentos exclusivamente na região entre a tampa do aparato e a superfície externa do prensa-cabos (região C Figura 22), confirma-se a clara evidência de falta de aderência eficaz da resina ao corpo externo do cabo.

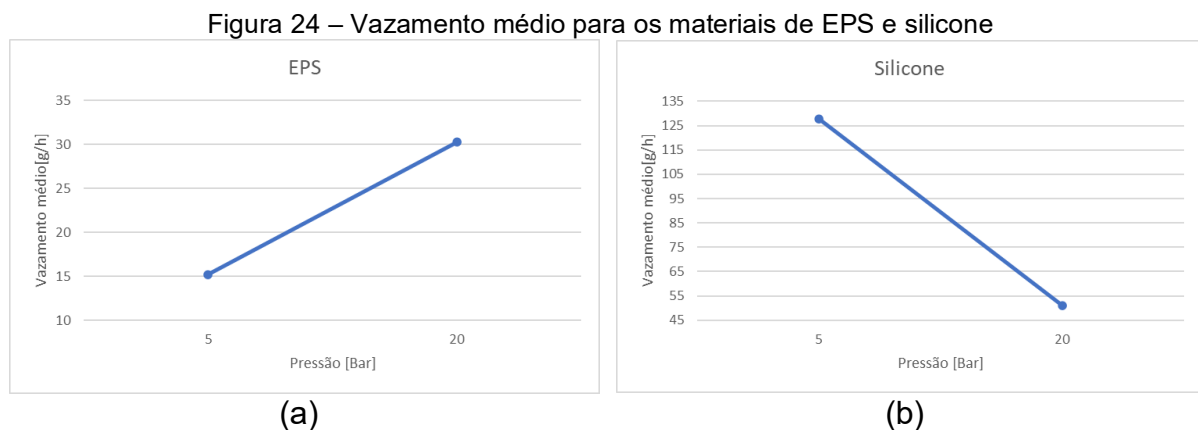
Realizando uma análise mais aprofundada do projeto, a explicação lógica para a redução da taxa de vazamento de água com o aumento da pressão na condição de uso com cabo de silicone está relacionada à característica da coifa, conforme mostrada na Figura 16. A coifa possui um formato cônico, e suas bordas mantêm contato direto com o cabo. À medida que a pressão aumenta, a própria água exerce pressão sobre a coifa, como representado na Figura 23, o que força a superfície interna da coifa em direção à superfície do cabo, reduzindo significativamente o vazamento pela região C da Figura 22, quando comparado às condições de testes realizados com silicone e baixa pressão.

Figura 23 - Efeito da pressão de água contra a coifa



Fonte: autor, 2023.

O comportamento de diminuição do vazamento conforme o aumento da pressão pode ser visualizado na Figura 24, onde foi calculado o vazamento médio para das pressões de 5 e 20 bar, nas condições do material de EPS e de silicone. Conforme a Figura 24a, que representa o vazamento médio para o material de EPS, é possível verificar que conforme aumenta-se a pressão de 5 para 20 bar, o vazamento médio aumenta. Por outro lado, a Figura 24b, que representa o vazamento médio para o material de silicone, é possível verificar que conforme aumenta-se a pressão de 5 para 20 bar, o vazamento médio diminui.



Fonte: autor, 2023.

4.2.3 Análise de variância (ANOVA)

O método ANOVA foi utilizado para determinar quais fatores demonstraram efeitos estatisticamente significativos na taxa de vazamento e na relação S/N das amostras. Os resultados da análise de variância estão apresentados na Tabela 10, considerando um nível de confiança de 95%. Além disso, foram aplicados os cálculos da Equação 2.6 para extrair, em termos percentuais, a contribuição de cada fator para a resposta do sistema.

Dessa forma, a Tabela 10 oferece uma visão detalhada dos efeitos estatísticos, até segunda ordem, dos fatores sobre as variáveis de interesse, proporcionando informações cruciais para a compreensão da influência de cada fator no desempenho do sistema.

Tabela 10 - Análise ANOVA para os efeitos sobre a taxa de vazamento (g/h)

Variável	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Valor-F	Valor-P	Contribuição
Pressão	1	10853,6	10853,6	59,64	0,000	13%
Área	1	600,9	600,9	3,3	0,088	-
Ancoras	1	589,4	589,4	3,24	0,091	-
Material	1	29524,5	29524,5	162,23	0,000	36%
Torque	1	10902,7	10902,7	59,91	0,000	13%
Pressão*Área	1	460,1	460,1	2,53	0,131	-
Pressão*Ancoras	1	997,6	997,6	5,48	0,032	-
Pressão*Material	1	21493,6	21493,6	118,11	0,000	26%
Pressão*Torque	1	2134,2	2134,2	11,73	0,003	3%
Área*Ancoras	1	227,6	227,6	1,25	0,280	-
Área*Material	1	696,9	696,9	3,83	0,068	-
Área*Torque	1	392	392	2,15	0,162	-
Ancoras*Material	1	612,5	612,5	3,37	0,085	-
Ancoras*Torque	1	9,4	9,4	0,05	0,823	-
Material*Torque	1	589,4	589,4	3,24	0,091	-
Erro	16	2911,8	182			
Total	31	82995,9				

Fonte: autor, 2023.

Analisando detalhadamente os resultados da Tabela 10 é possível verificar que apenas os fatores de controle atrelados ao material, torque e pressão interferem na resposta do sistema ($p < 0,05$). Com base no resultado da coluna denominada contribuição, verifica-se que o fator material apresenta o maior percentual de contribuição para a resposta do sistema com 36%, seguido da pressão e torque com valores equivalentes a 13%.

Analisando as interações de segunda ordem, representadas na Tabela 10 com o padrão fator1*fator2 na coluna variável, é possível perceber que as interações entre a pressão e o material apresentam contribuição de 26%, seguida da interação entre a pressão e o torque com 3% de contribuição na resposta do sistema. As demais interações, não são estatisticamente significativas.

4.2.4 Análise de regressão

Utilizados os resultados da Tabela 8, foi aplicado a análise de regressão a fim de obter uma equação capaz de prever a taxa de vazamento de água no prensa cabos, em função dos parâmetros de controle e ruído. Nesta análise, as variáveis de controle que não apresentaram significância estatística foram desconsideradas, resultando na equação:

$$TV = 108,1 + 2,99 A - 73,57 B - 0,0646 C + 3,456 A * B - 0,1452 * A * C \quad (4.1)$$

Onde, TV é a taxa de vazamento (g/h), A é a pressão (bar), B é o material e C o torque (N*m)

A equação 4.1 apresentou um valor $R^2 = 90,26\%$, mostrando que o modelo obtido se ajusta bem aos dados experimentais, e comprovando que os fatores considerados têm forte influência sobre a taxa de vazamento obtida nos experimentos.

Estas conclusões são confirmadas pelos resultados apresentados na Tabela 11, sendo que é uma nova análise ANOVA apenas com os parâmetros de pressão, material e torque que foram avaliados com significância estatística na Tabela 10. Isolando apenas estes parâmetros percebe-se que a contribuição permaneceu a mesma se comparado a análise ANOVA com todos os parâmetros.

Tabela 11 - Análise ANOVA de parâmetros de maior importância estatística

Variável	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Valor-F	Valor-P	Contribuição
Pressão [A]	1	10854	10853,6	34,89	0	13%
Material [B]	1	29525	29524,5	94,92	0	36%
Torque [C]	1	10903	10902,7	35,05	0	13%
Pressão [A]*Material [B]	1	21494	21493,6	69,1	0	26%
Pressão [A]*Torque [C]	1	2134	2134,2	6,86	0,015	3%
Erro	26	8087	311,1			
Total	31	82996				

Fonte: autor, 2023.

Outra análise relevante executada foi a análise dos coeficientes pertencentes a Equação 4.1, que está apresentada na Tabela 12. Analisando os dados, verifica-se

que todas as variáveis da Equação 4.1 estão com um valor P menor que 0,05, sendo assim, estatisticamente relevantes para a resposta no sistema.

Tabela 12 - Análise dos coeficientes

Variável	Efeito	Coefficiente	Erro padrão do coeficiente	Valor-T	Valor-P	Contribuição
Constante		108,1	3,12	17,04	0,000	
Pressão [A]	-36,83	2,99	3,12	-5,91	0,000	1
Material [B]	-60,75	-73,57	3,12	-9,74	0,000	1
Torque [C]	-36,92	-0,0646	3,12	-5,92	0,000	1
Pressão [A]*Material [B]	51,83	3,456	3,12	8,31	0,000	1
Pressão [A]*Torque [C]	-16,33	-0,01452	3,12	-2,62	0,015	1

Fonte: autor, 2023.

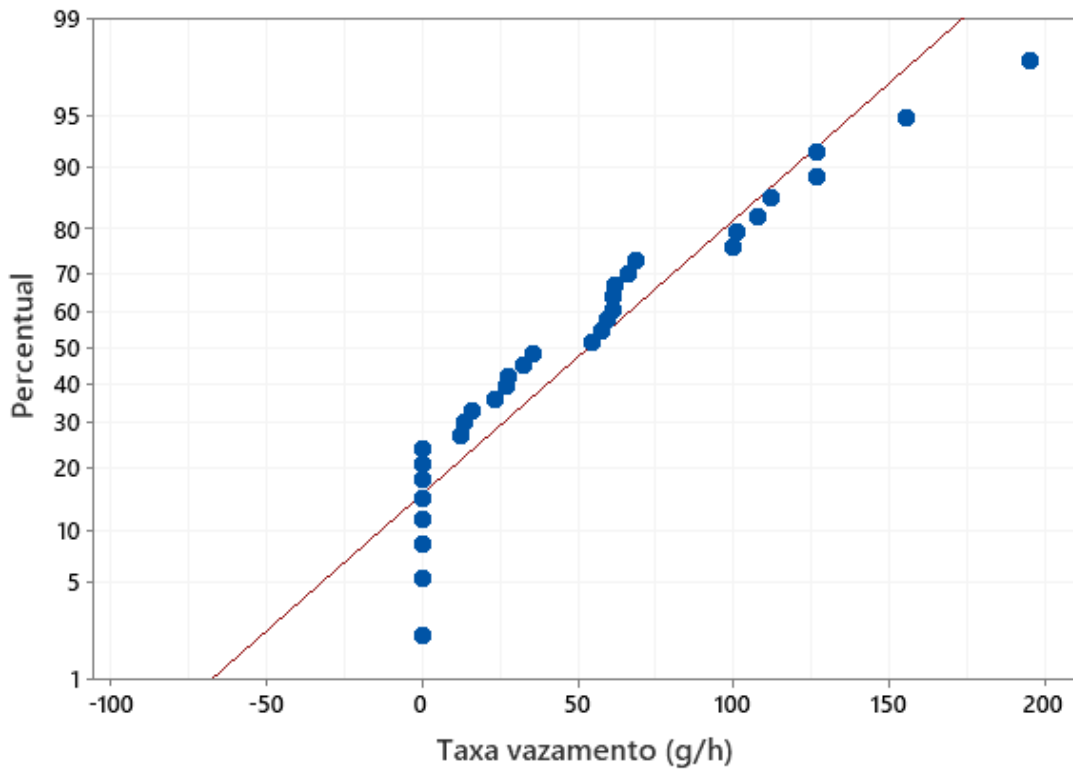
A análise de resíduos é uma etapa fundamental no ANOVA que nos permite avaliar a adequação de um modelo estatístico aos dados experimentais. Os resíduos são as diferenças entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo estatístico. Essa análise de resíduos é essencial para verificar se os pressupostos do modelo, como a normalidade dos erros, estão sendo atendidos. (Montgomery, 2001).

Para avaliar a normalidade dos resíduos, foi gerado o gráfico de resíduos apresentado na Figura 25. Este gráfico é uma representação dos resíduos obtidos a partir do modelo ANOVA. Para haver normalidade, a maior parte dos pontos no gráfico necessitam estar próximo da reta diagonal, sendo que, quando mais próximos, maior é sua normalidade.

Diante disto, o modelo gráfico obtido apresentou normalidade em praticamente todos os seus pontos. As extremidades apresentam alguns pontos distantes da linha diagonal, porém conforme a teoria, alguns pontos afastados não descaracterizam a normalidade (Montgomery, 2001).

Vale salientar que o eixo vertical que representa a porcentagem acumulada dos resíduos em relação ao total. Os resíduos do método ANOVA são as diferenças entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo estatístico.

Figura 25 - Gráfico de resíduos



Fonte: autor, 2023.

Considerando todos os dados analisados, onde não se evidencia vazamentos com a utilização de cabos de EPS, considera-se então que esta configuração é superior quando comparada ao de cabos de silicone.

Devido ao efeito da pressão ser oposto com o uso de cabos de EPS ou de silicone, identificou-se um problema na utilização da Equação 4.1. Em resumo, os elevados vazamentos obtidos experimentalmente na condição 5 bar com cabo de silicone, induziram o modelo a também considerar maiores vazamentos com pressões de 5 bar com cabos de EPS. No entanto, tal comportamento não foi observado nos experimentos (ver Tabela 8).

Portanto, considerando que a condição com cabos de EPS demonstrou um desempenho superior e que a análise de regressão revelou uma influência significativa do nível do cabo de silicone, a decisão tomada foi de realizar uma nova análise de regressão utilizando exclusivamente os dados obtidos com cabos de EPS. Essa nova análise será utilizada como base para a seleção dos fatores de controle, visando melhorar identificar a melhor configuração do protótipo do prensa cabos.

4.2.5 Regressão de dados do conceito com material de EPS

Para utilizar o conceito de regressão para o conceito do material de EPS, utilizando os mesmos dados experimentais apresentados na Tabela 8, primeiramente foi necessário determinar um novo planejamento experimental, porém, utilizando apenas os dados com o fator de controle do material com EPS. Para a combinação de 4 fatores, foi determinado o planejamento experimental ortogonal L16, apresentado na Tabela 13. Ressalta-se que os resultados atrelados as colunas das tratativas são originadas da Tabela 8.

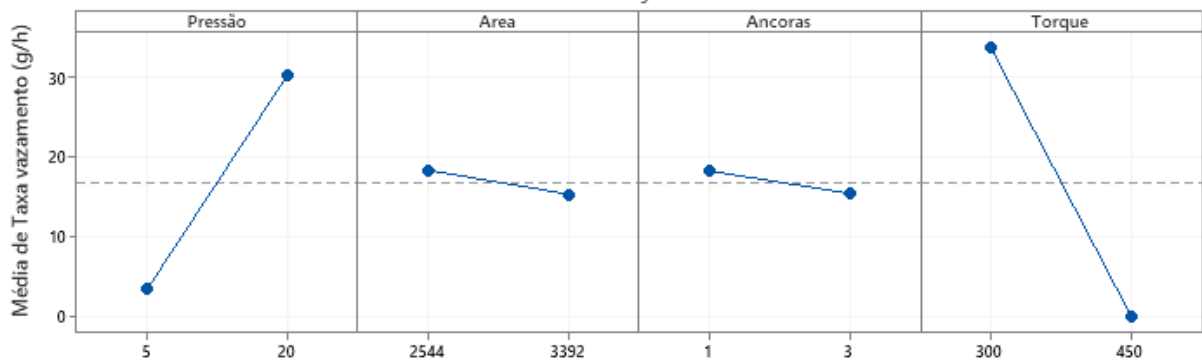
Tabela 13 - Plano experimental L16 - sem o fator material

Combinação [-]	Fatores Controle		Fatores de ruído		Vazamento			Vazamento médio [g/h]	s [g/h]
	Ancoras [un]	Material [-]	Pressão [bar]	Torque [N*m]	1 [g/h]	2 [g/h]	3 [g/h]		
1	2544	1	20	450	0	0	0	0,0	0,0
2	2544	3	20	300	58	62	66	62,0	4,0
3	3392	1	20	300	66	62	56	61,3	5,0
4	3392	3	20	450	0	0	0	0,0	0,0
5	2544	3	5	450	0	0	0	0,0	0,0
6	2544	1	20	300	52	60	60	57,3	4,6
7	3392	3	20	300	64	60	60	61,3	2,3
8	2544	1	5	300	20	34	28	27,3	7,0
9	2544	3	20	450	0	0	0	0,0	0,0
10	2544	3	5	300	30	36	32	0,0	3,1
11	3392	3	5	450	0	0	0	0,0	0,0
12	3392	3	5	300	24	26	30	0,0	3,1
13	2544	1	5	450	0	0	0	0,0	0,0
14	3392	1	5	450	0	0	0	0,0	0,0
15	3392	1	5	300	36	30	40	0,0	5,0
16	3392	1	20	450	0	0	0	0,0	0,0

Fonte: autor, 2023.

Com base no plano ortogonal apresentado na Tabela 13, novamente com o auxílio do *Minitab*, foi avaliado os efeitos dos fatores sobre a média da taxa de vazamento. O resultado está apresentado na Figura 26, sendo que, é possível verificar nesta nova análise, que desconsidera o material de silicone, o gráfico de pressão segue os princípios da mecânica dos fluidos, sendo que, conforme a pressão aumenta, aumenta-se a taxa de vazamento.

Figura 26 - Gráfico de efeitos para a média de taxa de vazamento (g/h).



Fonte: autor, 2023.

Sendo utilizado os resultados experimentais da Tabela 13, foi aplicado o método ANOVA para identificar quais fatores de controle apresentaram efeitos com significância estatística sobre a taxa de vazamento e a relação S/N. A Tabela 14 evidencia o resultado da análise de variância considerando um nível de confiança de 95% com interações de primeira e segunda ordem, sendo adicionalmente aplicado a Equação 2.6 para extrair de forma percentual a relação da contribuição que cada fator tem na resposta do sistema.

Tabela 14 - Análise de variância para taxa de vazamento (g/h)

Variável	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Valor-F	Valor-P	Contribuição
Pressão	1	2880,1	2880,1	60,21	0,000	27%
Torque	1	4533,8	4533,77	94,78	0,000	42%
Pressão*Torque	1	2880,1	2880,11	60,21	0,000	27%
Erro	12	574	47,83			
Total	15	10868				

Fonte: autor, 2023.

Analisando a Tabela 14 e comparando com a Tabela 10, observa-se que os fatores de pressão e torque continuam sendo relevantes estaticamente, porém, agora a pressão tem contribuição de 27% e o torque 42%, além de a interação da pressão com o torque com contribuição de 27% na resposta do sistema. Este resultado ressalta a confiabilidade na análise dos dados exclusivos para material do cabo de EPS.

Utilizados os resultados experimentais da Tabela 13, foi aplicado uma nova análise de regressão a fim de obter um cálculo para a taxa de vazamento de água do prensa cabos. Nesta análise, com base nos resultados da Tabela 14, as variáveis de

controle que não apresentaram significância estatística foram desconsideradas resultando na equação

$$TV_{eps} = -33,2 + 10,73 * A + 0,0737 * B - 0,02385 A * B \quad (4.2)$$

Onde, TV_{eps} é a taxa de vazamento (g/h) para os dados exclusivos do cabo de EPS, A é a pressão (bar), B é o torque (N*m).

A equação 4.2 apresentou um valor $R^2 = 94,72\%$, mostrando que o modelo obtido consegue se ajustar aos dados, sendo que, é relativamente maior do que o R^2 obtido através da equação 4.1 que contém o valor de $90,26\%$. Adicionalmente, a Tabela 15 apresenta análise dos coeficientes da Equação 4.2, onde, é possível validar que todas as variáveis são significativas e influenciam na resposta do sistema porque os valores da coluna valor-P apresentam valores inferiores a 0,005.

Tabela 15 - Análise dos coeficientes apenas com EPS

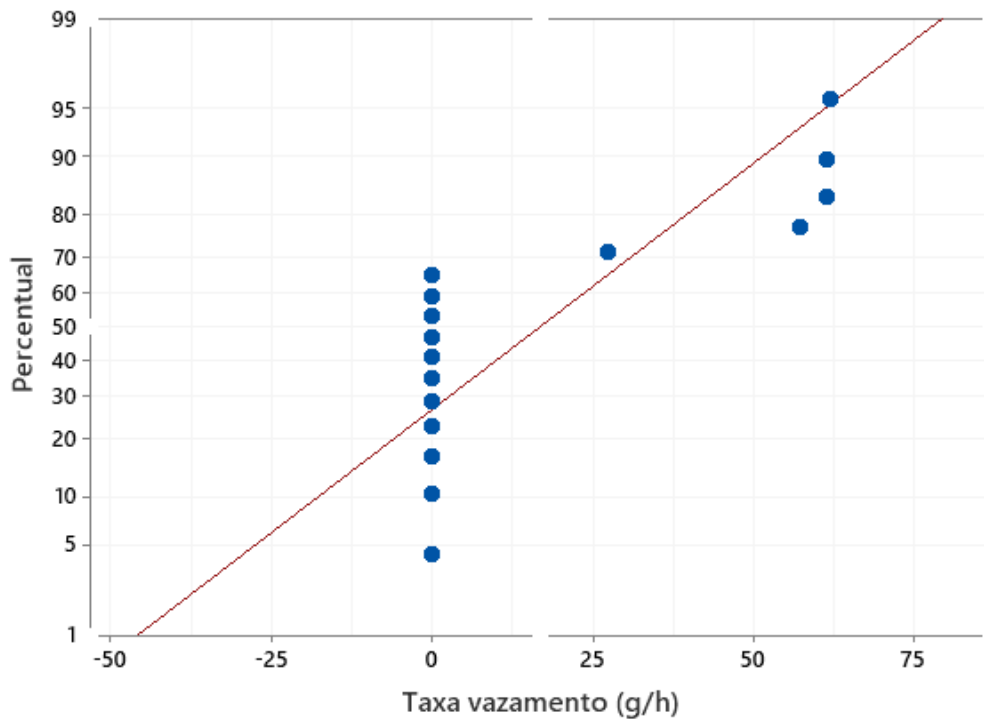
Variável	Efeito	Coeficiente	Erro padrão do coeficiente	Valor-T	Valor-P
Constante		16,83	1,73	9,74	0,000
Pressão [A]	26,83	13,42	1,73	7,76	0,000
Torque [B]	-33,67	-16,83	1,73	-9,74	0,000
Pressão [A]*Torque [B]	-26,83	-13,42	1,73	-7,76	0,000

Fonte: autor, 2023.

Este resultado, adicionalmente, comprova que os fatores considerados continuam a ter forte influência sobre a taxa de vazamento obtida nos experimentos dos dados exclusivos para o material de EPS.

Para finalizar, um novo gráfico de resíduos foi construído, considerando apenas as combinações com o material EPS, sendo então apresentado na Figura 27. Neste gráfico destaca-se que a maioria dos pontos estão representando a taxa de vazamento igual a zero. Os demais pontos seguem a tendência da linha diagonal, o que representa que as predições do modelo são precisas.

Figura 27 - Gráfico de resíduos apenas para combinações com EPS



Fonte: autor, 2023.

4.2.6 Seleção dos fatores de controle para minimizar a taxa de vazamento

Com os dados obtidos com a análise de regressão do conceito EPS, apresentados na sessão 4.2.5, o modelo matemático representado na equação 4.2 foi empregado para encontrar a combinação de fatores que minimizam a taxa de vazamento de água.

Para esta avaliação, até mesmo os parâmetros das ancoras e área de contato da resina com o cabo que não tiveram significância estatística para a taxa de vazamento, de acordo com a análise ANOVA obtida no subcapítulo 4.2.2, foram consideradas em seu nível máximo, visto que, ambos os parâmetros não influenciam de forma significativa no custo do prensa-cabos, porém, é necessário determinar seus valores porque apresentam efeito para outras características do componente do prensa cabos

A determinação do fator do material foi realizada por eliminação, visto que, conforme a sessão 4.2.4, o material de silicone apresenta vazamentos em todos os testes nele utilizado. Desta forma foi aplicado a seleção do material de EPS.

Analisando a Tabela 8, é possível observar que as combinações 9 a 16 apresentaram vazamento em todos os casos, porém, analisando as combinações 25

a 32 não houve vazamentos. Em resumo, o fator que diferencia estas combinações está atrelado ao torque de aperto, então, o fator para minimizar a taxa de vazamento para o fator do torque de aperto é o nível com 450 N*m.

Analisando a Figura 26, foi identificado que, para o fator de pressão, o nível inferior de 5 bar apresenta a menor taxa de vazamento do sistema. No entanto, como o fator pressão é uma variável de ruído, foram realizados testes com pressões de até 20 bar, não tendo sido observados vazamentos quando o torque aplicado foi de 450 N*m.

A Tabela 16 evidencia o resultado para minimização da taxa de vazamento de água no sistema de prensa cabos, com base nos fatores utilizados.

Tabela 16 - Parâmetros selecionados

Parâmetro	Valor
Pressão [bar]	5
Área [mm ²]	3392
Ancoras [un]	3
Material [-]	EPS
Torque [N*m]	450

Fonte: autor, 2023.

Para validar que os parâmetros estão corretamente determinados, a equação 4.2 foi aplicada e obteve-se os mesmos valores dos parâmetros apresentados na Tabela 16. Isto é uma comprovação que a explanação da motivação da seleção dos parâmetros está de acordo com o modelo de dados extraído do planejamento experimental.

Com base nos resultados apresentados, afirma-se que o objetivo geral proposto para este trabalho foi atingido, onde, o projeto do prensa cabos foi capaz de suportar pressões na equivalência de 50 metros de coluna d'água (5 bar), sendo inclusive testado em um nível de pressão quatro vezes maior, sem vazamentos e portando atendendo as condições do grau de proteção IP68.

4.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Com os fatores selecionados, conforme analisado na seção 4.2.6, um novo experimento foi realizado para validar a solução utilizando todos os parâmetros da Tabela 16, exceto a pressão. Para este teste de validação, visto que, durante a

execução o planejamento experimental obteve-se sucesso utilizando pressões de até 20 bar, optou-se em aplicar uma pressão intermediária de 15 bar para execução de um teste de vida acelerado. Destaca-se que o objetivo deste trabalho é do prensa cabos operar a uma pressão máxima de 5 bar.

Um teste de vida acelerado é um tipo de experimento ou teste projetado para avaliar e estimar a vida útil, confiabilidade ou durabilidade de um produto, componente ou sistema em um período de tempo relativamente curto, expondo-o a condições mais severas do que as encontradas em uso normal. Esse tipo de teste é útil quando se deseja prever ou acelerar a degradação de um item e estimar seu tempo de falha ou tempo médio até a falha em condições extremas. (Kaplan-Meier, 2020)

As condições de estresse aplicadas durante o teste podem variar dependendo do tipo de produto e do ambiente em que será utilizado. Essas condições podem incluir variações de temperatura, umidade, pressão, vibração, voltagem, entre outros fatores.

Diferentemente do planejamento experimental aplicado, cujo qual, cada experimento teve uma hora de duração, este último experimento de validação dos resultados visou manter o aparato experimental pressurizado por 30 dias, a uma pressão de 15 bar, sendo monitorando três vezes ao dia nos horários de 07:30, 12:30 e 17:30. O objetivo deste último teste foi aplicar um teste de vida acelerado no conjunto do prensa cabos, validando que tenha robustez para ser incorporada como solução comercial futuramente. O resultado deste teste está representado na Tabela 17, sendo visível que em nenhum momento do teste houve vazamento de água do sistema, o que corresponde ao valor máximo de robustez obtido pela Equação 2.3.

Tabela 17 - Vazamento do dispositivo

Dia	Vazamento (g)			Vazamento (g)	Desvio padrão (dB)
	7:30	12:30	17:30		
1	0	0	0	0,0	0,0
2	0	0	0	0,0	0,0
3	0	0	0	0,0	0,0
4	0	0	0	0,0	0,0
5	0	0	0	0,0	0,0
6	0	0	0	0,0	0,0
7	0	0	0	0,0	0,0
8	0	0	0	0,0	0,0
9	0	0	0	0,0	0,0
10	0	0	0	0,0	0,0
11	0	0	0	0,0	0,0
12	0	0	0	0,0	0,0
13	0	0	0	0,0	0,0
14	0	0	0	0,0	0,0
15	0	0	0	0,0	0,0
16	0	0	0	0,0	0,0
17	0	0	0	0,0	0,0
18	0	0	0	0,0	0,0
19	0	0	0	0,0	0,0
20	0	0	0	0,0	0,0
21	0	0	0	0,0	0,0
22	0	0	0	0,0	0,0
23	0	0	0	0,0	0,0
24	0	0	0	0,0	0,0
25	0	0	0	0,0	0,0
26	0	0	0	0,0	0,0
27	0	0	0	0,0	0,0
28	0	0	0	0,0	0,0
29	0	0	0	0,0	0,0
30	0	0	0	0,0	0,0

Fonte: autor, 2023.

Com base no que foi explanado nesta seção, o resultado final da validação dos resultados foi bem sucedido, ou seja, o prensa cabos operou por 30 dias consecutivos a uma pressão de 15 bar sem apresentar vazamentos.

Outro ponto considerável é que conforme exposto no diagrama P do item 3.2, a vida útil almejada na especificação é de 4 meses, sendo então, o teste de vida

acelerada alcançou 25% da vida útil desejável, porém, em uma pressão 3 vezes maior do que o limite projetado.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou um estudo relacionado com o desenvolvimento de um prensa cabos projetado do zero para operação em ambientes submersos, com ênfase em profundidades de até 50 metros de coluna d'água (5 bar). As principais conclusões relacionadas ao trabalho estão dispostas neste capítulo.

O método projeto robusto foi empregado e mostrou-se eficaz para o desenvolvimento do prensa cabos para aplicação submersa, considerando a pressão de operação e o torque de aperto como fatores de ruído.

O custo do projeto apresentado neste trabalho apresenta uma redução de custo equivalente a 52 vezes o valor que seria dispendido para adquirir um prensa cabos equivalente através do sistema de importação, além reduzir o tempo para obtenção do mesmo em pelo menos 12 vezes.

A técnica QFD foi empregada na etapa inicial do projeto dos protótipos de prensa cabos, permitindo a identificação e priorização dos requisitos técnicos do componente. Esta abordagem foi de extrema importância no projeto para garantir que a versão final apresentasse todas as características funcionais desejadas pelo cliente final.

No total, foram produzidos e testados 32 protótipos. O prensa-cabos em questão é uma solução adequada para a montagem de cabos em ambientes submersos, oferecendo uma notável flexibilidade por permitir a utilização de cabos com áreas de secção transversal entre 5 a 95 mm². Sua robustez é evidente ao lidar com pressões de até 5 bar. Composto por cinco componentes, destaca-se pela facilidade de montagem, otimizando o processo e minimizando potenciais erros de instalação. Uma característica distintiva é a presença de uma coifa cônica, projetada para simplificar a aplicação da resina e, simultaneamente, amortecer vibrações. Esta inovação não só simplifica o processo de instalação, mas também contribui para a durabilidade do sistema, atenuando vibrações indesejadas.

O plano experimental foi elaborado considerando uma matriz ortogonal L32 (5²), na qual a taxa de vazamento foi a variável resposta submetida aos efeitos dos fatores de controle denominados área de contato do cabo com a resina, quantidade de ancoras, material do cabo e os fatores de ruído denominado torque e pressão.

Os dados experimentais foram empregados para determinar quais dos fatores de controle e ruído apresentaram efeitos significativos sobre a taxa de vazamento e para obtenção de modelos de regressão.

Foi identificado que, o material do cabo (EPS ou silicone) apresentou a maior influência sobre a taxa de vazamento. É importante ressaltar que o material de silicone não demonstrou a capacidade desejada de aderir à resina. Um ponto a ser destacado é que foi conduzido um teste no qual ocorreu o desprendimento completo do cabo em relação à resina, revelando a fragilidade dessa união.

Esta pesquisa evidenciou que o torque de aperto do prensa-cabos é um fator de ruído crítico, sendo extremamente sensível à sua montagem. Montar o prensa-cabos de maneira equivocada pode resultar em vazamentos no sistema, uma situação claramente indesejável e que pode comprometer o desempenho do sistema como um todo. O torque de 450 N*m foi identificado como recomendável para eliminar os vazamentos sem comprometer a integridade dos componentes do prensa cabos.

Dentre os diferentes protótipos de prensa cabos desenvolvidos e testados, observou-se que a combinação dos fatores de controle capaz de eliminar os vazamentos foi aquela com área de 3392 mm², material EPS e 3 ancoras.

Após a seleção dos fatores de controle, realizou-se um teste de validação por 30 dias, empregando uma pressão de 15 bar, sendo este valor 3 vezes superior ao valor nominal (50 metros de coluna d'água). Durante o teste de validação, nenhum vazamento foi observado no prensa cabos, sendo assim, atendendo ao grau de proteção IP68 e correspondendo ao valor máximo de robustez para os fatores considerados no projeto.

Este trabalho não apenas representa uma contribuição significativa para o campo das aplicações submersas, mas também estende seu alcance a diversas indústrias. Desde a exploração de petróleo e gás até a pesquisa científica em oceanografia, as implicações práticas desse trabalho reverberam em várias esferas. À medida que se continuará a aprofundar o conhecimento e aplicação de soluções submersas, este projeto destaca-se como um exemplo notável de como a inovação e a aplicação rigorosa de técnicas de engenharia podem efetivamente pavimentar o caminho para o progresso.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Enquanto se conduzia esta pesquisa, foi possível identificar uma série de tópicos promissores que podem ser explorados em continuação ao tema dos prensa-cabos para uso submerso. Esses tópicos abrem novas possibilidades de pesquisa e desenvolvimento, e alguns dos principais deles incluem:

- Avaliação da aderência da resina para tipos de materiais, visto que, obteve-se resultados indesejados com materiais de silicone nesta pesquisa.
- Avaliação da composição da resina, visando um processo de solidificação mais ágil.
- Avaliação da solução de prensa cabos em ambientes submersos com água salina.
- Avaliação de redundância no sistema de isolamento por elastômero.
- Realizar estudo para aplicar testes de vida acelerada para componentes submersos.

REFERÊNCIAS

AKAO, Y. Quality function deployment: integrating customer requirements into product design. **Productivity Press**, 1990.

American Petroleum Institute (API). API Specification 17F: Specification for Subsea Production Control Systems. Washington, D.C.: API, 2021.

ARDELEAN, Mircea; MINNEBO, Philip. The suitability of seas and shores for building submarine power interconnections. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.176, p.113210, 2023.

ARDELEAN Mircea; MINNEBO Philip; GERBELOVÁ, H. Optimal paths for electricity interconnections between Central Asia and Europe. **Publications Office of the European Union**. p.79, 2015.

ARNÉR, Magnus. Statistically robust design: An industrial perspective. 1° ed. **Wiley**, 2014.

ATKINSON, Simon High-density cable sealing range is more area-efficient than traditional cable glands. **Sealing Technology**. v. 2020, p. 5, 2020.

AZIZ, F.A; ARAS, M.S.M; RASHID, M.Z.A; OTHMAN M.N; ABDULLAH, S.S.3. Problem Identification for Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV): A Case Study. **Procedia Engineering**. v. 41, p. 554-560, 2012.

BACH, Do; OHSAKI, Makoto; YAMAKAWA, Makoto. Bayesian optimization for robust design of steel frames with joint and individual probabilistic constraints. **Engineering Structures**. v. 245, p. 11859, 2021.

BARNABAS, J. K.; TAMIZHARASAN, T. Optimization of MQL Parameters During Turning for the Minimization of Flank Wear using DoE, PSO and SAA. **J. Inst. Eng. Índia Ser. C**. v. 93, p. 133-139, 2012.

BARROS, S. José. Cabos Submarinos num Mar de Conectividades. 1° ed. **ANACOM**. 2021.

BRUMBACH, Michael; KELJIK, Jeffrey S. Industrial Electricity. **Cengage Learning**. v. 10, 2021.

Bussab, W. O., Morettin, P. A. Estatística Básica. 9 ed. **Saraiva Uni**, 2017.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach. 5. ed. **John Wiley & Sons**, 2018. ISBN: 978-1119423776.

CANEPA, Elisa; STIFANESE, Roberto; MEROTTO, Lorenzo; TRAVERSO, Pierluigi. Corrosion behavior of aluminum alloys in deep-sea environment: A review and the KM3NeT test results. **Marine Structures**. v. 29, p. 271-284, 2018.

CHAKRABORTY, Souvik; DAS, Sourav; TESHAMARIAM, Solomon. Robust design optimization of nonlinear energy sink under random system. **Probabilistic Engineering Mechanics**. v. 65, 103139, 2021.

CARLSON, Daniel F.; AKBULUT, Serkan; RASMUSSEN, Jeppe Fogh; HESTBECH, Christian Søndergård; ANDERSEN, Marius Hjorth; MELVAD, Claus. Compact and modular autonomous surface vehicle for water research: the naval operating research drone assessing climate change (nordacc). **Hardwarex**, [S.L.], v. 15, p. e00453, set. Elsevier BV, 2023.

CHIU, The-Tsung. **CABLE GLAND ASSEMBLY**. Titular: United States Patent. USA n. 8,872,027 B2. Depósito: 13 Jan. 2014. Concessão: 05 Jan. 2016.

CHIU, The-Tsung. **FASTENING DEVICE FOR CABLE AND WAVE HOSE**. Titular: United States Patent. USA n. US 2010/0156094A1. Depósito: 02 mar. 2010. Concessão: 24 jun. 2010.

CRESWELL, John W.; CRESWELL, J. David. Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. **Sage Publications**, 2017.

DAS, Sourav; CHAKRABORTY, Aruásis; RAHMAN, Sharif. Robust design of MR elastomer for optimal isolation against non-stationary ground motion. **Structures**. v. 34, p. 4999-5012, 2021.

Dassault Systèmes. SolidWorks 2022 [Software]. Velizy-Villacoublay, França: Dassault Systèmes, 2022.

DOORMAN, Gerard L; FROYSTAD, Dag Martin. The economic impacts of a submarine HVDC interconnection between Norway and Great Britain. **Energy Policy**. v.60, p. 334-344, 2013.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 6º ed. Rio de Janeiro: **LTC**, 2006.

GOMES, Sinésio Raimundo. Partidas de Motores Elétricos Industriais. **Clube de Autores**, 2020.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física. 5. ed. Rio de Janeiro: **LTC**, 2002.

HAUSER, J. R.; CLAUSING, D. The house of quality. **Harvard Business Review**, v. 66, n. 3, p. 63-73, 1988.

HIBBELER, R.C. Mecânica dos Materiais. 9ª ed. São Paulo: **Pearson**, 2015.

HIWA, Bnar; AHMED, Yassin Mustafa; ROSTAM, Sarkawt. Evaluation of tensile properties of Meriz fiber reinforced epoxy composites using Taguchi method. **Results In Engineering**, v. 18, p. 101037, 2023.

HU, Zhuohuan; WANG, Dan; GAO, Fan; CAO, Yan; WU, Hongwei. Experimental investigation on cooling performance of vortex tube with rectifier using Taguchi method. **Case Studies In Thermal Engineering**, v. 49, p. 103373, 2023.

Hubbell Inc. **CABLE GLAND**. Titular: United States Patent. USA n. WO/2018/089014. Depósito: 3 mai. 2018. Concessão: 17 Mai. 2018.

HUY, Dinh Quang; SAdjOLI, Nicholas; AZAM, Abu Bakr; ELHADIDI, Basman; CAI, Yiyu; SEET, Gerald. Object perception in underwater environments: a survey on sensors and sensing methodologies. **Ocean Engineering**. v. 267, 113202, 2023.

HSIAO, Y. F.; KUOA, W. M.; CHANGA, Y. T; TARNG, Y. S. An optimization study of the motion table performance. **Fuel**. v. 279, p. 138-144, 2010.

JIAQI, Luo; XIA, Zhiheng; LIU, Feng. Robust design optimization considering inlet flow angle variations of a turbine cascade. **Aerospace Science and Technology**. v. 116, p. 106893, 2021.

JIANG, zhenliang; HUANG, Fu; NV Yifan; WAN, Lianggi. A novel adaptive Kriging method: Time-dependent reliability-based robust. **Computers & Industrial Engineering**. v. 162, 107692, 2021.

JIMÉNEZ-ALONSO, Javier Fernando; SORIA, José Manuel; DÍAZ, Iván M.; GUILLEN-GONZÁLEZ, Francisco. A common framework for the robust design of tuned mass damper techniques to mitigate pedestrian-induced vibrations in lively footbridges. **Structures**. v. 34, p. 1276-1290, 2021.

KAPLAN-MEIER, E. Aceleração de Vida: Métodos e Aplicações. São Paulo: **Editora ABC**, 2020.

KHANDEY, Umesh; ARYA, Vedpal. Optimization of multiple surface roughness characteristics of mild steel turned product using weighted principal component and Taguchi method. **Materials Today: Proceedings**. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.298>, 2023.

KIVAK, Turgay; SAMTAS, Gurcan; CICEK, Adem. Taguchi method based optimization of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills. **Measurement**. v. 45, p. 1547-1557, 2008.

KUO, C.-c.; CHEN, B.-c. Optimization of hot embossing molding process parameters of Fresnel lens using Taguchi method. **Materials Science & Engineering Technology**. p. 942-948, 2015.

KWAK, Jae-Seob. Application of Taguchi and response surface methodologies. **Machine Tools & Manufacture**. v. 45, p. 327-334, 2005.

LE, Tuan-Ho; SHIN, Sangmun. Structured neural network models to improve robust design solutions. **Computers & Industrial Engineering**. v. 156, p. 1077231, 2021.

LEE, Dongin; JAHANBIN, Ramin; RAHMAN, Sharif. Otimização robusta de projeto por decomposição dimensional spline. **Probabilistic Engineering Mechanics**. v. 68, p. 103-218, 2022.

LI, Heng; YANG, Jingchao; CHEN, Guangyao; LIU, Xin; ZHANG, Zhao; LI, Guangjun; LIU, Wenhui. Towards intelligent design optimization: Progress and challenge of design optimization theories and technologies for plastic forming. **Precision Engineering**. v. 67, p. 393-418, 2021.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.H. Engineering Desing. 3^o ed. **Springer**, 2007.

PATIL, j. Prashant; PATIL C.R. Analysis of process parameters in surface grinding using single objective Taguchi and multi-objective grey relational grade. **Perspectives in Science**. v. 08, p. 367-369, 2016

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**. USA: Prentice-Hall, 1989.

MACANGUS-GERRARD, Geoff. Offshore Electrical Engineering Manual. 2° ed. **Elsevier**. 2017.

MADANI, Tahar; BOUKRAA, Moustafa; AISSANI, Mouloud; CHEKIFI, Tawfiq; ZIADI, Abdelkader; ZIRARI, Mounir. Experimental investigation and numerical analysis using Taguchi and ANOVA methods for underwater friction stir welding of aluminium alloy 2017 process improvement. **International Journal Of Pressure Vessels And Piping**, [S.L.], v. 201, p. 104879, 2023.

MAURYA, Nagendra Kumar; RASTOGI, Vikas; SINGH, Pushpendra. An overview of mechanical properties and form error for rapid prototyping. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v. 29, p. 53-70, Mai. 2020.

MEHAT, Nik Mizamzul; KAMARUDDIN, Shahrul. Quality control and design optimisation of plastic product using Taguchi method: a comprehensive review. **International Journal of Plastics Technology**, v. 16, n. 2, p. 194-209, Nov. 2012.

MESMER, Patrick; NEUBAUER, Michael; LECHLER, Armin; VERL, Alexander Verl. Robust design of independent joint control of industrial robots with secondary encoders. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**. v. 73, p. 102232, 2022.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**, 5° ed. 2001.

MORENO, Edgardo; VIESPOLI, Luigi Mario; JOHANSON Audun; WAN Di; ALVARO Antonio; SOMA Aurelio; BERTO Filippo. Effect of geometrical irregularities on fatigue of lead sheathing for submarine high voltage power cable applications. **International Journal of Fatigue**. V.151, 106399, 2021.

MUELLER, Christoph Emanuel; KEIL, Silke Inga; BAUER, Christian. Underground cables vs. overhead lines: Quasi-experimental evidence for the effects on public risk expectations, attitudes, and protest behavior. **Energy Policy**. v.125, p. 456-466, 2019.

MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H.; HUEBSCH, Wade W. **Fundamentals of Fluid Mechanics**. John Wiley & Sons, 2016.

NAGASE, Masaaki; NISHINO, Ryousuke T.I.K. Ceramic orifice plate with integrated gasket. Titular: South Korea Patent. n. KR101801674B1. Depósito: 24 jan. 2014. Concessão: 27 Nov. 2017.

National Electrical Manufacturers Association (NEMA). **NEMA 250: Enclosures for Electrical Equipment (1,000 Volts Maximum)**. Arlington, VA: NEMA, 2021.

NBR 60529. Associação brasileira de normas técnicas. Graus de proteção providos por invólucros (Códigos IP). Rio de Janeiro. 2017.

OKASHA, M. *et al.* Mechanical microdrilling of negative-tapered laser-predrilled holes: a new approach for burr minimization. **Int J Adv Manuf Technol**, 2012.

PAN, Bindin; CUI, Weicheng. Multidisciplinary design optimization and its application in deep manned submersible design. 13^o ed. **Springer**. 2020.

PALANIKUMAR, K. Application of Taguchi and response surface methodologies for surface roughness in machining glass fiber reinforced plastics by PCD tooling. **Int J Adv Manuf Technol**. Vol 36. p. 19-27, 2008.

QIU, Na; JIN, Zhiyang; LIU, Jinyi; FU, Lirong ; CHEN, Zhenbin; KIM, Nam H. Hybrid multi-objective robust design optimization of a truck cab considering fatigue life. **Thin-Walled Structures**. v. 162, p. 107545, 2021.

REHMAN, Shafiqur; ALHEMS Luai M; ALAM, Md. Mahbub; WANG, Longjun; TOOR, Zakria. A review of energy extraction from wind and ocean: Technologies, merits, efficiencies, and cost. **Ocean Engineering**. v. 267, p. 113192, 2023.

ROBINSON, T. J., BORROR, C., M., MYERS, R., H. **Robust Parameter Design: A Review**. Quality And Reliability Engineering International, 2004.

ROSS, Joel E.; PERRY, Suzan. Total Quality Management: Text, Cases, and Readings, Third Edition. **CRC Press**. 3^o ed, 2017.

SANSHIN (República Popular da China). **Catálogo prensa cabos**. 2022. Disponível em: https://www.sanshin-electric.co.jp/en/data/sec06/sec06_08.pdf. Acesso em: 08 fev. 2024.

SEICA, Michael V. PACKER, Effrev A. FRP materials for the rehabilitation of tubular steel structures, for underwater applications. **Composite Structures**. v. 80, p. 440-450, 2007.

SIDDIQUEE, Arshad Noor; KHAN, Zahid A.; GOEL, Pankul Goel; KUMAS, Mukesh Kumar; AGARWAL, Gaurav; KHAN, Noor Zaman. Optimization of Deep Drilling Process Parameters of AISI 321 Steel Using Taguchi Method. **Procedia Materials Science**. v. 6, p. 1217-1225, 2014.

SIQUEIRA, Carlos Eduardo; HAIAMA-NEUROHR, Nadia. The Sinking of the Neoliberal P-36 Platform in Brazil. Worker Safety Under Siege. **Routledge**. v.1, p187, 2006.

SHIN, Sangmun; CHO Byung Rae. Bias-specified robust design optimization and its analytical solutions. **Computers & Industrial Engineering**. v. 48, p. 129-140, 2005

SINGH, Kanwal Jeet; AHUJA, Inderpreet Singh; KAPOOR, Jathinder. Optimization of material removal rate in ultrasonic machining of polycarbonate bulletproof glass and acrylic heat-resistant glass by Taguchi method. **Multidiscipline Modeling in Materials and Structures**. v. 13, p. 612-627, 2017

SMITH, John. Engenharia de Parafusos e Porcas Metálicas. 2^a ed. São Paulo: **Editora Técnica**, 2010.

VIESPOLIA Luigi Mario; JOHANSON Audun; ALVARO Antonio; NYHUS Bård; BERTO Filippo. Subsea power cable sheathing: an investigation of lead fatigue performance. **Procedia Structural Integrity**. v. 28, p. 344-351, 2020.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. **Taguchi's Quality Engineering Handbook**. 2005.

TAKACS, Gabor. **Electrical submersible pump manual: Design, Operations, and Maintenance**. 1° ed. Elsevier. 2009.

TIAN, Heqiang; DANG, Xiaoqing; MENG, Debao; TIAN, Bin; LI, Jianyong. Influence of drilling parameters on bone drilling force and temperature by FE simulation and parameters optimization based Taguchi method. **Alexandria Engineering Journal**, v. 75, p. 115-126, 2023.

TSAO, C. C. Prediction of thrust force of step drill in drilling composite material by Taguchi method and radial basis function network. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** v. 36, p. 11-18, 2008.

TZENG, Chorng-Jyh; LIN, Yu-Hsin; YANG, Yung-Kuang; JENG, Ming-Chang. Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 209, p. 2753-2759, 2009.

WANG, Che Chung; LIN, Ta-wei; HU, Shr-Shiung. Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis. **Rapid Prototyping Journal**. p. 304-315, 2007.

XIANSHENG, Ni; ZHENGGAN, Zhou; XIONGWEI, Wen; Luming, Li. The use of Taguchi method to optimize the laser welding of sealing neuro-stimulator, **Optics and Lasers in Engineering**, v. 49, p. 297-304, mar. 2011.

WU, Jia-Bin; LI, Li. Influence of ambient pressure on sealing performance of O-ring in deep-sea hydraulic system. **Ocean Engineering**, [S.L.], v. 245, p. 110440, Elsevier BV, 2022.

YILDIZ, Ali. R. Hybrid Taguchi-differential evolution algorithm for optimization of multi-pass turning operations. **Applied Soft Computing**. v. 13, p. 1433-1439, 2013.

ZAINAL, Nurezayana; ZAIN, Azlan Mohd; RADZI, Nor Haizan Mohamed; OTHMAN, Muhamad Razib. Glowworm swarm optimization (GSO) for optimization of machining parameters. **Journal of Intelligent Manufacturing**. v. 27, p. 797-804, 2016.


ZHANG, Jiyuan; TANG, Hailong; CHEN, Min. Robust design of an adaptive cycle engine performance under component performance uncertainty. **Aerospace Science and Technology**. v. 113, p. 106704, 2021.

ANEXO A – Catálogo de prensa cabos a prova de explosão

Figura 28 - Catálogo de prensa cabos a prova de explosão – Parte 1

EXPLOSION PROOF CABLE GLAND

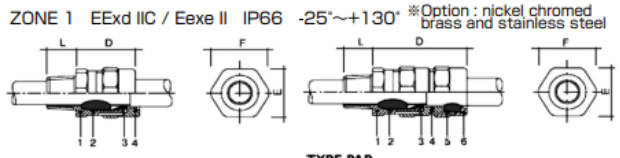
PA / PAP NPT Range (Brass)



Single compression for non-armoured cable (PA)

Model	Φ Min-Max External (in mm)	Dimension (mm)				Weight (kg)	Code No.
		D	E	F	L		
PA1-8 1/2"	5.5 - 8	41	32	35	18	0.15	A209947
PA1-10 1/2"	8 - 10.5						A209946
PA1-13 1/2"	10.5 - 13						A209945
PA2-10 3/4"	8 - 10.5	41	32	35	18	0.15	A2099004401
PA2-13 3/4"	10.5 - 13						A20990049
PA2-15 3/4"	13 - 15.5						A2099004402
PA2-18 3/4"	15.5 - 18	41	36	39	18	0.2	A2099004403
PA3-18 1"	15 - 18						A2099004301
PA3-21 1"	18 - 21	52	45	49	22	0.38	A2099004302
PA3-24 1"	21 - 24						A2099004303
PA4-24 1 1/4"	21 - 24						A209943
PA4-27 1 1/4"	24 - 27	53	50	55	22	0.42	A2099004304
PA4-30 1 1/4"	27 - 30						A2099004305
PA5-33 1 1/2"	30 - 33	53	57	62	22	0.52	A2099004306
PA5-36 1 1/2"	33 - 36						A2099004307
PA6-39 2"	36 - 39						A2099004308
PA6-42 2"	39 - 42	53	67	73	22	0.75	A2099004309
PA6-45 2"	42 - 45						A2099004310
PA7-48 2 1/2"	45 - 48	53	80	88	27	1.2	A2099004311
PA7-51 2 1/2"	48 - 51						A2099004312

ZONE 1 EExd IIC / Exe II IP66 -25°~+130° *Option : nickel chromed brass and stainless steel



TYPE PA
 1 Body
 2 Inner gasket
 3 Clamping cone
 4 Gland nut

TYPE PAP
 1 Gland body
 2 Inner gasket
 3 Clamping & earthing cone
 4 Clamping nut
 5 Outer gasket
 6 Gland nut


Double compression for armoured cable (PAP)

Model	Φ Min-Max External (in mm)		Dimension (mm)				Weight (kg)	Code No.
	D	E	F	L				
PAP1-8 1/2"	5.5 - 8	10 - 15						A2099114
PAP1-10 1/2"	8 - 10.5	10 - 15	65	32	35	18	0.22	A209945
PAP1-13 1/2"	10.5 - 13	14 - 19						A2099115
PAP2-10 3/4"	8 - 10.5	10 - 15	65	32	35	18	0.22	A2099106
PAP2-13 3/4"	10.5 - 13	15 - 20						A2099107
PAP2-15 3/4"	13 - 15.5	15 - 20						A2099109
PAP2-18 3/4"	15.5 - 18	19 - 24	65	36	39	18	0.29	A20991091
PAP3-18 1"	15 - 18	20 - 26						A2099116
PAP3-21 1"	18 - 21	20 - 26	82	45	49	22	0.5	A2099117
PAP3-24 1"	21 - 24	25 - 31						A2099118
PAP4-24 1 1/4"	21 - 24	26 - 32						A2099119
PAP4-27 1 1/4"	24 - 27	26 - 32	83	50	55	22	0.42	A2099148
PAP4-30 1 1/4"	27 - 30	31 - 37						A2099149
PAP5-33 1 1/2"	30 - 33	36 - 43	83	57	62	22	0.7	A2099151
PAP5-36 1 1/2"	33 - 36	36 - 43						A2099152
PAP6-39 2"	36 - 39	42 - 48						A2099112
PAP6-42 2"	39 - 42	42 - 48	83	67	73	22	0.85	A2099153
PAP6-45 2"	42 - 45	47 - 53						A2099154
PAP7-48 2 1/2"	45 - 48	52 - 58	83	80	88	27	1.45	A2099155
PAP7-51 2 1/2"	48 - 51	52 - 58						A2099156

Fonte: Sanchin, 2024.

Figura 29 - Catálogo de prensa cabos a prova de explosão – Parte 2

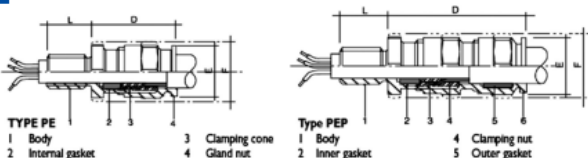
PE / PEP ISO(M)Range(Nickel chromed brass)



Single compression for non-armoured cable (PA)

Model	Φ Min-Max External (in mm)	Dimension (mm)				Weight (kg)	Code No.
		D	E	F	L		
PE M20 T4	4 - 8.5	15	24	20	15	0.06	A2099004427
PE M20 T5	6 - 12	19	24	22	15	0.04	A2099004428
PE M20 T6	8.5 - 15	24	24	25	15	0.05	A2099004429
PE M25 T6	8.5 - 16	24	30	25	15	0.06	A2099004430
PE M25 T7	12 - 20.5	30	30	27	15	0.07	A2099004431
PE M32 T7	12 - 21	30	36	27	15	0.1	A2099004433
PE M32 T8	16 - 27.5	41	41	34	15	0.15	A2099004434
PE M40 T9	21 - 33	48	48	36	15	0.21	A2099004435
PE M50 T10	27 - 41	55	55	39	16	0.29	A2099004436
PE M63 T11	33 - 48	64	67	41	17	0.4	A2099004437
PE M75 T12	40 - 56	72	80	43	18	0.57	A2099004438

ZONE 1 + ZONE2 EEx "e"II / EExd IIB IP68 -40°~+100°



TYPE PE
 1 Body
 2 Internal gasket
 3 Clamping cone
 4 Gland nut

Type PEP
 1 Body
 2 Inner gasket
 3 Clamping & earthing cone
 4 Clamping nut
 5 Outer gasket
 6 Gland nut

Double compression for armoured cable (PAP)

Model	Φ Min-Max External (in mm)		Dimension (mm)				Weight (kg)	Code No.
	D	E	F	L				
PEP M20 T5	4 - 8.5	6 - 12	19	24	36	15	0.08	A209900100
PEP M20 T6	6 - 12	8.5 - 16	24	24	42	15	0.09	A209900101
PEP M20 T7	8.5 - 15.5	12 - 21	30	30	46	15	0.12	A20990090
PEP M25 T7	8.5 - 16	12 - 21	30	30	46	15	0.17	A209900102
PEP M25 T8	12 - 21	16 - 27.5	41	41	56	15	0.27	A209900103
PEP M32 T8	12 - 21	16 - 27.5	41	41	56	15	0.31	A209900104
PEP M32 T9	16 - 27.5	21 - 33	48	48	63	15	0.4	A209900105
PEP M40 T10	21 - 33	27 - 41	55	55	68	15	0.54	A209900106
PEP M50 T11	27 - 41	33 - 48	64	64	74	16	0.74	A209900107
PEP M63 T12	33 - 48	40 - 56	72	72	77	17	1	A209900108
PEP M75 T13	40 - 55	47 - 65	85	85	85	18	1.6	A209900109

Fonte: Sanchin, 2024.


ANEXO B – Certificado de calibração da balança

Figura 30 - Certificado de calibração da balança Toledo

ANÁLISE DE CONFORMIDADE

24796/2023/01

WEG Equipamentos Elétricos S/A - Seção de Metrologia
Laboratório de Calibração atende os requisitos da
NBR ISO/IEC 17025



DADOS DO EQUIPAMENTO CALIBRADO:

<p>Código: 11627 Descrição: Balança eletrônica (kg) Fabricante: Toledo Modelo: 3026 II Faixa de Medição: 0 a 6 kg</p>	<p>Nº Série: 0 Nº Patrimônio: Data de Emissão: 22/06/2023 Data de Calibração: 22/06/2023 Próximo Mês de Calibração: 07/2024</p>
---	---

DADOS DO CLIENTE:

<p>Nome: 1101 - 1001 - WMO - JGS PF I Endereço: Rua Venâncio da Silva Porto, 399 - Bloco C CNPJ: 07.175.725/0012-12 Seção: Seção Tecnologia de Materiais</p>	<p>IE: 255.083.890</p>
--	------------------------

LOCAL E CONDIÇÕES AMBIENTAIS DURANTE A CALIBRAÇÃO:

Local: Laboratório de massa pressão e torque - Jaraguá
 Temperatura: (20 °C ± 2 °C) // 39100 - Coletor de dados
 Umidade: (50 %UR ± 20 %UR) // 39100 - Coletor de dados

DADOS DO EQUIPAMENTO PADRÃO:

Código: 15600 - Jogo de massas
 Validade: 11/2023
 Certificado: M-68312/21

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO:

Dados do Equipamento			Valor Padrão	Resultado de Medição				Critério de Aceitação		AV
Faixa de Medição	Unidade	SMC	SMP	Tendência	Incerteza	Veff	k	Inferior	Superior	
Massa	kg	0,5000	0,5000	0,0000	0,0012	Inf.	2,00	-0,0020	0,0020	A
Massa	kg	1,0000	1,0000	0,0000	0,0012	Inf.	2,00	-0,0020	0,0020	A
Massa	kg	2,0000	2,0000	0,0000	0,0012	Inf.	2,00	-0,0040	0,0040	A
Massa	kg	3,9980	4,0000	-0,0020	0,0012	Inf.	2,00	-0,0040	0,0040	A
Massa	kg	5,9980	6,0000	-0,0020	0,0012	Inf.	2,00	-0,0080	0,0080	A
Excentricidade	kg	0,0000	0,0	0,0000	-	-	-	0,0000	0,0040	A

Signatário Autorizado:	Executante:
Gonçalo Vitto	Antonio Anverze

Fonte: autor, 2023.

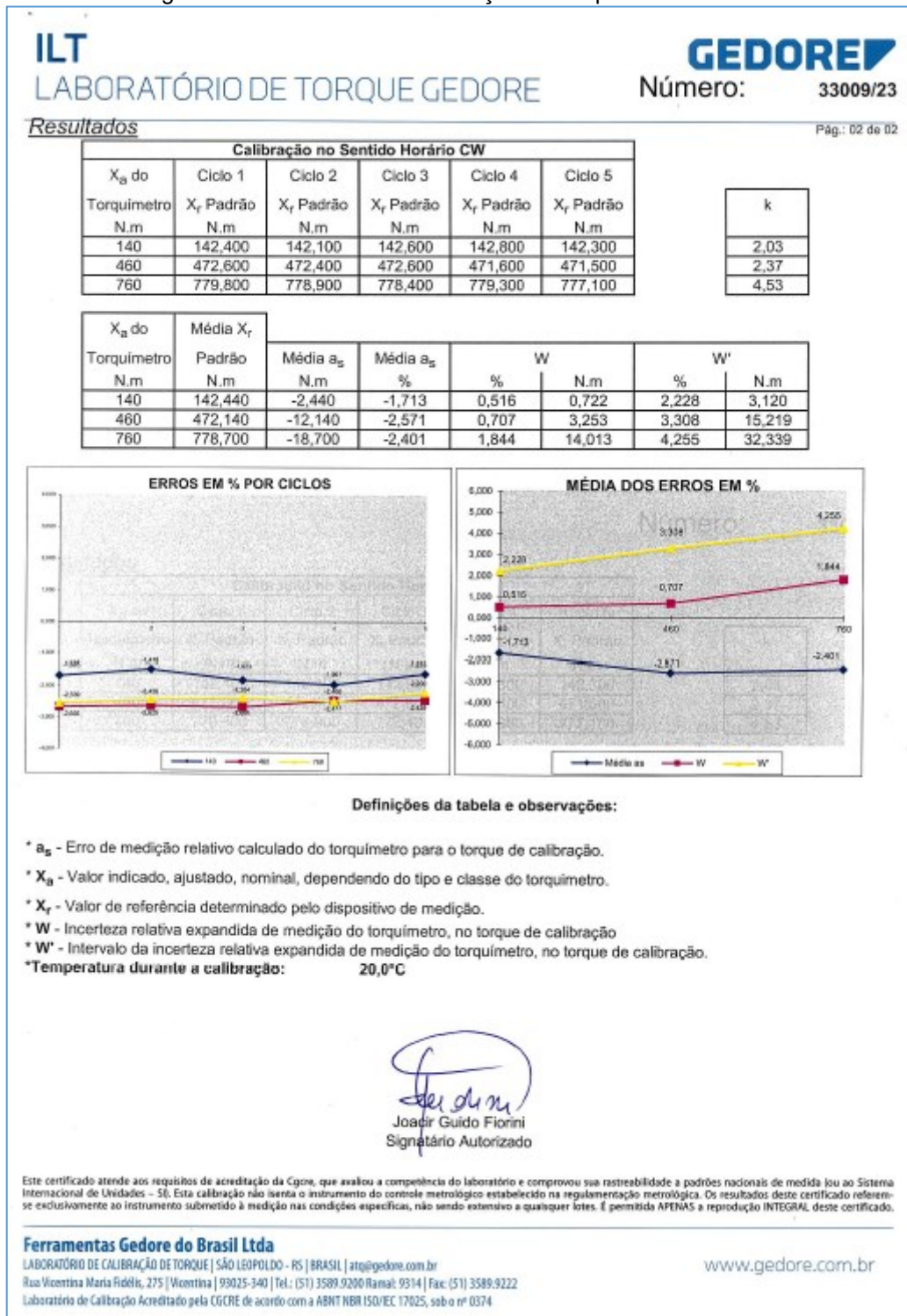
ANEXO C – Certificado de calibração do torquímetro

Figura 31 - Certificado de calibração do torquímetro - Parte 1

ILT LABORATÓRIO DE TORQUE GEDORE		GEDORE	
Certificado de Calibração			
Nº	33009/23		
Cliente:	Hidráulica Industrial Indústria e Comércio		
Endereço:	Av. Prefeito Waldemar Grubba, 3000 - Jaraguá do Sul/SC - Brasil		
Solicitação:	21232		
Equipamento Calibrado			
Código:	39527		
Descrição:	Torquímetro com pré-determinação de torque.		
Fabricante:	Gedore.		Tipo: II
Modelo:	Dremometer D.		Classe: A
Faixa Nominal:	140N.m até 760N.m		Valor de Uma Divisão : 10N.m
Nº de Fabricação:	2060506		
Padrão(ões) Utilizado(s)			
Patrimônio:	23225		
Descrição:	Transdutor de Torque, Cap. Máxima de 1000,0N.m.		
Fabricante:	Nobel 250310		
Certificado:	3274523		
Data Calibração:	25/07/2023		
Validade:	31/07/2024		
Entidade:	ILT-GEDORE - RBC nº 0374		
Instr. De Exibição:	Indicador digital T-BOX 2, nº de série 200398, código 23226.		
Dados Gerais da Calibração			
Incerteza de Medição: A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência $k =$ tabela da página 2, o qual para uma distribuição t com $Veff > 100$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.			
Ambiente: Temperatura 20+/-2°C e umidade relativa do ar: máximo 70%			
Norma de Referência: ABNT NBR ISO 6789-2:2022.			
Instrução Interna Utilizada: ISQ7637 Revisão 05.			
Procedimento de Calibração: A calibração foi realizada utilizando um conjunto de transdutor de torque e leitor digital. O torque foi aplicado cinco vezes consecutivas no ponto mínimo de torque especificado da faixa de medição, depois aproximadamente 80% e finalmente a 100% do valor máximo do torquímetro por equipamento mecânico com velocidade controlada. O valor (X_c) foi determinado pela média de cinco medições obtidas do ciclo 1 até o ciclo 5 (X_c) do padrão. O a_5 foi obtido através da subtração da indicação do torquímetro (X_m) menos o valor medido (X_c) .			
Data Recebimento:	29/08/2023		
Data Calibração:	31/08/2023		
Data de Emissão:	31/08/2023		
 Joacir Guido Fiorini Signatário Autorizado			
Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre, que avalia a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida ou ao Sistema Internacional de Unidades – SI. Esta calibração não trata o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à medição nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. É permitida APENAS a reprodução INTEGRAL deste certificado.			
Ferramentas Gedore do Brasil Ltda		www.gedore.com.br	
LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE TORQUE SÃO LEOPOLDO - RS BRASIL atq@gedore.com.br			
Rua Vicentina Maria Fidéis, 275 Vicentina 93025-340 Tel.: (51) 3589.9200 Ramal: 9314 Fax: (51) 3589.9222			
Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o nº 0374			

Fonte: autor, 2023.

Figura 32 - Certificado de calibração do torquímetro - Parte 2



Fonte: autor, 2023.

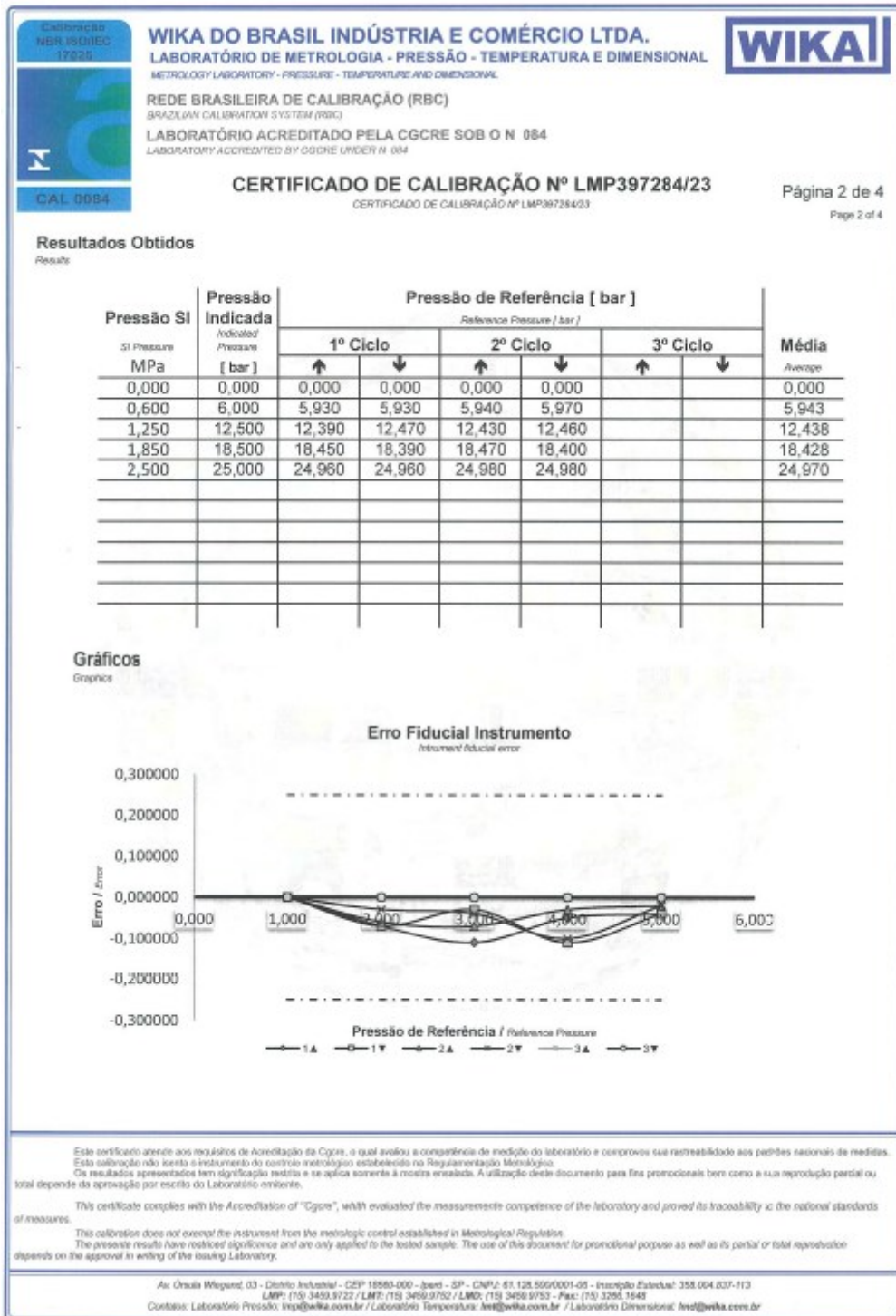
ANEXO D – Certificado de calibração do manômetro

Figura 33 - Certificado de calibração do manômetro - Parte 1

Calibração NBR 15018/1 17025	WIKA DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. LABORATÓRIO DE METROLOGIA - PRESSÃO - TEMPERATURA E DIMENSIONAL METROLOGY LABORATORY - PRESSURE - TEMPERATURE AND DIMENSIONAL	
	REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO (RBC) BRAZILIAN CALIBRATION SYSTEM (RBC) LABORATÓRIO ACREDITADO PELA CGCRE SOB O N. 084 LABORATORY ACCREDITED BY CGCRE UNDER N. 084	
CAL 0084	CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº LMP397284/23 CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº LMP397284/23	Página 1 de 4 Page 1 of 4
Dados Gerais General Data		
Cliente: WEG EQUIPAMENTOS ELETRICOS S/A Client:		
Endereço: AV.PREFEITO WALDEMAR GRUBBA, 3000 - VILA LALAU - JARAGUA DO SUL - SC Address:		
Solicitante: O mesmo Requesting Company:		
Instrumento: Instrument:	Manômetro Analógico	Faixa de Indicação: Indication Range:
		0 a 25 bar
Fabricante: Manufacturer:	WIKA	Valor de uma Divisão: Division Value:
		0,5 bar
Modelo: Model:	233.50.100 3Horas	Identificação Interna: Internal Identification:
		397284
Nº de Série: Serial Number:	8200DGM0	Nº Tag: N° Tag:
		NÃO CONSTA
Data da Calibração Calibration Date		
Calibração realizada em: segunda-feira, 14 de agosto de 2023 Calibration performed on:		
Procedimento de Calibração Calibration Procedure		
<p>O instrumento foi calibrado de acordo com o Procedimento Interno PRP-04 - rev. 19 em relação a um Instrumento Padrão Código PRGA-20102-4 do Laboratório de Metrologia - Pressão da WIKA do Brasil Indústria e Comércio Ltda., cuja incerteza máxima é de 0,012% para k = 2, e rastreado junto a WIKA do Brasil, de acordo com o certificado Nº LMP385183/23, válido até 13/04/2024.</p> <p>A calibração foi realizada com o instrumento na sua posição de utilização a uma temperatura de 20,9°C, permanecendo sobre pressão máxima durante ± 5 minutos para estabilidade do sistema de calibração.</p> <p>The instrument was calibrated according Internal Procedure PRP-04 - rev. 19 with a Standard Gauge with Code PRGA-20102-4 of the Metrology Laboratory - Pressure of WIKA do Brasil Indústria e Comércio Ltda., whose uncertainty is 0.012% with k = 2, traced together with WIKA do Brasil, according to certificate Nº LMP385183/23, valid until 13/04/2024.</p> <p>The calibration was executed with the instrument in its use position at the temperature of 20.9°C, staying on maximum pressure for ± 5 minutes for stability of the calibration system.</p>		
Observações Notes		
		Iperó, segunda-feira, 14 de agosto de 2023  Regimarcos Colombo Signatário Autorizado
<p>Este certificado atende aos requisitos de Acreditação da Cgcre, o qual avalia a competência de medição do laboratório e comprovou sua rastreabilidade aos padrões nacionais de medidas. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrologia. Os resultados apresentados têm significância restrita e só aplicam-se à amostra avaliada. A utilização deste documento para fins promocionais bem como a sua reprodução parcial ou total depende da aprovação por escrito do Laboratório emissor.</p> <p>This certificate complies with the Accreditation of "Cgcre", which evaluated the measurement competence of the laboratory and proved its traceability to the national standards of measures. This calibration does not exempt the instrument from the metrologic control established in Metrological Regulation. The presented results have restricted significance and are only applied to the tested sample. The use of this document for promotional purpose as well as its partial or total reproduction depends on the approval in writing of the issuing Laboratory.</p>		
<p style="text-align: center;"> Av. Úrsula Wegand, 03 - Distrito Industrial - CEP 18560-000 - Iperó - SP - CNPJ: 01.128.500/0001-06 - Inscrição Estadual: 358.004.837-1/3 LMP: (15) 3459.9722 / LMT: (13) 3459.9752 / LMD: (13) 3459.9752 - Fax: (15) 3256.1648 Contatos: Laboratório Pressão: imp@wika.com.br / Laboratório Temperatura: ltm@wika.com.br / Laboratório Dimensional: ldm@wika.com.br </p>		

Fonte: autor, 2023.

Figura 34 - Certificado de calibração do manômetro - Parte 2



Fonte: autor, 2023.

Figura 35 - Certificado de calibração do manômetro - Parte 3

Calibração
NBR ISO/IEC
17025

CAL 0084

WIKA DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.
 LABORATÓRIO DE METROLOGIA - PRESSÃO - TEMPERATURA E DIMENSIONAL
 METROLOGY LABORATORY - PRESSURE - TEMPERATURE AND DIMENSIONAL

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO (RBC)
 BRAZILIAN CALIBRATION SYSTEM (RBC)

LABORATÓRIO ACREDITADO PELA CGCRE SOB O N 084
 LABORATORY ACCREDITED BY CGCRE UNDER N 084

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº LMP397284/23
 CERTIFICATE OF CALIBRATION Nº LMP397284/23

Página 3 de 4
Page 3 of 4

Características Metroológicas
Metologic Characteristics

MÁXIMA INCERTEZA DE MEDIÇÃO: MAX MEASUREMENT UNCERTAINTY	0,83 %
MÁXIMO ERRO FIDUCIAL: MAX FIDUCIAL ERROR	0,44 %
MÁXIMA HISTERESE: MAX HYSTERESIS	0,32 %
MÁXIMA REPETITIVIDADE: MAX REPETITIVENESS	0,16 %
MÁXIMA LINEARIDADE: MAX LINEARITY	0,26 %

Resultados de Medição
Measurement Results

Pressão SI SI Pressure MPa	Pressão Indicada Indicated Pressure [bar]	U _{95%} [bar]	U _{95%} [%]	Erro fiducial médio Average fiducial error [%]
0,000	0,000	0,2	0,82	0,000
0,600	6,000	0,21	0,82	0,230
1,250	12,500	0,21	0,83	0,250
1,850	18,500	0,21	0,83	0,289
2,500	25,000	0,21	0,82	0,119

Este certificado atende aos requisitos da Acreditação da Cgcre, o qual avalia a competência de medição do laboratório e comprovou sua rastreabilidade aos padrões nacionais de medidas.
 Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica.
 Os resultados apresentados têm significação restrita e se aplicam somente à mostra ensaiada. A utilização deste documento para fins promocionais tem como a sua reprodução parcial ou total depende da aprovação por escrito do Laboratório emissor.

This certificate complies with the Accreditation of "Cgcre", which evaluated the measurement competence of the laboratory and proved its traceability to the national standards of measures.
 This calibration does not exempt the instrument from the metrologic control established in Metrological Regulation.
 The present results have restricted significance and are only applied to the tested sample. The use of this document for promotional purposes as well as its partial or total reproduction depends on the approval in writing of the issuing Laboratory.

Av. Úrsula Wogrand, 69 - Distrito Industrial - CEP 19969-000 - Ipediungá - SP - CNPJ: 01.726.900/0001-05 - Inscricão Estadual: 358.004.837-113
 LMP: (15) 3458-9722 / LMT: (15) 3459-9752 / LMD: (15) 3459-9753 - Fax: (15) 3598-1648
 Contatos: Laboratório Pressão: imp@wika.com.br / Laboratório Temperatura: tem@wika.com.br / Laboratório Dimensional: ind@wika.com.br

Fonte: autor, 2023.

Figura 36 - Certificado de calibração do manômetro - Parte 4

<p>Calibração NBR ISO/IEC 17025</p> <p>CAL 0884</p>	<p>WIKA DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. LABORATÓRIO DE METROLOGIA - PRESSÃO - TEMPERATURA E DIMENSIONAL METROLOGY LABORATORY - PRESSURE - TEMPERATURE AND DIMENSIONAL</p> <p>REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO (RBC) BRAZILIAN CALIBRATION SYSTEM (RBC)</p> <p>LABORATÓRIO ACREDITADO PELA CGCRE SOB O N.º 084 LABORATORY ACCREDITED BY CGCRE UNDER N.º 084</p>	
<p>CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº LMP397284/23 CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº LMP397284/23</p>		<p>Página 4 de 4 Page 4 of 4</p>
<p>Reta de Regressão do Instrumento Instrument Trend Line</p>		
<p>$y = +0,99883337 \cdot x - 0,02994453$ [bar]</p> <p>$r^2 = 0,99999309$</p>		
<p>Onde: y = Pressão Referência / Reference Pressure x = Pressão Indicada pelo Instrumento / Instrument Indicated Pressure r^2 = Qualidade do Ajuste / Adjust Quality u_{Reta} = Incerteza da Reta de Regressão / Uncertainty of Trend Line k = 2,00</p>		
<p>Observações Gerais General Remarks</p>		
<ol style="list-style-type: none"> 1) 1 bar = 100000,00 Pa; 2) A validade da calibração deve ser estabelecida pelo usuário em plano de calibração descrito no sistema da qualidade conforme Norma NBR-ISO-10012 parte 1; <i>The calibration validity should be established by the user in the calibration plan described in the quality system according the Norm NBR-ISO-10012 part1.</i> 3) A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada por um fator de abrangência $k = 2$, o qual para uma distribuição t com $v_{eff} = \infty$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%; <i>The reported expanded measurement uncertainty is stated as the standard uncertainty of the measurement multiplied by a coverage factor $k = 2$, which for a distribution t with $v_{eff} = \infty$ effective degrees of freedom corresponds to a coverage probability of approximately 95%.</i> 4) A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02; <i>The uncertainty of measurement was determined in accordance with the publication EA-4/02.</i> 5) Instrumento calibrado com Ar Comprimido; <i>Instrument calibrated with Compressed Air;</i> 6) Instrumento calibrado dentro das instalações da WIKA do Brasil. <i>Instrument calibrated inside of WIKA do Brasil plant.</i> 7) A Cgcre é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) <i>Cgcre is signatory of the ILAC Mutual Recognition Arrangement (International Laboratory Accreditation Cooperation)</i> 8) A Cgcre é signatária de acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA (European Cooperation for Accreditation) <i>Cgcre is signatory of the EA - Bilateral Recognition Arrangement (European Cooperation for Accreditation)</i> 		
<p><small>Este certificado atende aos requisitos de Acreditação da Cgcre, o qual avaliou a competência de medição do laboratório e comprovou sua rastreabilidade aos padrões nacionais de medidas. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica. Os resultados apresentados tem significação restrita e se aplicam somente à medida ensaiada. A utilização deste documento para fins promocionais bem como a sua reprodução parcial ou total depende da aprovação por escrito do Laboratório emissor.</small></p> <p><small>This certificate complies with the Accreditation of "Cgcre", which evaluated the measurements competence of the laboratory and proved its traceability to the national standards of measures.</small></p> <p><small>This calibration does not exempt the instrument from the metrologic control established in Metrological Regulation.</small></p> <p><small>The presented results have restricted significance and are only applied to the tested sample. The use of this document for promotional purpose as well as its partial or total reproduction depends on the approval in writing of the issuing Laboratory.</small></p>		
<p><small>Av. Odeia Miegand, 03 - Distrito Industrial - CEP 18580-000 - (part) - SP - CNPJ: 07.128.599/0001-06 - Inscricao Estadual: 358.694.837-113 LMP: (15) 3459.8722 / LMT: (15) 3458.9732 / LMD: (15) 3458.8733 - Fax: (15) 3266.1548 Contatos: Laboratório Pressão: isp@wika.com.br / Laboratório Temperatura: imt@wika.com.br / Laboratório Dimensional: imd@wika.com.br</small></p>		

Fonte: autor, 2023.