

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

MIGUEL DA CRUZ XAVIER

APLICAÇÃO DO DOE FATORIAL COMPLETO PARA REPLICAR FALHAS  
RELACIONANADAS AOS ESFORÇOS EXCESSIVOS DURANTE A  
INSTALAÇÃO DE REGISTROS DE GAVETA

Joinville

2021

MIGUEL DA CRUZ XAVIER

APLICAÇÃO DO DOE FATORIAL COMPLETO PARA REPLICAR FALHAS  
RELACIONADAS AOS ESFORÇOS EXCESSIVOS DURANTE A  
INSTALAÇÃO DE REGISTROS DE GAVETA

Monografia  
apresentada ao curso  
de bacharelado em  
Engenharia Mecânica  
do Campus Joinville  
do Instituto Federal de  
Santa Catarina para a  
obtenção do diploma  
de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr.  
Anael Preman Krelling

Joinville  
2021

MIGUEL DA CRUZ XAVIER

APLICAÇÃO DO DOE FATORIAL COMPLETO PARA REPLICAR FALHAS  
RELACIONADAS AOS ESFORÇOS EXCESSIVOS DURANTE A  
INSTALAÇÃO DE REGISTROS DE GAVETA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Joinville, 05 de agosto de 2021.

---

Prof. Anael Preman Krelling, Dr  
Orientador  
Instituto Federal de Santa Catarina

---

Prof. Jefferson Luiz Jerônimo, Me.  
Instituto Federal de Santa Catarina

---

Prof. Ivandro Bonetti, Dr  
Instituto Federal de Santa Catarina

**RESUMO**

Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre trincas relacionadas ao excesso de esforços durante a instalação de registros de gaveta de latão fundido. O estudo foi realizado utilizando a metodologia DOE fatorial (Design Of Experiments) que é uma combinação de experimentos planejados que permite relacionar o efeito em conjunto de níveis de fatores independentes sobre uma ou mais variáveis de respostas dependentes. A partir destes experimentos é possível desenvolver modelos matemáticos empíricos que permitam, para o intervalo de experimentação considerado, prever os efeitos de determinadas combinações (OPRIME; PUREZA; OLIVEIRA, 2017).

Com isso, adotou-se como fatores independentes, para as combinações de experimentos, diferentes valores de torque aplicados na instalação dos registros juntamente com diferentes quantidades de voltas de veda rosca. Para simular os torques de instalação foram utilizados tampões  $\frac{3}{4}$ " com rosca cônica ISO 7-1 e adicionado veda rosca para, então, serem rosqueados aos registros utilizando um torquímetro para medição do torque aplicado.

Após a finalização dos ensaios, foi gerada a equação de regressão dos resultados para prever os valores de torque de ruptura dos registros de gaveta. Ao final, obteve-se valores teóricos e reais com erros percentuais aceitáveis.

Palavras-Chave: Registro gaveta. Torque. Trinca. Latão fundido.

## ABSTRACT

This work presents a case study about breaks related to efforts excess during the installation of cast brass gate valves. The study was accomplished using the DOE factorial (Design Of Experiments) methodology which is a combination of planned experiments that allows to relate the effect of a group of independent factors levels about one or more variables of dependent answers. From these experiments is possible to develop empirical mathematical models which allows, for the experimentation interval considered, to predict the effects of determined combinations (OPRIME; PUREZA; OLIVEIRA, 2017).

Thereby, adopted as independent factors, for the experiments combinations, different values of torque applied on valve installation along with different amounts of rotations of thread seal. To simulate installation torques were used end plug pipe  $\frac{3}{4}$ " with conical thread ISO 7-1 and added thread seal for, then, to be threaded to the valves using a torquemeter to measure the applied torque.

After the conclusion of rehearsal, was generated a equation of results regression to predict the values of crack torque gate valves. At the end, got theoretical values and reals with acceptable percentage errors.

Key words: Gate valve. Torque. Breaks. Cast brass.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Registro de gaveta .....	9
Figura 2: Distribuição normal Seis Sigma .....	12
Figura 3: Experimento fatorial, com interação .....	15
Figura 4: (a) Fratura Dúctil em alumínio (b)Fratura frágil em ferro fundido cinzento .....	18
Figura 5: Superfície de fratura de um eixo rotativo de aço que apresentou falha por fadiga .....	18
Figura 6: Amostras de registros de gaveta .....	19
Figura 7: Fita veda rosca tigre .....	19
Figura 8: Bujão TUPY ¾" .....	19
Figura 9: Torquímetro GEDORE .....	20
Figura 10: Relógio analógico torquímetro GEDORE .....	20
Figura 11: Adaptador torquímetro .....	21
Figura 12: Ensaio de torque .....	21
Figura 13: Espectrômetro de emissão óptica SPECTROMAXx .....	22
Figura 14: Microscópio Ótico .....	23
Figura 15: Politriz AROTEC .....	23
Figura 16: Dicromato de Potássio .....	23
Figura 17: Aparelho FUTURE TECH FM800 .....	24
Figura 18: Recomendação do uso de veda rosca .....	25
Figura 19: Bujão TUPY com 0,4m de veda rosca .....	25
Figura 20: Bujão TUPY com 1,2m de veda rosca .....	25
Figura 21: Medição do comprimento de veda rosca .....	26
Figura 22: Centralização x Descentralização de usinagem das roscas .....	27
Figura 23: Experimentos fatoriais possíveis .....	28
Figura 24: Microestrutura Amostra (a) .....	31
Figura 25: Microestrutura Amostra (b) .....	31
Figura 26: Gráfico de cubo (média de dados) para o torque suportado .....	34
Figura 27: Rosca cônica ISO 7-1:2000 .....	35
Figura 28: Bujão TUPY (Rosca cônica com ângulo 1:16) .....	35
Figura 29: Diagrama de forças .....	36
Figura 30: Gráfico de Pareto do Efeitos Padronizados .....	37
Figura 31: Gráfico de Efeitos Principais para Torque suportado .....	38
Figura 32: Gráfico de Interação para Torque suportado .....	38
Figura 33: Trinca (Amostra 3) .....	42
Figura 34: Trinca (Amostra 3) (a) .....	42
Figura 35: Trinca (Amostra 3) (b) .....	42
Figura 36: Trinca (Amostra 3) (c) .....	43
Figura 37: Trinca (Amostra 3) (d) .....	43
Figura 38: Trinca (Amostra 3) (e) .....	43
Figura 39: Trinca (Amostra 3) (f) .....	44
Figura 40: Trinca (Amostra 3) (g) .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resistência ao torque de instalação .....	10
Tabela 2: Ordens de grandeza para um fatorial com 4 fatores .....	14
Tabela 3: Exemplo DOE com dois níveis e dois fatores .....	15
Tabela 4: Fatores para o planejamento de experimento $2^3$ .....	24
Tabela 5: Combinação de ensaios $2^3$ .....	28
Tabela 6: Análise de composição da liga.....	29
Tabela 7: Especificação normativa para composição de ligas de cobre.....	30
Tabela 8: Resultados da análise de micro dureza .....	32
Tabela 9: Resultado do Delineamento de experimento $2^3$ .....	32
Tabela 10: Fatores para o planejamento de experimento $2^2$ .....	40
Tabela 11: Combinação de ensaios $2^2$ .....	40
Tabela 12: Resultado do Delineamento de experimento $2^2$ .....	40

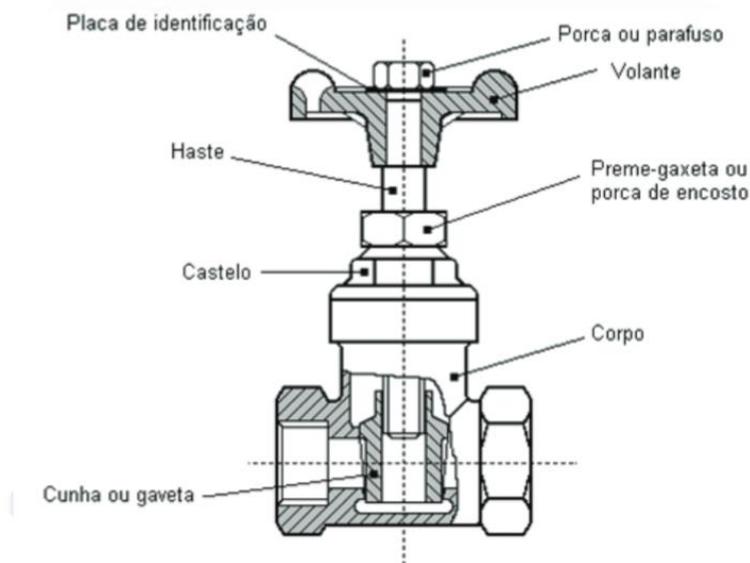
## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
2.1	Objetivos gerais	11
2.2	Objetivos específicos	11
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>11</b>
3.1	Delineamento de experimentos	11
3.2	Ligas de latão fundido	17
3.3	Trincas	17
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>19</b>
4.1	Materiais e métodos	19
4.2	Caracterização do material	22
4.3	Delineamento de experimento	24
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>29</b>
5.1	Resultados da caracterização do material	29
5.2	Resultados do delineamento de experimento	32
5.3	Análise das trincas das amostras	41
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No ramo de metais sanitários, os registros do tipo gaveta com vedação não compressível são largamente comercializados e possuem diversas aplicações através de diferentes fluidos, como água ou óleo refrigerante. Este tipo de registro tem seu funcionamento através da gaveta que abre ou fecha com a articulação do volante que gira a haste (Conforme Figura 1). Quando a gaveta está totalmente aberta, o fluido passa livremente pelo corpo.

Figura 1: Registro de gaveta



Fonte: NBR 15705 – Item 3.4

Com isso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) redigiu a Norma Técnica NBR 15705 (Instalações hidráulicas prediais - Registro de gaveta - Requisitos e métodos de ensaio) para padronização das características deste produto. Tais definições mencionam qual deve ser o torque mínimo que o registro deve suportar durante a instalação de conexões roscadas (Tabela 1), sem apresentar quaisquer tipos de falhas, considerando que a tubulação possui rosca cônica ISO 7-1, onde a vedação é feita sob pressão pela rosca. Entretanto, segundo o manual de instalação de tubos CPVC AMANCO, é recomendado o uso de fita veda rosca como elemento de vedação na junta roscável, visto que somente a compressão metálica não realiza estanqueidade total do conjunto em decorrência da rugosidade e variação de usinagem.

Tabela 1: Resistência ao torque de instalação

Diâmetro nominal DN	Diâmetro externo DE	Torque de instalação	
		(Registro metálico) N.m	(Registro plástico) N.m
15	20	50	10
20	25	80	12
25	32	120	-
32	40	150	-
40	50	180	-
50	60	250	-
65	75	250	-
80	85	300	-
100	110	400	-

Fonte: NBR 15705 – Tabela 7

Essa utilização de veda rosca atua como agravante em propagação de trincas, quando somado ao excesso de torque de instalação, visto que a tubulação possui rosca cônica e o registro rosca paralela, pois a geometria cônica tende a exercer pressão na direção radial do corpo do registro que possui geometria cilíndrica e, com isso, ocorre uma concentração de tensões no sextavado do corpo. Ao utilizar fita veda rosca, há um acréscimo de dimensões na rosca cônica que acentua ainda mais os esforços exercidos no registro.

Também, a NBR 15705 menciona que o produto deve ser fabricado em material que não comprometa a potabilidade da água (Quando instalado em rede de água potável) e não facilite o desenvolvimento de atividade biológica (Item 4.1). Assim, muitas empresas adotam a liga de latão fundido como matéria prima para confecção de registros.

Segundo Mateso (2006), as ligas de latão binária (Cu-Zn) apresentam múltiplas possibilidades comerciais dentro das indústrias, visto que são resistentes à corrosão, possuem boa conformabilidade e resistência mecânica. Estas ligas, quando compostas por teores de zinco mais elevados, acima de 35%, são constituídas pela fase  $\beta$  (Composto intermediário de zinco e cobre) e fase  $\alpha$  (Região rica em cobre). Ainda, Silva (2015) diz que as ligas de latão  $\alpha+\beta$

apresentam transformações de fases específicas que resultam em diferentes microestruturas e propriedades mecânicas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

Aplicar um estudo de caso sobre falhas em registros de gaveta durante a instalação em conexões roscadas, realizando uma série de ensaios, simulando as condições práticas de instalação, para replicar a quebra a partir do torque de aperto excessivo. Os ensaios serão realizados com foco em exercer a metodologia proposta pelo DOE fatorial completo, a fim de se constatar a importância e eficácia desta metodologia de análise estatística.

### **2.2 Objetivos específicos**

Realizar uma aplicação da metodologia DOE fatorial com dois níveis e três variáveis: Veda rosca, torque e centralização de usinagem dos registros. Após os ensaios, utilizar o software MINITAB para realizar uma predição de resultados a partir de uma equação matemática, para então, verificar o erro desta predição em relação à novos ensaios.

## **3 REVISÃO DE LITERATURA**

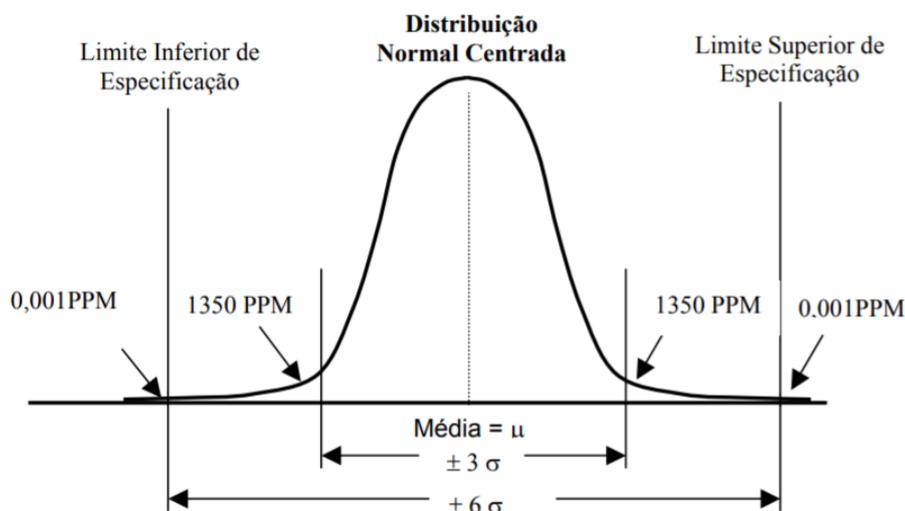
### **3.1 Delineamento de experimentos**

Diante do estudo de algum problema ou melhoria de processo, muitas vezes precisamos correlacionar diferentes variáveis para entendermos quais são os impactos que cada uma pode gerar no resultado pretendido do estudo em questão. Uma metodologia prática para se realizar este tipo de estudo é a utilização do DOE (Design of Experiments) fatorial, implantada por Fisher em 1990, que permite planejar uma combinação de experimentos para relacionar o efeito do conjunto de níveis (valores) de fatores (variáveis) independentes sobre uma ou mais variáveis de respostas dependentes julgadas de interesse (OPRIME; PUREZA; OLIVEIRA, 2017). Calegare (2015, p. 65) diz que o

experimento fatorial é apropriado quando dois ou mais fatores estão sendo ensaiados em dois ou mais níveis e através dos ensaios pode-se determinar se há interação entre os fatores, ou seja, é possível observar se há influência de uma variável sobre a outra.

Mesmo sendo uma ferramenta que veio sendo desenvolvida desde a década de 90, o DOE fatorial ganhou grande notoriedade quando foi integrado à metodologia Seis Sigma. Esta metodologia teve seu desenvolvimento em 1986/87 na empresa Motorola como resposta à forte concorrência Japonesa da época e ganhou forças quando adotada pela empresa General Eletric em 1995. Tem como foco o “Zero defeitos”, ou seja, está ligada à redução de variação que é representada através do símbolo Sigma ( $\sigma$ ), usado em estatística para representar o desvio padrão. A medida seis sigma é lida na distribuição normal mostrada Figura 2, onde para um processo com 3 Sigmas a curva normal prevê um índice de partes por milhão (PPM) não conformes de 1350 PPM para cada ponta da curva, assim o valor é duplicado para 2700 PPM. Já um processo 6 Sigmas prevê 0,001 PPM para cada lado da curva (0,002 PPM de ponta a ponta) (REIS, 2003).

Figura 2: Distribuição normal Seis Sigma



Fonte: REIS, 2003 (p. 41)

Ainda Reis (2003) diz que o grande diferencial do Seis Sigma é sua base formada por ferramentas estatísticas unificadas pelo processo denominado DMAIC, onde cada sigla é listada e exemplificada abaixo:

- D – *Define* (Definir): Definição do que é importante para o cliente;
- M – *Measure* (Medição): Medição dos processos e conversão dos resultados em informações que indiquem soluções;
- A – *Analysis* (Análise): Descoberta da causa dos problemas;
- I – *Improve* (Melhoria): Aperfeiçoamento dos processos ;
- C – *Control* (Controle): Manutenção dos ganhos obtidos.

O DOE se classifica como uma das principais ferramentas utilizadas na fase *Analysis*, para identificação das principais variáveis independentes que afetam os resultados (REIS, 2003). Tais variáveis são definidas como principais em relação as outras utilizando o princípio de Pareto. Juran (1998) diz em seu livro que o princípio de Pareto afirma que em qualquer população que contribui para um efeito comum, alguns poucos contribuintes respondem pela maior parte dos efeitos. Ou seja, aquelas que são consideradas variáveis principais (Que são poucas e vitais) correspondem à maior parte do efeito gerado. De forma geral, 80% dos resultados totais se originam de 20% dos elementos que o compõem (SALES, 2012). Assim, após realizar um estudo de DOE fatorial, através do princípio de Pareto pode-se direcionar ações de melhorias focadas nestes principais fatores e reduzir o tempo e gastos com análises que não impactam de forma considerável o efeito final. Mesmo que o planejamento fatorial geralmente é utilizado em experimentos envolvendo vários fatores, em que é preciso estudar o efeito conjuntos deles sobre uma resposta, existem vários casos especiais do planejamento fatorial em que são importantes por serem empregados em trabalhos de considerável valor prático. Sendo o mais importante desses casos especiais, experimentos de  $K$  fatores com somente dois níveis em cada. Podendo estes níveis, serem quantitativos (Pressão, tempo...) ou qualitativos (Alto, baixo...) e geralmente denotados níveis baixos e níveis altos através dos sinais – e +, respectivamente. (DOUGLAS C . MONTGOMERY E GEORGE C . RUNGER, 2009).

Almeida (2019) mostra que a equação usada para calcular o número total de experimentos, considerando um fatorial completo, é descrita abaixo pela equação 1:

$$N^{\circ} \text{ Total de experimentos} = (N^{\circ} \text{ de níveis})^k \quad (1)$$

$k = \text{Quantidade de fatores}$

Em contrapartida ao método fatorial completo, existe o fatorial fracionado que é descrito pela equação 0 :

$$N^{\circ} \text{ Total de experimentos} = (N^{\circ} \text{ de níveis})^{k-p} \quad (2)$$

$k = \text{Quantidade de fatores}$

$p = \text{Número de partes de redução}$

Este segundo caso aplica-se quando se tem um elevado número de fatores  $K$  que aumentam significativamente o número de experimentos e consequentemente os custos do estudo. Assim, esta técnica possibilita analisar os efeitos sobre uma resposta de interesse realizando apenas uma parte do experimento sem comprometer significativamente a precisão dos resultados.

Montgomery e Runger (2009), mostram que conforme se aumenta o número de fatores em um planejamento fatorial as ordens grandezas também aumentam. Ou seja, para um experimento com 4 fatores A, B, C e D, tem-se as ordens de grandeza para todas as combinações possíveis mostradas na Tabela 2. Há pouco interesse em se analisar interações de terceira ordem ou superiores, particularmente quando se estuda um processo ou sistema.

Tabela 2: Ordens de grandeza para um fatorial com 4 fatores

1ª	2ª	3ª	4ª
ORDEM	ORDEM	ORDEM	ORDEM
A	AB	ABC	ABCD
B	AC	ABD	
C	AD	ACD	
D	BC	BCD	
	BD		
	CD		

Fonte: Próprio autor

Quando é possível negligenciar interações de ordem alta, um fatorial

fracionado, que envolve menos experimentos que um fatorial  $2^k$ , pode ser utilizado para se obter informações sobre os efeitos principais e interações de ordens baixa. Entretanto, neste trabalho, o estudo foi conduzido utilizando o fatorial completo em decorrência da boa disponibilidade das amostras e grandeza de 3ª ordem para todas as combinações possíveis.

Com isso, a Tabela 3 mostra um exemplo genérico de experimento fatorial completo  $2^2$ , com dois níveis (1 e 2) e dois fatores A e B. Sabendo que durante o desenvolvimento e execução do delineamento de experimento é desejável verificar se há interação entre os fatores, a Figura 3 permite visualizar, através dos resultados dos ensaios, se o fator A influencia no fator B.

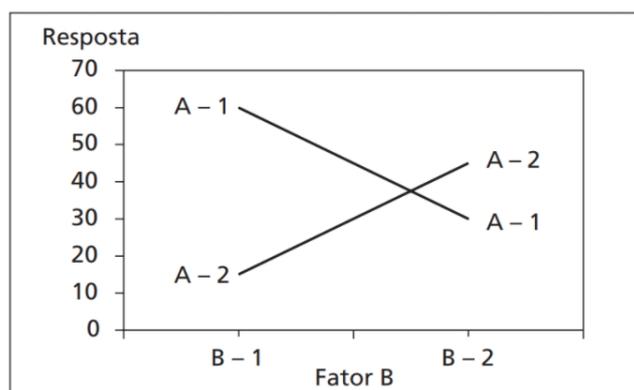
Tabela 3: Exemplo DOE com dois níveis e dois fatores

		FATOR A	
		A - 1	A - 2
FATOR B	B - 1	60	15
	B - 2	30	45

Fonte: CALEGARE, 2015 (p. 66)

Os resultados de cada ensaio são mostrados na figura abaixo:

Figura 3: Experimento fatorial, com interação



Fonte: CALEGARE, 2015 (p. 67)

Foram traçadas linhas que se cruzam e ligam os dois níveis de cada fator, pode-se ver que existe interação entre A e B. Caso as linhas não se cruzassem, não haveria interação entre estas duas variáveis. Com isso, afirma-se que o fator B depende do nível do fator A.

Ainda, Calegare (2015, p. 67) diz que os experimentos fatoriais evitam conclusões errôneas quando existe interações entre os fatores, bem como também possibilitam a estimativa dos efeitos de um fator em diversos níveis dos outros fatores, permitindo conclusões que são válidas numa amplitude de condições experimentais.

Logo, para um delineamento de experimentos, deve-se seguir uma sequência de passos para construção do estudo: Definição e reconhecimento da importância do problema; escolha dos fatores e níveis; seleção de uma variável resposta, escolha do planejamento experimental; análise dos resultados; conclusões e recomendações (CARLOS et al., 2009).

TÜRKMEN (2018), em seu artigo sobre a boretção em aço SAE 1020, utilizou o DOE fatorial completo, com três níveis e duas variáveis ( $3^2$ ), com o objetivo de estimar a espessura de camada de boreto a partir da temperatura e tempo. Após os ensaios, formulou a equação de regressão dos resultados para estimar a espessura da camada de boreto.

Em contraste com equações empíricas, a equação de predição proveniente do DOE fatorial completo, apresentou valores altos para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), valores entre 96% e 99,60%.

Utilizando a análise fatorial, CHOUDHURY (1997) mostrou que o DOE fornece muito mais informações com menos experimentos, quando comparado à análises tradicionais de “uma variável por vez”. Pois, em seu estudo sobre predição de rugosidade superficial no torneamento de aço, apenas precisou realizar doze ensaios pelo método fatorial enquanto foram necessários vinte e quatro ensaios para o modelo “uma variável por vez”.

Assim como também BURAGOHAIN (2008) mostrou que o método fatorial pode ser aplicado para otimizar o tempo de aprendizado de sistemas de redes neurais a partir da base de dados gerada pelo DOE fatorial. Onde é explicado que para estes sistemas, o método de aprendizagem para treinar a rede neural é a partir da retropropagação, ou seja, o sistema utiliza a base de dados fornecida inicialmente para formular respostas a partir do método de tentativa e erro, e aprende com cada resultado indesejado.

Se esta base de dados possuir informações que pouco possuem influência sobre o problema em questão, o tempo de aprendizado se estende significativamente. Assim, o DOE fatorial mostrou-se uma ferramenta útil para

formular a base de dados, onde apenas fatores, que apresentam maior influência sobre o resultado, são inseridos. Esta escolha de dados mais criteriosa resultou em menor tempo de aprendizado do sistema neural.

### **3.2 Ligas de latão fundido**

Uma liga metálica é definida como um sistema físico-químico que contém mais de um elemento e tem como principal um metal que pode ser classificado como ferroso ou não ferroso. Cada composição de liga possui suas particularidades como condutividade térmica, resistência mecânica, condutividade elétrica, resistência à fadiga (BALDAM, 2014).

Ainda BALDAM (2014) diz que as ligas de cobre na condição de produtos fundidos apresentem grande variação de propriedades como resistência à corrosão e estanqueidade, ou seja, evita o vazamento de fluidos através das paredes da peça fundida. Estas ligas podem ser fundidas por processos que permitem obter uma grande variedade de formas geométricas, porém a qualidade da peça depende basicamente de sua composição química, que é influenciada pelas condições de resfriamento e pela composição química da matéria prima.

A liga de latão é um composto binário de cobre e zinco, considerada bifásica porque apresenta uma microestrutura composta por duas fases, alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ). Sendo a fase  $\alpha$  muito rica em cobre, com estrutura cúbica de faces centradas (cfc) e dúctil. Já a fase  $\beta$ , possui uma estrutura cristalográfica cúbica de corpo centrado (ccc), dura e com maior resistência mecânica (MOREIRA, 2010).

### **3.3 Trincas**

CALLISTER (2021) define que, para metais, existem dois tipos de fraturas: dúctil e frágil. Sendo que ambas se originam a partir da formação e propagação de trincas em resposta à imposição de uma tensão. Porém a fratura dúctil se caracteriza por uma extensa deformação plástica na região de uma trinca que se propaga e a fratura frágil se propaga de maneira rápida com pouca deformação plástica na região da falha.

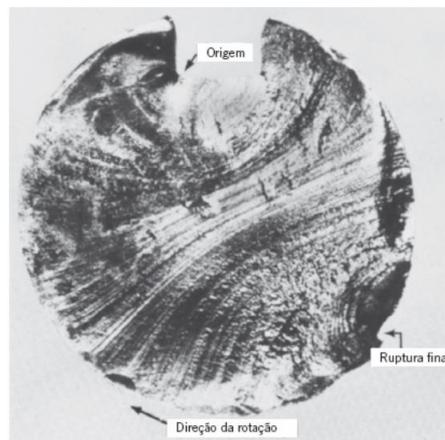
Figura 4: (a) Fratura Dúctil em alumínio (b)Fratura frágil em ferro fundido cinzento



Fonte: CALLISTER, 2021 (p. 189)

Também, em condições normais sempre existem defeitos ou trincas microscópicas na superfície e interior do corpo de um material que atuam como fator negativo para a resistência à fratura. Amplificando ou concentrando as tensões na extremidade do defeito, sendo, assim, chamados de concentradores de tensão. Trincas que se originam através de cargas cíclicas, aplicadas sobre o corpo de um material, tendem a se originarem nestes concentradores de tensões e se propagarem a cada ciclo até que ocorra, de forma rápida, a falha por completo do material. Para cada nucleação de trinca originada por um ciclo, são geradas marcas denominadas marcas de praia ou estrias.

Figura 5: Superfície de fratura de um eixo rotativo de aço que apresentou falha por fadiga



Fonte: CALLISTER, 2021 (p. 210)

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Materiais e métodos

Foram utilizados dezesseis registros de gaveta  $\frac{3}{4}$ " de latão fundido de uma empresa da região de Joinville, dezesseis bujões de ferro fundido galvanizado  $\frac{3}{4}$ " e fita veda rosca tigre 18mm x 25m.

Figura 6: Amostras de registros de gaveta



Fonte: Próprio autor

Figura 7: Fita veda rosca tigre



Fonte: Próprio autor

Figura 8: Bujão TUPY  $\frac{3}{4}$ "



Fonte: Próprio autor

O torque aplicado sobre os bujões TUPY, quando rosqueados nos registros, foi medido utilizando um torquímetro analógico da marca GEDORE com variação de torque de 0 – 350 Nm.

Figura 9: Torquímetro GEDORE



Fonte: Próprio autor

Este modelo de torquímetro possui um relógio analógico com unidades de medida em kgfm e lbfpe. Para este trabalho, foi adotado a unidade de medida de Nm para quantificar o torque aplicado. Logo, inicialmente os torques aplicados foram medidos em kgfm e, então, convertidos para Nm através da equação abaixo:

$$N.m = kgfm * 9,8067 \quad (3)$$

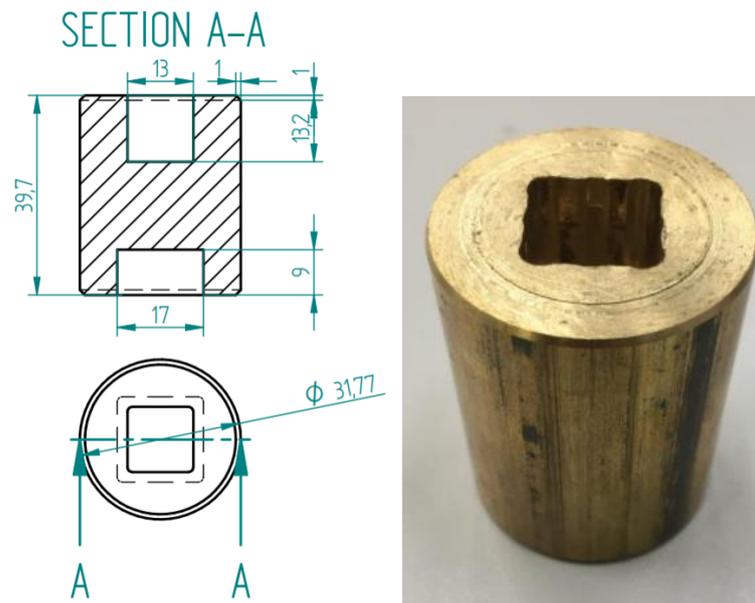
Figura 10: Relógio analógico torquímetro GEDORE



Fonte: Próprio autor

Para conectar o torquímetro ao bujão TUPY, foi confeccionado um adaptador a partir de barra de latão que foi usinada utilizando uma fresadora universal. Os ensaios foram realizados fixando o registro em uma morsa, onde o torque foi aplicado sobre o bujão TUPY para rosquear nos registros.

Figura 11: Adaptador torquímetro



Fonte: Próprio autor

Figura 12: Ensaio de torque



Fonte: Próprio autor

Para as amostras de registros que apresentaram trincas após os ensaios, foi utilizado um microscópio estereoscópio para retirar fotos ampliadas das trincas.

## 4.2 Caracterização do material

Para o registro de latão fundido, realizou-se a caracterização do material em duas amostras, através da análise de composição da liga, análise metalográfica e análise de microdureza. A análise de composição da liga foi feita utilizando um Espectrômetro de emissão óptica SPECTROMAXx.

Figura 13: Espectrômetro de emissão óptica SPECTROMAXx



Fonte: Próprio autor

Já, a análise metalográfica foi realizada utilizando um microscópio ótico (Figura 14) com ampliação de 50x. Primeiramente as amostras foram lixadas com as lixas de granulometria 80, 220, 600 e 2000 e posteriormente polidas utilizando uma politriz da marca AROTEC (Figura 15). Em seguida realizou-se o ataque químico com Dicromato de Potássio por 15 segundos (Figura 16).

Figura 14: Microscópio Ótico



Fonte: Próprio autor

Figura 15: Politriz AROTEC



Fonte: Próprio autor

Figura 16: Dicromato de Potássio



Fonte: Próprio autor

Por fim, a análise microdureza foi executada utilizando o aparelho FUTURE TECH FM800, com uma carga aplicada de 1 kgf durante 15 segundos.

Figura 17: Aparelho FUTURE TECH FM800



Fonte: Próprio autor

### 4.3 Delineamento de experimento

Para o delineamento de experimento fatorial  $2^k$ , foram definidos os fatores independentes e seus respectivos níveis conforme Tabela 4.

Tabela 4: Fatores para o planejamento de experimento  $2^3$

Fator 1	<b>Quantidade de veda rosca</b>	
	Nível (-1)	Nível (+1)
	(0,4m)	(1,2m)
Fator 2	<b>Torque</b>	
	Nível (-1)	Nível (+1)
	Normativo	Até trincar
Fator 3	<b>Centralização de usinagem</b>	
	Nível (-1)	Nível (+1)
	Concêntrico	Descentralizado

Fonte: Próprio autor

O fator 1, quantidade de veda rosca, foi definido como nível menor 0,4m de comprimento, para envolver a rosca do bujão TUPY, devido à recomendação

CPVC Amanco, que recomenda a quantidade ideal de veda rosca para instalação de registros com conexões roscáveis (Figura 18). Já, o nível superior foi considerado 1,2m, ou seja, 3 vezes acima do recomendado, com o objetivo de verificar a influência do excesso de veda rosca sobre a resistência do registro de gaveta durante a instalação do bujão TUPY.

Figura 18: Recomendação do uso de veda rosca

DN ref. (pol)	Largura da fita (mm)	Comprimento (m)
1/2"	12	0,30
3/4"	12	0,40
1"	18	0,50
1 1/4"	18	0,90
1 1/2"	18	1,40
2"	18	2,00
2 1/2"	18	4,00
3"	18	5,00
4"	18	8,00

Fonte: <http://amancowavin.com.br/downloads>

Figura 19: Bujão TUPY com 0,4m de veda rosca



Fonte: Próprio autor

Figura 20: Bujão TUPY com 1,2m de veda rosca



Fonte: Próprio autor

Foi utilizado uma trena de 5m para medir o comprimento de veda rosca.

Figura 21: Medição do comprimento de veda rosca

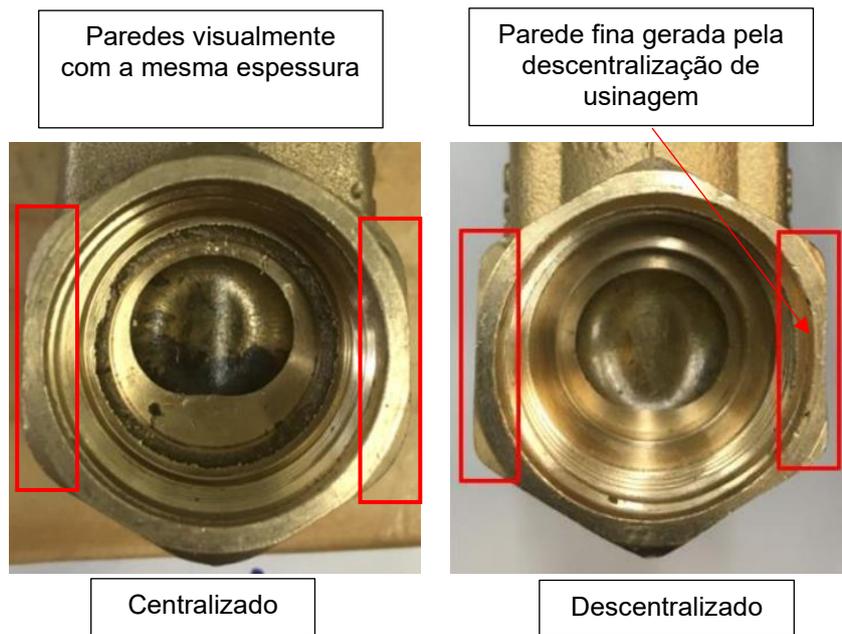


Fonte: Próprio autor

O fator 2, Torque, teve como nível menor o torque conforme norma (80Nm), com base no torque mínimo que o registro deve suportar conforme ABNT NBR 15705 (Tabela 1). Já, o nível superior foi definido como o torque que o registro aguenta até falhar. Ou seja, para o nível superior, o bujão TUPY foi rosqueado no registro de gaveta até que fosse observado a propagação de trincas, visto que este tipo de trinca se propaga de forma rápida e com alto ruído.

Por fim, o fator 3, Centralização de usinagem, se refere à uma característica qualitativa apresentada pelos registros de gaveta produzidos pela empresa em questão. Onde, estes registros apresentam padrões diferentes de usinagem em cada lado. Ou seja, de forma visual, é possível constatar que todos os registros apresentam em um dos lados uma usinagem da rosca centralizada com o sextavado do corpo, já no outro lado, a rosca apresenta descentralização em relação ao sextavado do corpo. Esta característica está relacionada ao processo de fabricação destes registros, que tende sempre a usinar os corpos dos registros com um lado mais centralizado que outro.

Figura 22: Centralização x Descentralização de usinagem das roscas



Fonte: Próprio autor

Logo, a partir da equação 1, é calculado a quantidade de experimentos necessários para um planejamento de experimento fatorial completo, com três fatores e dois níveis.

$$N^{\circ} \text{ Total de experimentos} = (N^{\circ} \text{ de níveis})^k \quad (4)$$

$k = \text{Quantidade de fatores}$

$$N^{\circ} \text{ Total de experimentos} = (2)^3 = 8 \text{ experimentos}$$

Foi utilizado o software MINITAB, que é uma ferramenta usada para análises estatísticas dentro das empresas, para verificar todos os experimentos possíveis para um planejamento de experimento de dois níveis.

Figura 23: Experimentos fatoriais possíveis

Criação de um Experimento Fatorial: Exibir Experimentos Disponíveis

Experimentos Fatoriais Disponíveis (com Resolução)

	Fatores													
Ensa	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Com	III												
8		Com	IV	III	III	III								
16			Com	V	IV	IV	IV	III						
32				Com	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Com	VII	V	IV						
128						Com	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Resolução Disponível III Experimentos Plackett-Burman

Fatores	Ensaos	Fatores	Ensaos	Fatores	Ensaos
2-7	12,20,24,28,...,48	20-23	24,28,32,36,...,48	36-39	40,44,48
8-11	12,20,24,28,...,48	24-27	28,32,36,40,44,48	40-43	44,48
12-15	20,24,28,36,...,48	28-31	32,36,40,44,48	44-47	48
16-19	20,24,28,32,...,48	32-35	36,40,44,48		

Ajuda OK

Fonte: Próprio autor

Na Figura 23, as colunas representam os fatores para um delineamento de experimento  $2^k$  e as linhas representam a quantidade de ensaios possíveis.

Também, para cada ensaio, foi confeccionado uma réplica. Ou seja, no total foram executados 16 ensaios com 8 combinações diferentes possíveis. Todas as demais análises estatísticas foram feitas pelo software MINITAB. Com isso, abaixo é mostrado a ordem de execução de cada ensaio para cada combinação possível de fatores.

Tabela 5: Combinação de ensaios  $2^3$ 

Amostra	Comprimento de veda rosca (m)	Torque	Centralização de usinagem
1	0,4	Torque normativo	Centralizado
2	1,2	Torque normativo	Centralizado
3	0,4	Até trincar	Centralizado
4	1,2	Até trincar	Centralizado
5	0,4	Torque normativo	Descentralizado

6	1,2	Torque normativo	Descentralizado
7	0,4	Até trincar	Descentralizado
8	1,2	Até trincar	Descentralizado
9	0,4	Torque normativo	Centralizado
10	1,2	Torque normativo	Centralizado
11	0,4	Até trincar	Centralizado
12	1,2	Até trincar	Centralizado
13	0,4	Torque normativo	Descentralizado
14	1,2	Torque normativo	Descentralizado
15	0,4	Até trincar	Descentralizado
16	1,2	Até trincar	Descentralizado

Fonte: Próprio autor

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Resultados da caracterização do material

A Tabela 6 mostra a composição em percentual de peso da liga de latão fundido que compões as amostras de registros.

Tabela 6: Análise de composição da liga

Elemento	%	Elemento	%
Cu	59,3	Cu	59,3
Zn	37,55	Zn	37,67
Pb	1,69	Pb	1,66
Al	0,66	Al	0,58
Sn	0,29	Sn	0,285
Fe	0,227	Fe	0,245
Ni	0,122	Ni	0,12
Co	0,031	Co	0,032
Se	0,02	Se	0,02
Sb	0,019	Sb	0,019

C	0,017	Si	0,018
Si	0,016	C	0,017
Mn	0,015	Mn	0,015
P	0,011	Mg	0,013
Cr	0,0069	P	0,01
Mg	0,0068	Cr	0,0072
As	0,0055	As	0,0052
Ti	0,0012	Ti	0,0012
B	0,0007	B	0,0007
Bi	<0,0005	S	<0,003
S	<0,0003	Bi	<0,0005
Be	<0,0001	Be	<0,0001

Fonte: Próprio autor

De acordo com a norma ABNT NBR 6941:2015, esta liga pode ser classificada como tipo 2, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Especificação normativa para composição de ligas de cobre

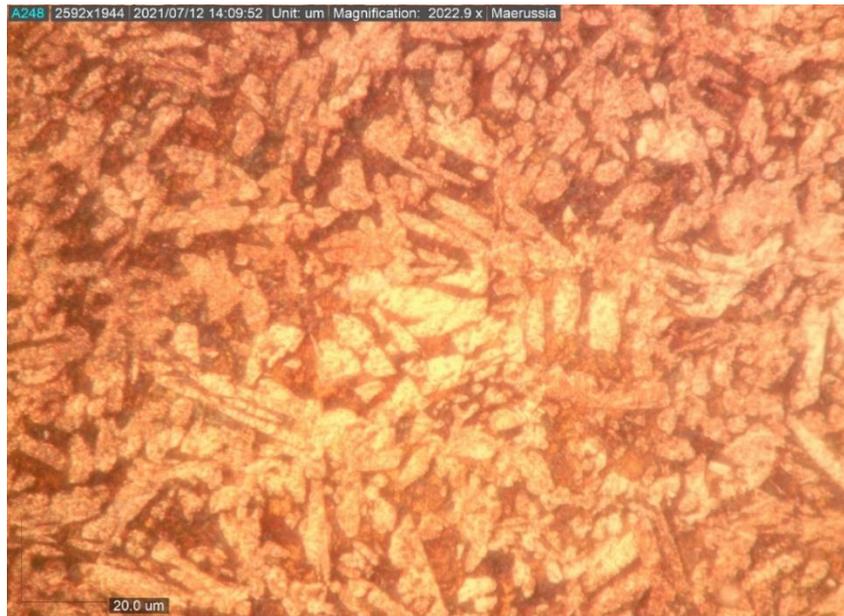
Elementos químicos %		Liga 1	Liga 2	Liga 3
Cu	mín.	58,0	58,0	61,0
	máx.	62,0	62,0	64,0
Al	mín.	0,2	0,2	0,3
	máx.	0,5	0,5	1,0
Pb	máx.	0,5	2,2	2,5
Sn	máx.	0,4	0,4	1,0
Ni	máx.	0,5	0,5	0,5
Mn	máx.	0,4	0,7	0,7
Fe	máx.	0,5	0,5	0,8
Si	máx.	0,1	0,1	0,1
P	máx.	0,02	0,02	0,0
As	máx.	0,08	0,08	0,1
Sb	máx.	0,05	0,05	0,1
Impurezas (exceto Pb, Ni)	máx.	1,0	1,8	2,0

Zn	máx.	Restante	Restante	Restante
----	------	----------	----------	----------

Fonte: NBR 6941 – Tabela 1

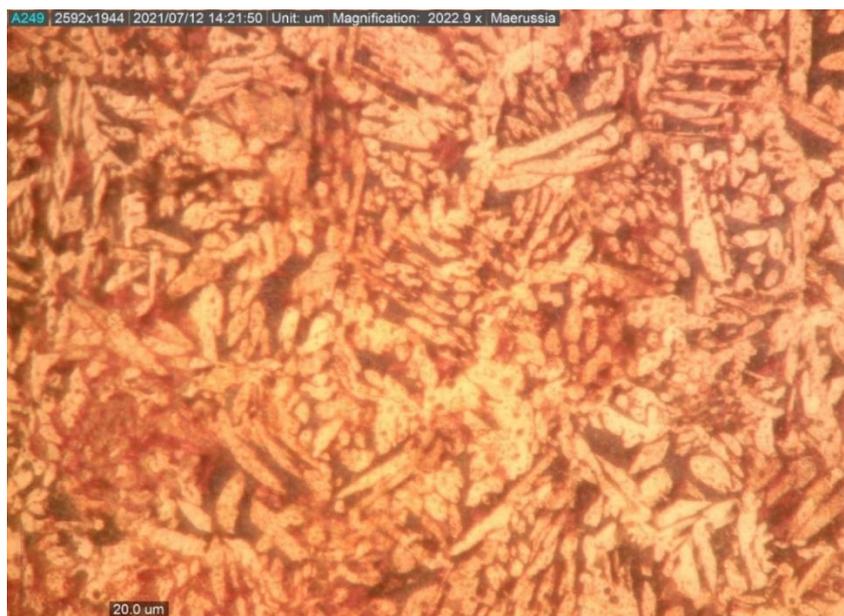
As Figura 24 e Figura 25 mostram a microestrutura da liga com ampliação de 50 vezes. Podemos destacar duas fases,  $\alpha$ : rica em cobre, parte amarelada clara. Fase  $\beta$ : Composto intermetálico de zinco e cobre, parte escura.

Figura 24: Microestrutura Amostra (a)



Fonte: Próprio autor

Figura 25: Microestrutura Amostra (b)



Fonte: Próprio autor

Já os resultados da análise de microdureza, estão dispostos na Tabela 8. As medições foram realizadas em uma única amostra, visto que não se espera grande diferença de dureza entre os corpos de prova, já que todos são provenientes da mesma matéria prima e processo de fabricação. Também, as medições foram tomadas de forma aleatória. A medição foi feita sobre as fases  $\alpha$  e  $\beta$ .

Tabela 8: Resultados da análise de micro dureza

	Dureza (HV)
Medição 1	210,9
Medição 2	214,7
Medição 3	189,3
Medição 4	222,7
Medição 5	212,5
Média	210,02
Desvio padrão	12,44

Fonte: Próprio autor

## 5.2 Resultados do delineamento de experimento

Após serem realizados os 16 ensaios mostrados na Tabela 5, os torques resultantes foram coletados a partir do torquímetro GEDORE e dispostos abaixo:

Tabela 9: Resultado do Delineamento de experimento 2<sup>3</sup>

Amostra	Comprimento de veda rosca (m)	Torque	Centralização de usinagem	Torque resultante (Nm)
1	0,4	Torque normativo	Centralizado	80
2	1,2	Torque normativo	Centralizado	80
3	0,4	Até trincar	Centralizado	150
4	1,2	Até trincar	Centralizado	190
5	0,4	Torque normativo	Descentralizado	80

6	1,2	Torque normativo	Descentralizado	80
7	0,4	Até trincar	Descentralizado	220
8	1,2	Até trincar	Descentralizado	150
9	0,4	Torque normativo	Centralizado	80
10	1,2	Torque normativo	Centralizado	80
11	0,4	Até trincar	Centralizado	230
12	1,2	Até trincar	Centralizado	220
13	0,4	Torque normativo	Descentralizado	80
14	1,2	Torque normativo	Descentralizado	80
15	0,4	Até trincar	Descentralizado	150
16	1,2	Até trincar	Descentralizado	170

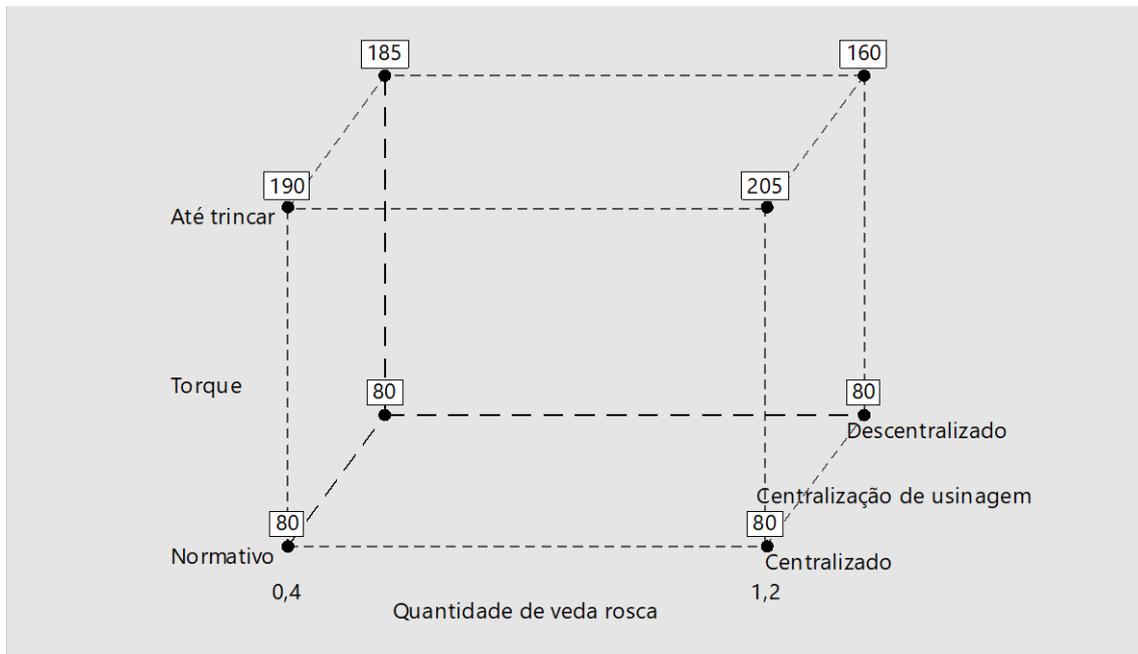
Fonte: Próprio autor

Os valores coletados estão relacionados ao fator torque, isto é, o nível menor deste fator (Torque normativo) é definido como 80 Nm. Portanto, este é o valor do torque resultante do ensaio, que mostra que o registro atende aos requisitos normativos de instalação, sem apresentar falhas.

Todavia, os torques resultantes que são superiores à 80 Nm, estão relacionados com o nível maior do fator torque. Ou seja, são os torques que os registros suportaram até que ocorresse a falha.

Assim, a Figura 26 mostra a relação entre os fatores e as respostas através de um gráfico de cubo, onde os torques são representados pelas médias dos dados.

Figura 26: Gráfico de cubo (média de dados) para o torque suportado



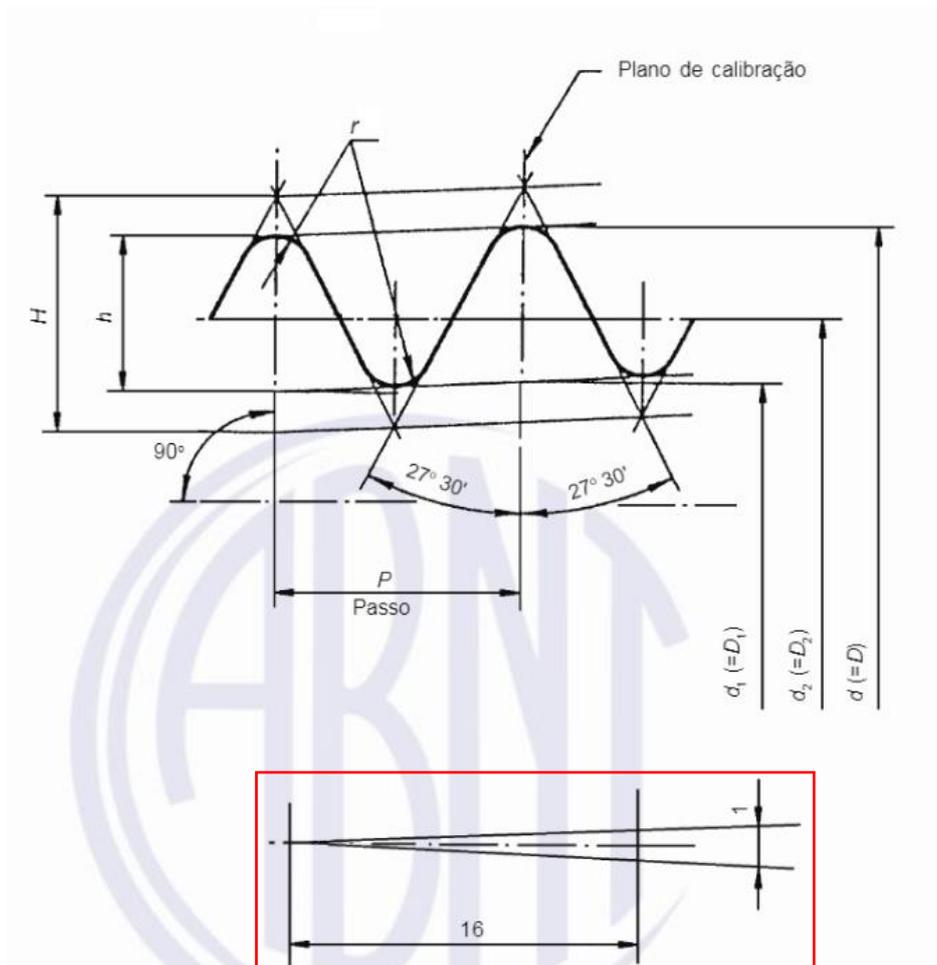
Fonte: Próprio autor

A partir desta figura, pode-se verificar que a falha com menor torque suportado, ocorre utilizando a combinação de 1,2 metros de veda rosca e usinagem descentralizada. Por outro lado, o máximo torque suportado, tende a ocorrer a partir dos fatores 1,2 metros de veda rosca e usinagem centralizada.

Entretanto, era esperado que o máximo torque suportado seria a partir do uso de 0,4 metros de veda rosca, pois quanto menos veda rosca utilizada para envolver a rosca do bujão TUPY, menor seria o acréscimo de dimensões no diâmetro da conexão. Portanto, menor deveriam ser as tensões na direção radial do corpo do registro.

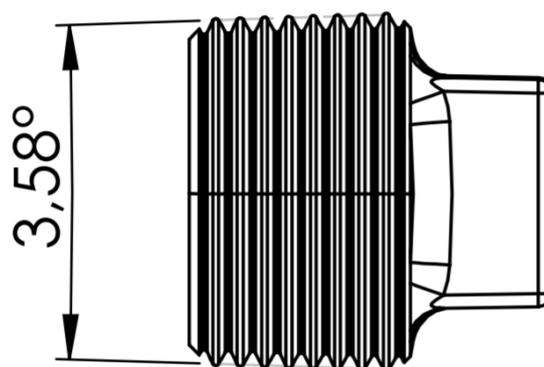
Ou seja, os bujões TUPY têm rosca cônica de acordo com a norma NBR ABNT ISO 7-1:2000, portanto, apresentam geometria cônica com angulação 1:16 (3,58°).

Figura 27: Rosca cônica ISO 7-1:2000



Fonte: NBR ISO 7-1:2000

Figura 28: Bujão TUPY (Rosca cônica com ângulo 1:16)

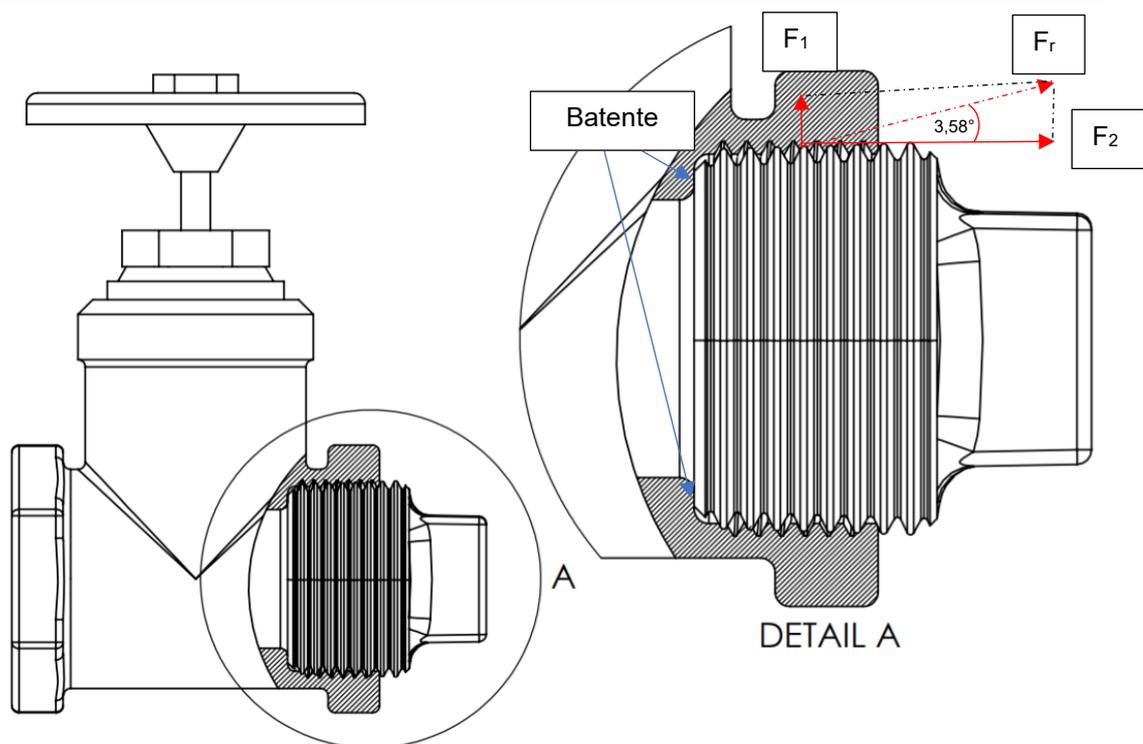


Fonte: Próprio autor

Logo, quando rosqueados os bujões TUPY nos registros de gaveta, que possuem rosca paralela, dois vetores força e o vetor resultante são ressaltados, conforme Figura 29 (Vetores não representados em escala). Onde a força  $F_2$  é

proveniente do batente que há no fim do comprimento de rosca do registro e tende a tracionar o sextavado do registro. A força  $F_1$  é relacionada ao ângulo de inclinação da rosca TUPY que tende a exercer a tensão na direção radial do corpo do registro.  $F_r$  é a força resultante entre  $F_1$  e  $F_2$ .

Figura 29: Diagrama de forças



Fonte: Próprio autor

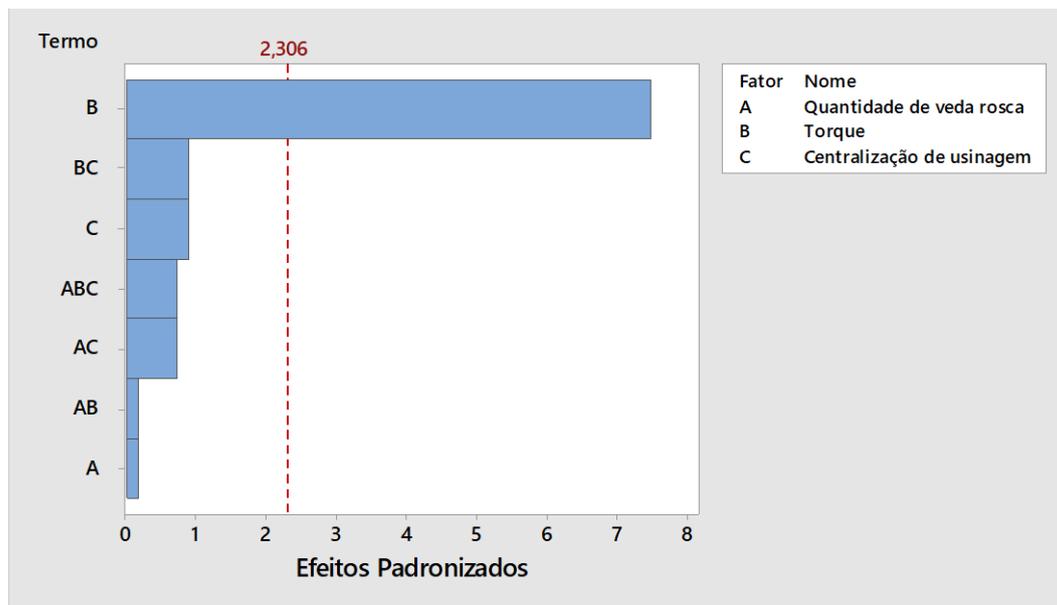
Com isso, ao acrescentar veda rosca ao conjunto, o diâmetro do perfil cone da rosca TUPY é aumentado e a força  $F_1$  é intensificada. Logo, era esperado que quando utilizado 1,2 metros de veda rosca o registro apresentaria a falha com menor valor de torque do que quando utilizado 0,4 metros. Entretanto, como mostrado no gráfico de cubo da Figura 26, para a usinagem centralizada, a quantidade de veda rosca em menor intensidade faz com que o registro apresente a falha mais facilmente.

Já para os casos com a usinagem descentralizada, os resultados dos torques foram conforme esperados, onde a descentralização gera uma fragilização do sistema devido à parede mais fina, conforme mostrado na Figura 22, e com isso, ao utilizar maior quantidade de veda rosca, o registro tende a fraturar com torque menor do que quando utilizado menor quantidade de veda

rosca. Também, os ensaios com usinagem descentralizada mostram que as amostras falham mais facilmente do que quando a usinagem está centralizada.

Ainda, através do MINITAB, foi plotado o gráfico de Pareto (Figura 30) com intervalo de confiabilidade de 95%.

Figura 30: Gráfico de Pareto do Efeitos Padronizados



Fonte: Próprio autor

Pode-se observar que o fator com maior significância sobre os resultados é o fator Torque (B), pois é o que mais se estende. Em seguida tem-se a centralização de usinagem (C) juntamente com sua interação (BC). Após, as interações ABC, AC e AB, com menos influência sobre os resultados e por fim o comprimento de veda rosca (A), que apresentou menor significância. A veda rosca tem pouca influência sobre a falha do registro quando a usinagem está centralizada, esta menor influência da fita veda rosca é reafirmada pelo gráfico de cubo da Figura 26, como mostrado anteriormente.

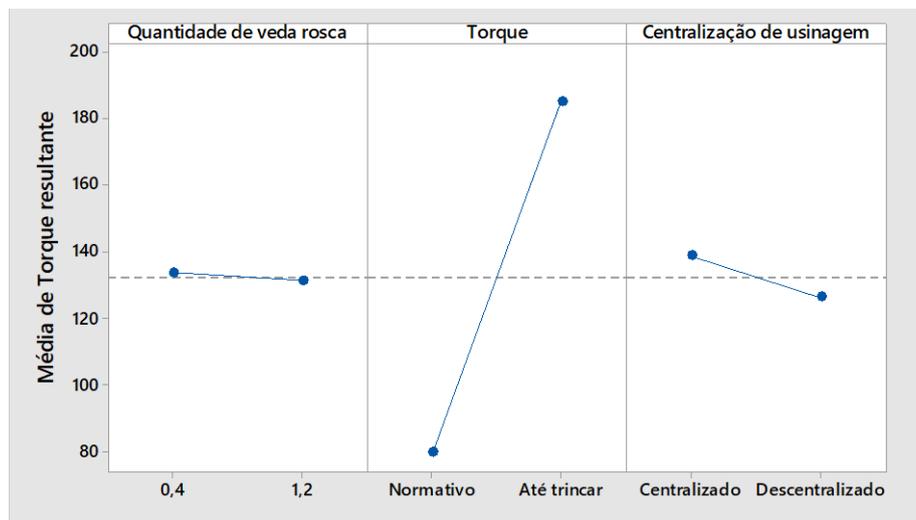
Também, o fator Torque é o único que ultrapassa a linha de Lenth para o intervalo de confiabilidade de 95%, ou seja, possui significância relevante sobre os resultados. Essa influência era esperada, visto que os ensaios foram conduzidos de forma que os níveis menor e maior do fator torque (Torque normativo e Até trincar) estão diretamente relacionados com a resposta torque.

Essa relação fica evidente através da Figura 31, onde são mostrados os efeitos principais sobre a média de torque suportado. Pode-se verificar que

dentre os fatores, o fator Torque é o que tem maior impacto sobre a média dos valores repostas, quando variado entre os níveis menor e maior.

Já o comprimento de veda rosca e centralização de usinagem apresentam menor influência.

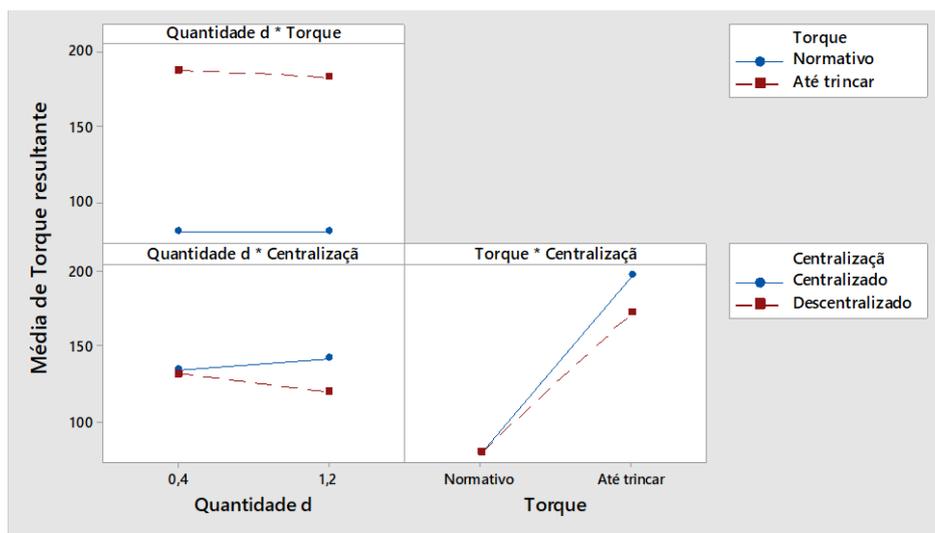
Figura 31: Gráfico de Efeitos Principais para Torque suportado



Fonte: Próprio autor

Também, o gráfico da Figura 32 mostra a interação entre os fatores ensaiados.

Figura 32: Gráfico de Interação para Torque suportado



Fonte: Próprio autor

Para a relação entre comprimento de veda rosca e torque, não há

interação, pois, quando se aumenta a quantidade de veda rosca e é aplicado o menor nível do fator torque (80 Nm), o resultado se mantém o mesmo, o registro não apresenta falha e o torque resultante é de 80 Nm.

Já o comprimento de veda rosca com a centralização de usinagem, mostra que quando a usinagem está centralizada o torque resultante tende a ser maior, mesmo aumentando a quantidade de veda rosca. Entretanto, quando a usinagem está descentralizada, a veda rosca influencia à ruptura com menores valores de torque. Assim, o gráfico entre torque aplicado e centralização de usinagem também deixa claro que a usinagem descentralizada causa a ruptura com menores valores de torque resultante e a usinagem centralizada faz com que o registro suporte maiores valores.

Por fim, a partir dos dados obtidos pelo delineamento de experimento, foi possível gerar a equação de regressão linear dos resultados, utilizando o software MINITAB.

$$T = 135 - 3,1.x + 55.y + 3,7.z - 3,1.x.y - 12,5.x.z + 3,8.y.z - 12,5.x.y.z \quad (5)$$

Onde:

T: Torque previsto para a quebra do registro (Nm)

x: Fator comprimento de veda rosca (m)

y: Fator trinca (-1 ou +1)

z: Fator centralização de usinagem (-1 ou +1)

Assim, para se verificar a assertividade da equação de regressão, foram realizados mais quatro ensaios ( $2^2$ ), todos até trincar o registro, porém foram definidos novos valores para as quantidades de veda rosca. Este segundo DOE fatorial também apresenta como variável resposta o torque suportado até a falha dos registros.

Tabela 10: Fatores para o planejamento de experimento 2<sup>2</sup>

Fator 1	<b>Quantidade de veda rosca</b>	
	Nível (-1)	Nível (+1)
	(0,8m)	(1m)
Fator 2	<b>Centralização de usinagem</b>	
	Nível (-1)	Nível (+1)
	Concêntrico	Descentralizado

Fonte: Próprio autor

Portanto, a Tabela 11 mostra as combinações possíveis para o segundo delineamento de experimento.

Tabela 11: Combinação de ensaios 2<sup>2</sup>

Amostra	Comprimento de veda rosca (m)	Centralização de usinagem
1	0,8	Centralizado
2	0,8	Descentralizado
3	1	Centralizado
4	1	Descentralizado

Fonte: Próprio autor

Após serem realizados estes novos ensaios, os valores de torque suportados pelos registros foram coletados e dispostos na Figura 13, juntamente com os valores de torques previstos a partir da equação de regressão.

Tabela 12: Resultado do Delineamento de experimento 2<sup>2</sup>

Amostra	Torque suportado (N.m)	Torque a partir da equação de regressão (N.m)	Erro (%)
1	180	197,5	10%
2	160	172,5	8%

3	220	201,25	9%
4	130	166,25	28%

Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos para as amostras 1, 2 e 3, foram considerados satisfatórios, pois o erro percentual entre o valor real e o previsto pela equação de regressão, foram de 10%, 8% e 9%, respectivamente. Já para a amostra 4, o erro percentual foi o maior dentre as outras (28%), onde o registro apresentou a falha com valor de torque muito menor que o previsto.

Entretanto, considerou-se que a equação de regressão representa uma boa aproximação do mecanismo de quebra dos registros para o intervalo de estudo em questão. Para se obter menores erros percentuais entre o valor previsto e o real, do torque, seria necessário realizar mais ensaios para alimentar a base de dados do delineamento de experimento 2<sup>3</sup>. Ou ainda, realizar um novo estudo, considerando mais fatores e mais níveis para o delineamento de experimento, porém, o custo envolvido nos ensaios aumentaria, bem como o tempo necessário para se realizar todas as análises.

### 5.3 Análise das trincas das amostras

Após serem realizados os ensaios, os registros que apresentaram falha foram analisados com um estereoscópio digital. Todas as amostras apresentaram o padrão de trinca conforme a Figura 33. É possível identificar que as trincas são originadas pela força de tração que o bujão TUPY exerce sobre o corpo do registro, conforme mostrado na Figura 29, existe um batente no fim de curso da rosca que gera uma força de tração quando o registro TUPY é rosqueado.

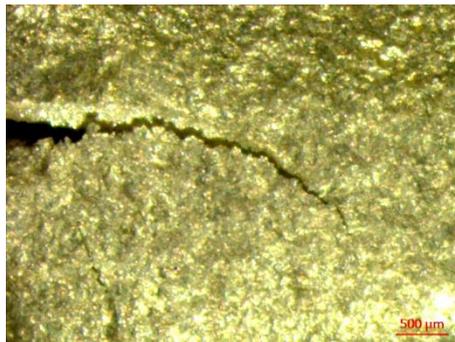
Figura 33: Trinca (Amostra 3)



Fonte: Próprio autor

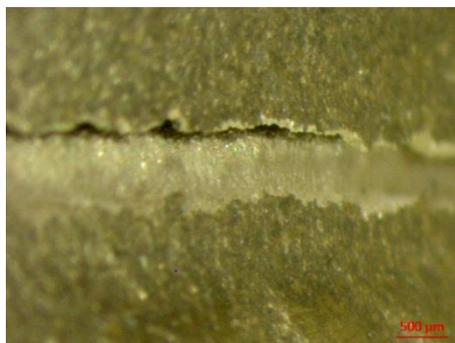
As figuras abaixo mostram imagens da trinca ampliada através do estereoscópio. O registro apresentou trinca de forma repentina e com rápida propagação.

Figura 34: Trinca (Amostra 3) (a)



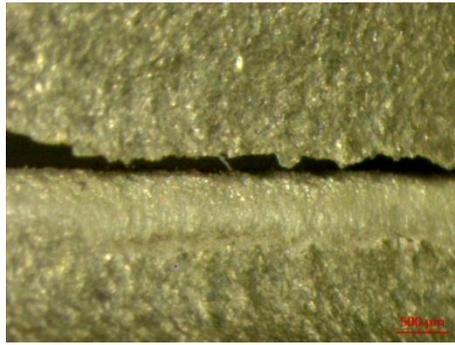
Fonte: Próprio autor

Figura 35: Trinca (Amostra 3) (b)



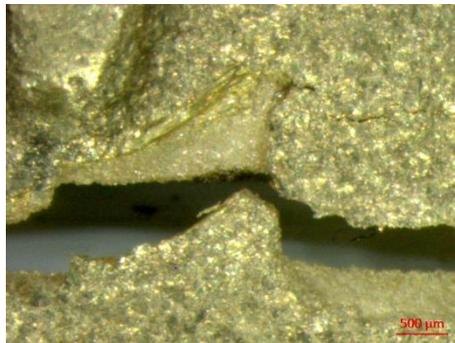
Fonte: Próprio autor

Figura 36: Trinca (Amostra 3) (c)



Fonte: Próprio autor

Figura 37: Trinca (Amostra 3) (d)



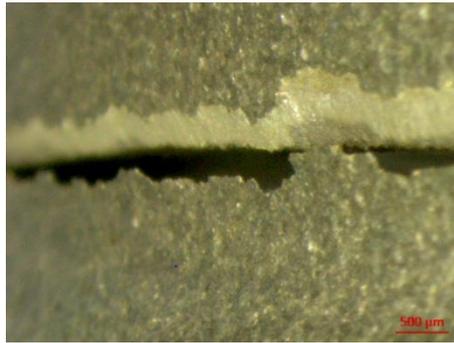
Fonte: Próprio autor

Figura 38: Trinca (Amostra 3) (e)



Fonte: Próprio autor

Figura 39: Trinca (Amostra 3) (f)



Fonte: Próprio autor

Figura 40: Trinca (Amostra 3) (g)



Fonte: Próprio autor

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que a metodologia DOE fatorial possui diversas aplicações, quando se tem como objetivo o estudo de qualquer fenômeno relacionado a variáveis independentes que variam em mais de um nível, sejam eles qualitativos ou quantitativos.

Neste trabalho, o estudo fatorial apresentou resultados significativos para o objetivo em questão, fratura em registros de gaveta durante a instalação, pois mostrou que nem sempre a variável quantidade de veda rosca impacta na diminuição da resistência mecânica das amostras, ou seja, possui pouca influência quando a usinagem do registro está centralizada. Porém, quando a usinagem está descentralizada, a resistência ao torque de instalação diminui de forma considerável, o que destaca o fato da parede fina, que é gerada pela variação do processo de fabricação, ser um fator sensível à resistência do registro. Ainda, foi possível concluir que a utilização de veda rosca sobre a parede fina, apresenta influência no torque máximo suportado pelas amostras.

Também, a partir da base de dados gerada pelo delineamento de experimento, foi possível gerar a equação de regressão linear para prever resultados do torque de rompimento dos registros.

A equação de regressão mostrou resultados muito próximos dos valores reais, porém, com exceção de uma amostra ter rompido com valor muito menor que o previsto pela equação, apresentado um erro de 28%. Considerou-se esta última como sendo uma exceção ao estudo, pois nenhuma amostra do DOE 2<sup>3</sup> havia apresentado uma quebra com valor de torque tão baixo.

Também, o segundo estudo DOE (2<sup>2</sup>), foi realizado sem réplicas das amostras, ou seja, para a amostra que apresentou um erro de 28%, se houvesse uma duplicata, poderia ter apresentado um valor mais coerente com o restante do estudo, devido a que, provavelmente, o registro apresentou ruptura com valor de torque muito baixo por apresentar algum tipo de falha que atuou como concentrador de tensões e fragilizou o sistema.

Mais ensaios e o acréscimo de fatores, como variação dimensional do corpo do registro de gaveta ou do bujão TUPY, poderiam agregar mais assertividade à equação de regressão, a qual aproximaria de forma mais precisa os valores de predição de torque com os valores reais de torque.

Por fim, atingiu-se os objetivos deste estudo, onde era esperado recriar a ruptura de registros de gaveta durante a instalação e estudar seus mecanismos de falhas de forma a replicá-los para entender os fenômenos envolvidos. E com isso, prever de forma satisfatória valores de torque de ruptura a partir da equação de regressão.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 7-1:2000**: Rosca para tubos onde a junta de vedação sob pressão é feita pela rosca Parte 1: Dimensões, tolerâncias e designação. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15705**: Instalações hidráulicas prediais - Registro de gaveta - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6941**: Peças de ligas de cobre fundidas em coquilhas - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ALMEIDA, M. O. Q. DE. **Avaliação das Influências de Variáveis Composicionais na Formulação de Óleos Lubrificantes Industriais Usando Design de Experimentos**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

BALDAM, R. D. L. E. A. V. **FUNDIÇÃO: PROCESSOS E TECNOLOGIAS CORRELATADAS**. 2. ed. São Paulo: ÉRICA, 2014.

BURAGOHAIN, M.; MAHANTA, C. A novel approach for ANFIS modelling based on full factorial design. **Applied Soft Computing Journal**, Guwahati, v. 8, n. 1, p. 609–625, 2008.

CALEGARE, Á. J. DE A. **INTRODUÇÃO AO DELINIAMENTO DE EXPERIMENTOS**. 2º ed. São Paulo: Blucher, 2015.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

CARLOS, P. et al. Obtenção de seqüências de experimentos fatoriais 2k-p de menor custo aplicando métodos de programação matemática. **Revista GEPROS**, v. 1, n. 1, p. 133, 2009.

CHOUDHURY, I. A.; EL-BARADIE, M. A. Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 67, n. 1–3, p. 55–61, 1997.

DOUGLAS C. MONTGOMERY E GEORGE C. RUNGER. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4. ed. [s.l.] LTC, 2009.

FISHER, R. A. **Introduction to " The Arrangement of Field Experiments "** **Introduction to " The Arrangement of Field Experiments "**. California: Universidade da California, 1990. p. 83–94.

JURAN, J.; GODFREY, A. **JURAN'S QUALITY HANDBOOK**. 5. ed. Nova York: McGraw Hill, 1998.

MATESO, V. **Análise Da Solidificação Para O Projeto De Molde E a Relação Com As Propriedades Mecânicas Na Fundição Da Liga De Latão 60/40.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MOREIRA, P. C. DA R. **Desenvolvimento de Ligas de Latão de Baixo Teor de Chumbo.** Tese de Mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

OPRIME, P. C.; PUREZA, V. M. M.; OLIVEIRA, S. C. DE. Sequenciamento sistemático de experimentos fatoriais como alternativa à ordem aleatória. **Gestão & Produção**, v. 24, n. 1, p. 108–122, 2017.

REIS, D. A. F. DOS. **SEIS SIGMA: UM ESTUDO APLICADO AO SETOR ELETRÔNICO.** Dissertação de Mestrado - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2003.

SALES, M. Diagrama de pareto. **Ealde Business School**, p. 1–8, 2012.

SILVA, M. R. DA. **Estudo Do Efeito Da Fase B Na Usinabilidade De Ligas De Latão Livres De Chumbo.** Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

TÜRKMEN, İ.; YALAMAÇ, E. Growth of the Fe<sub>2</sub>B layer on SAE 1020 steel employed a boron source of H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> during the powder-pack boriding method. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 744, p. 658–666, 2018.