



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Marco Antônio Figueirôa da Silva Cabral

**Uma metodologia para avaliação de integridade de dutos corroídos baseada
em banco de dados**

Recife
2023

Marco Antônio Figueirôa da Silva Cabral

**Uma metodologia para avaliação de integridade de dutos corroídos baseada
em banco de dados**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Simulação e Gerenciamento de Reservatórios de Petróleo.

Orientador: Ramiro Brito Willmersdorf

Coorientadora: Silvana Maria Bastos Afonso

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

C117m Cabral, Marco Antônio Figueirôa da Silva.
Uma metodologia para avaliação de integridade de dutos corroídos baseada em banco de dados / Marco Antônio Figueirôa da Silva Cabral. 2023.
71 f: il.

Orientador: Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf.
Coorientadora: Profa. Dra. Silvana Maria Bastos Afonso.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2023.
Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Dutos corroídos. 3. Banco de dados remoto. 4. API. 5. Metamodelos. 6. Método dos elementos finitos. I. Willmersdorf, Ramiro Brito (Orientador). II. Afonso, Silvana Maria Bastos (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 40

Marco Antônio Figueirôa da Silva Cabral

Uma metodologia para avaliação de integridade de dutos corroídos baseada em banco de dados

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Simulação e Gerenciamento de Reservatórios de Petróleo.

Aprovado em 13 de Fevereiro de 2023

Orientador: Ramiro Brito Willmersdorf

Coorientadora: Silvana Maria Bastos Afonso

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof. Dr. Renato de Siqueira Motta (examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa (examinador externo)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. José Maria Andrade Barbosa (examinador externo)

Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, principalmente e imensamente, à Stella, minha mãe, Nilo, meu pai, e João Paulo e Nilo Henrique, meus irmãos, que sempre me deram apoio. Ao meu tio Jaime Joaquim pelo incentivo de iniciar na área de pesquisa. A Jessica, minha namorada, pelo suporte nessa fase final da escrita.

Agradeço ao professor Ramiro Willmersdorf e à professora Silvana Bastos por todos esses anos me ajudando e guiando na pesquisa e por terem me trazido a este projeto. Aos amigos da UFPE, Adriano, Jefferson, Júlio, Léo, Paulo, Renato e Rodolfo, que sempre se dispuseram a discutir e chegar a uma solução aos problemas apresentados, além de transmitirem conhecimento.

Meu agradecimento a todos que de alguma maneira contribuíram na conclusão deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Shut up legs! Do what I tell you to do!”

(Jens Voigt)

RESUMO

Dutos são um dos meios mais seguros e econômicos para o transporte de grandes quantidades de óleo e gás, o que faz das dutovias de grande importância para a indústria. Corrosão está entre as principais causas de vazamentos em dutos. Dentre as formas de avaliação de integridade estão os métodos semi-empíricos, que possuem um baixo custo computacional mas tem resultados conservadores, os métodos numéricos, que fornecem resultados próximos aos experimentais mas possuem um alto custo, computacional e de mão-de-obra qualificada. Como uma opção a esses métodos existem os metamodelos, que oferecem um baixo custo de avaliação e resultados próximos aos obtidos experimentalmente. Um dos problemas encontrados para a criação de metamodelos é a escassez de dados de qualidade, como resultados de análises de elementos finitos e testes experimentais. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de uma tecnologia de previsão de pressão de falha em dutos corroídos baseada em resultados de simulações numéricas armazenadas em um banco de dados. Foi definido um conjunto de modelos, com um defeito idealizado, simples, dimensões e curva do material. Foi utilizada análise de elementos finitos para avaliar os modelos e os resultados das análises, junto com os dados dos modelos, foram armazenados em um banco de dados. Tal banco pode ser acessado de maneira remota através de uma API. Esses dados podem ser utilizados para estimar a pressão de falha de novos modelos cujas dimensões estejam dentro do intervalo das variáveis de projeto. Os modelos de elementos finitos foram validados com resultados experimentais presentes na literatura. Os dados presentes no sistema foram utilizados para a geração de metamodelos e os resultados da predição da pressão de falha foram comparados com resultados obtidos através de análise de elementos finitos e métodos semi-empíricos. Além disso foram realizadas análises de confiabilidade, os resultados foram comparados com resultados obtidos através de normas e foi realizado um estudo da influência das variáveis de projeto para a determinação da pressão de falha. Os resultados obtidos através dos metamodelos são mais precisos do que os oriundos dos métodos semi-empíricos e menos custosos do que os obtidos através da simulação via elementos finitos.

Palavras-Chave: dutos corroídos; banco de Dados Remoto; API; metamodelos; método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Pipelines are one of the safest and cheapest means of transporting large amounts of oil and gas, making pipelines important to the industry. Corrosion is among the main causes of leaks in pipelines. This makes the structural integrity analysis of pipelines with corrosion defects of great importance for the industry. Among the forms of integrity evaluation are the semi-empirical methods, which have a low computational cost but have conservative results, and the numerical methods, which provide results close to the experimental ones but have a high computational and skilled labor cost. As an option to these methods, there are metamodels, which offer a low cost of evaluation and results close to those obtained experimentally. One problem in creating metamodels is the scarcity of quality data, such as finite element analysis results and experimental tests. In this context, the objective of this research is the development of a failure pressure prediction technology for corroded pipelines based on the results of numerical simulations stored in a database. A set of models was defined, with an idealized, simple, dimensions, and material curve. Finite element analysis was used to evaluate the models and the analysis results, along with model data, were stored in a database. Such a database can be accessed remotely through an API. These data can be used to estimate the failure pressure of new models that dimensions are within the range of design variables. The finite element models were validated with experimental results found in the literature. The data present in the system were used to generate metamodels and the failure pressure prediction results were compared with results obtained through finite element analysis and semi-empirical methods. Furthermore, reliability analyzes were carried out, the results were compared against results obtained through standards and a study was realized to determine the influence of design variables in the computation of failure pressure. The results obtained through metamodels are more precise than those derived from semi-empirical methods and less expensive than those using finite elements.

Keywords: corroded pipelines; remote database; API; metamodels; finite element method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comprimento, em setembro de 2019, da malha dutoviária de óleo e gás, por região.	13
Figura 2 – Gráfico de causas de incidentes significativos nos EUA.	14
Figura 3 – Arquitetura do sistema.	22
Figura 4 – Carregamentos aplicados ao duto.	24
Figura 5 – Esquemáticos de um defeito idealizado.	25
Figura 6 – Exemplo de uma mesma consulta feita com SQLAlchemy e com SQL.	29
Figura 7 – Exemplo de uma mensagem no formato JSON.	30
Figura 8 – Exemplo de consumo de dados através do JSON.	31
Figura 9 – Exemplo de uma tabela de um banco de dados relacional.	31
Figura 10 – DER conceitual.	32
Figura 11 – DER lógico.	34
Figura 12 – Fluxograma para geração do metamodelo.	36
Figura 13 – Exemplo de amostragem através do LHS.	38
Figura 14 – Representação dos domínios de falha e sucesso.	43
Figura 15 – Interferência entre variáveis aleatórias.	44
Figura 16 – Foto do defeito usinado IDTS8.	50
Figura 17 – Região do defeito de 1/4 do modelo de elementos finitos do espécime IDTS8.	50
Figura 18 – Curvas tensão verdadeira em função da deformação verdadeira dos espécimes testados.	51
Figura 19 – Comparação entre a pressão de falha calculada utilizando MEF e os preditores.	55
Figura 20 – Influência de cada variável na probabilidade de falha.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos semi-empíricos.	18
Tabela 2 – Sumário da notação para o DER conceitual.	33
Tabela 3 – Variáveis de projeto.	35
Tabela 4 – Principais funções básicas.	39
Tabela 5 – Dados de cada modelo.	50
Tabela 6 – Pressões de falha experimental e por elementos finitos	51
Tabela 7 – Comparativo dos tempos de execução de métodos semi-empíricos, modelos substitutos e método dos elementos finitos.	52
Tabela 8 – Comparação entre os valores de pressão de falha previstos pelos modelos de alta fidelidade e metamodelos de RBF.	54
Tabela 9 – Comparação entre os erros absolutos percentuais previstos pelos modelos de baixa fidelidade.	54
Tabela 10 – Comparativo dos erros obtidos através de métodos semi-empíricos e modelos substitutos.	56
Tabela 11 – Pressões de falha experimental e preditores (MPa)	57
Tabela 12 – Erro pressões de falha experimental e preditores (%)	57
Tabela 13 – Variáveis aleatórias e seus parâmetros usados no exemplo do duto com defeito de corrosão.	58
Tabela 14 – Comparativo dos resultados obtidos através de métodos semi-empíricos e modelos substitutos.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	13
1.2	MOTIVAÇÃO	14
1.3	OBJETIVOS	15
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	PREDIÇÃO DA PRESSÃO DE FALHA	17
2.1.1	Métodos semi-empíricos	18
2.1.2	Métodos numéricos	19
2.1.3	Metamodelos	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	23
3.1.1	Condição de parada	26
3.1.2	Automatização do processo de análise no cluster	26
3.2	API	27
3.3	BANCO DE DADOS	30
3.4	METAMODELOS	33
3.4.1	Plano de amostragem	36
3.4.2	Hipercubo Latino (LHS)	37
3.4.3	Técnicas de interpolação	38
3.4.3.1	Funções de base radial	38
3.4.3.2	Interpolação multilinear	40
4	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	42
4.1	CONFIABILIDADE ESTRUTURAL (C)	42
4.2	ESTADO LIMITE	42
4.3	EQUAÇÃO DE ESTADO LIMITE	42
4.4	MODELOS DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL	43
4.5	FORM	44
4.6	TRANSFORMAÇÃO PARA O ESPAÇO NORMAL	45
4.6.1	Transformação de Rosenblatt	45
4.7	CÁLCULO DAS COORDENADAS DO MPP	47
4.8	ALGORITMO HLRF-M	47
4.9	IMPLEMENTAÇÃO	48

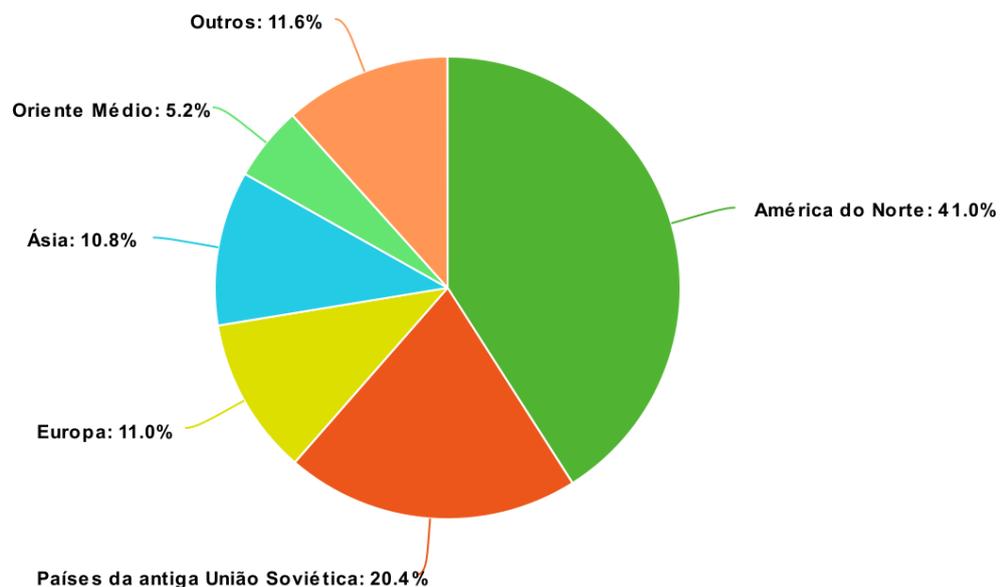
5	RESULTADOS	49
5.1	VALIDAÇÃO DA ANÁLISE VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	49
5.2	CONSTRUÇÃO DO SISTEMA	52
5.3	METAMODELOS	52
5.3.1	Estudo de convergência do modelo substituto via RBF	53
5.3.2	Validação dos metamodelos	54
5.4	APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
6.1	CONCLUSÕES	60
6.2	TRABALHOS FUTUROS	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Dutos são o meio mais seguro para o transporte de óleo e gás (KESHTEGAR; SEGHIER, 2018), além de possuir um baixo custo de barril/km (KESHTEGAR; SEGHIER, 2018) e produzir menos gases do efeito estufa do que outros meios (GLOBALDATA, 2022), sendo assim de suma importância para a indústria. Além disso, Segundo o BP statistical review of world energy em 2020 óleo e gás respondiam por 57% das fontes de energia primária no mundo (BRITISH-PETROLEUM, 2020). Em 2022 o comprimento total da malha dutoviária para óleo e gás é de 2,12 milhões de quilômetros e espera-se um crescimento de 4% até 2026, segundo a previsão da (GLOBALDATA, 2022), sendo que a maior concentração de dutos se encontra na América do Norte, que em 2019 era responsável por 41% da malha dutoviária mundial (GLOBALDATA, 2022). Na Figura 1 é apresentado a porcentagem da malha dutoviária por regiões do mundo.

Figura 1 – Comprimento, em setembro de 2019, da malha dutoviária de óleo e gás, por região.

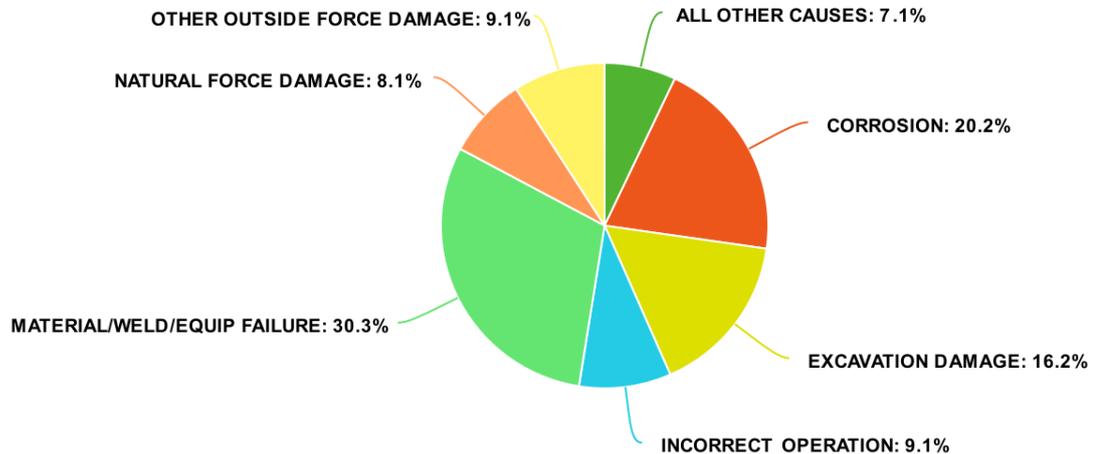


Fonte: <https://www.globaldata.com/store/report/oil-and-gas-pipelines-length-and-capital-expenditure-market-analysis/>.

Acidentes em dutos causam grandes perdas materiais, além dos danos ambientais e perdas de vidas. Na Figura 2, são apresentados os dados referentes a incidentes significativos com dutos nos últimos 20 anos nos Estados Unidos, coletados pelo PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration), que é a agência do governo estadunidense responsável pelo monitoramento de dutos, como é possível observar, corrosão ficou em segundo lugar (PHMSA, 2022). Nos últimos 20 anos, os custos totais decorrentes de

incidentes significativos com dutos somaram mais de 11 bilhões de dólares, além de 260 vidas perdidas e 1112 feridos (PHMSA, 2022).

Figura 2 – Gráfico de causas de incidentes significativos nos EUA.



Fonte: <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-20-year-trends>.

Como forma de reduzir o número de acidentes envolvendo dutos corroídos, faz-se, periodicamente, inspeções nas linhas de dutos. Para realizar essas inspeções pode-se usar o pig instrumentado, que é um equipamento que é inserido no duto e viaja ao longo da linha, capturando a localização dos defeitos, as dimensões dos defeitos, amassamentos, ovalização do duto, dentre outras informações. A grande vantagem do pig é possibilitar a investigação em toda a extensão do duto, o que seria inviável utilizando alguma outra técnica (CABRAL, 2007). Dentre os tipos de pigs mais utilizados para inspeção de defeitos, destacam-se o ultrassônico e o de fluxo magnético. O primeiro utiliza tecnologia de ultrassom para capturar a espessura remanescente do duto, o segundo cria um campo magnético ao longo do duto e verifica as variações das linhas de campo (CABRAL, 2007).

Existem várias maneiras de avaliar a integridade estrutural de um duto, dentre elas as normas, tais como BS 7910 (BRITISH-STANDARD, 2013), ASME B31G (ASME, 2009), DNV RP-F101 (DNV GL AS, 2017), dentre outras. Também há o método dos elementos finitos, onde se cria um modelo do duto com o defeito de corrosão e se faz uma simulação numérica para calcular qual é a pressão de falha do duto corroído. Além desses métodos, há os metamodelos, também conhecidos como modelos substitutos.

1.2 MOTIVAÇÃO

A malha dutoviária brasileira é de dezenas de milhares de quilômetros e evitar que haja acidentes é de interesse da indústria de óleo e gás, visto que um acidente pode

acarretar enorme prejuízo material, ambiental e de imagem para a empresa. Como visto na seção anterior, corrosão é uma das principais causas de acidentes em dutos.

Existem várias maneiras de calcular a pressão de falha de um duto corroído, de forma a evitar que a pressão interna de serviço ultrapasse essa pressão de falha e venha a causar um acidente ou programar uma intervenção de manutenção. Dentre elas estão simulações computacionais via o método dos elementos finitos e os métodos semi-empíricos, dentre outros. Métodos semi-empíricos são utilizados em algumas normas e possuem um baixo custo de execução, mas apresentam resultados conservadores, o que pode gerar despesas desnecessárias.

No caso de simulações computacionais via método dos elementos finitos há uma necessidade de uma infra-estrutura robusta para a execução das análises, além de mão de obra qualificada para a geração dos modelos e avaliação dos resultados obtidos, mas, em contrapartida, os resultados mais próximos, em geral, aos obtidos experimentalmente.

Como alternativa aos dois métodos previamente citados, têm-se os metamodelos, que são modelos analíticos simplificados que aproximam o comportamento de um dado sistema fazendo o mapeamento entre os dados de entrada e de saída. São muito utilizados quando se desconhece a relação entre os dados ou o cálculo é computacionalmente custoso, como no caso de análise de confiabilidade, otimização baseada em confiabilidade e em gêmeos digitais (*digital twins*) (BHOWMIK, 2019). Os metamodelos possuem baixo custo computacional para a determinação da pressão de falha e resultados próximos aos obtidos através do método dos elementos finitos.

Um dos maiores problemas para a criação dos metamodelos está na escassez de dados que abranjam um largo espectro de parâmetros geométricos de dutos e defeitos, variedade no tipo de aços dos quais os dutos são feitos e poucos resultados experimentais ou de métodos numéricos.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo final deste trabalho é o desenvolvimento de uma tecnologia de previsão de pressão de falha em dutos corroídos baseada em resultados de simulações numéricas armazenadas em um banco de dados. Os principais desenvolvimentos relacionados ao mesmo são:

- Geração e análise de modelos de elementos finitos de dutos com defeito de corrosão.
- Desenvolvimento de um banco de dados que contenha os resultados de análises via método dos elementos finitos de dutos com defeitos causados por corrosão.
- Desenvolvimento de uma interface web/API para acesso dos dados contidos no banco de dados.

- Criação de modelos substitutos usando como fonte os dados mantidos no banco de dados.
- Análise de confiabilidade utilizando os modelos substitutos.

Os programas computacionais desenvolvidos foram todos implementados em Python (ROSSUM, 2020). Para o desenvolvimento do sistema web será utilizado o microframework Flask (GRINBERG, 2018), para o sistema de persistência dos dados será utilizado o SQLAlchemy (BAYER, 2012). Para a análise dos modelos de elementos finitos será utilizado o software de código aberto code_aster (CODE-ASTER, 2019).

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 7 capítulos e uma bibliografia. Na presente seção são apresentadas algumas das características gerais dessa dissertação, além de descrever sua organização.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica de métodos de avaliação de pressão última de dutos com defeitos de corrosão.

No capítulo 3 são apresentadas as ferramentas que serão utilizadas ao longo deste trabalho, como análise via elementos finitos e metamodelos que farão uso dos dados contidos no banco de dados.

O capítulo 4 apresenta o método FORM, muito utilizado em análises de confiabilidade e que aqui será utilizado para apresentar uma aplicação prática do sistema.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos através de metamodelos que utilizaram o banco de dados aqui desenvolvido. Esses metamodelos também foram utilizados para a análise de confiabilidade.

Finalizando, no capítulo 6 são feitas algumas conclusões e observações referentes à ferramenta criada e aos resultados obtidos, mostrando também algumas sugestões para trabalhos que poderão ser realizados futuramente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a avaliação de integridade estrutural de dutos existem muitos métodos publicados na literatura, dentre eles os métodos analíticos, ou semi-empíricos, o método dos elementos finitos e os metamodelos.

2.1 PREDIÇÃO DA PRESSÃO DE FALHA

A inspeção via pig gera um relatório que contém os dados de anomalias encontradas no duto, por exemplo amassamento, ovalização e defeitos de corrosão. No caso dos defeitos de corrosão têm-se as dimensões e localização para cada um deles. Esses dados precisam ser avaliados para definir se é seguro que o duto continue em funcionamento. Existem várias formas de avaliação, dentre elas, as normas, métodos numéricos e metamodelos.

Cosham e Hopkins (2002) propuseram cinco níveis de avaliação para dutos com defeito de corrosão.

- Nível 1: utilizando critérios da própria empresa operadora de dutos ou normas práticas, levam em consideração apenas o tipo de defeito e dimensões.
- Nível 2: utiliza os métodos semi-empíricos para determinação da pressão de falha, são baseados em equações analíticas, consideram como um defeito simples e não interagente e a região do defeito com formatos pré-estabelecidos, como uma caixa retangular ou uma parábola. Alguns desses métodos são o ASME B31G (ASME, 2009), DNV RP-F101 (para defeitos não interagentes) (DNV GL AS, 2017) e BS 7910 (para defeitos não interagentes) (BRITISH-STANDARD, 2013). São de baixo custo computacional e de fácil implementação, mas os resultados são conservadores. Dependem da tensão de escoamento ou tensão última do material, diâmetro do duto e espessura da parede do duto, comprimento e profundidade do defeito.
- Nível 3: também faz uso de métodos semi-empíricos, mas ao contrário do nível anterior, necessita do perfil dos defeitos. Como exemplo desses métodos têm-se o DNV RP-F101 (para defeitos complexos) (DNV GL AS, 2017) e o *Effective Area RSTRENG* (KIEFNER; VIETH, 1989).
- Nível 4: Neste nível têm-se testes experimentais e modelagem usando elementos finitos. Em ambos os casos é necessário mão-de-obra qualificada e tempo. Para modelagem e análise não-linear por elementos finitos necessita-se de uma infraestrutura computacional eficiente. E para testes experimentais além dos pontos listados carece de uma estrutura adequada e não podem ser realizados em um trecho de duto em operação.

- Nível 5: Usa-se análises mais sofisticadas, como análise de risco e análise de confiabilidade. São utilizadas as distribuições estatísticas das dimensões dos defeitos e dos dutos, propriedades do material e outras para quantificar as incertezas da análise.

2.1.1 Métodos semi-empíricos

Os métodos semi-empíricos são amplamente utilizados. São baseados em equações analíticas de fácil implementação, possuem baixo custo computacional e os resultados são conservadores. Devido a facilidade de implementação e o baixo custo computacional, são largamente utilizadas em análises de confiabilidade (AHAMMED; MELCHERS, 1996; TEIXEIRA et al., 2008; BAZÁN; BECK, 2013; TEE; PESINIS, 2017; MAHMOODIAN; LI, 2017; SHUAI; SHUAI; XU, 2017; GONG; ZHOU, 2018; KESHTEGAR; SEGHIER, 2018; AMAYA-GÓMEZ et al., 2019; BAGHERI et al., 2021). Dentre as normas estão a ASME B31G, a B31G modificada, a DNV RP-F101 e a Effective Area, que são apresentadas na Tabela 1. É importante ressaltar que em cada norma são definidos quais são as condições em que ela foi validada, qual o tipo de aço e as dimensões dos defeitos em relação a parâmetros do duto. Essas características foram reunidas e apresentadas nos trabalhos de Amaya-Gómez et al. (2019) e no trabalho de Keshtegar e Seghier (2018).

Tabela 1 – Métodos semi-empíricos.

Método	P_f	Restrição	M
B31G	$1.1\sigma_y \left(\frac{2t}{D_e}\right) \left[\frac{1 - \left(\frac{2d}{3t}\right)}{1 - \left(\frac{2d}{3tM}\right)} \right]$	$L \leq \sqrt{20D_e t}$	$\sqrt{1 + 0.8 \frac{L^2}{D_e t}}$
	$1.1\sigma_y \left(\frac{2t}{D_e}\right) \left(1 - \frac{d}{t}\right)$	$L > \sqrt{20D_e t}$	∞
B31G modificado	$\frac{2(\sigma_y + 68.95)t}{D_e} \left(\frac{1 - 0.85 \frac{d}{t}}{1 - 0.85 \frac{d}{tM}} \right)$	$L \leq \sqrt{50D_e t}$	$\sqrt{1 + 0.6275 \frac{L^2}{D_e t} - 0.003375 \frac{L^4}{D_e^2 t^2}}$
		$L > \sqrt{50D_e t}$	$0.032 \frac{L^2}{D_e t} + 3.3$
DNV (simples)	$\left(\frac{2t\sigma_u}{D_e - t}\right) \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{tM}} \right]$	-	$\sqrt{1 + 0.31 \left(\frac{L}{\sqrt{D_e t}}\right)^2}$
PCORRC	$\frac{2\sigma_u t}{D_e} \left(1 - \frac{dM}{t}\right)$	-	$1 - \exp\left(-0.157 \frac{L}{\sqrt{\frac{D_e(t-d)}{2}}}\right)$
		$L_{ef} \leq \sqrt{50D_e t}$	$\sqrt{1 + 0.6275 \frac{L_{ef}^2}{D_e t} - 0.003375 \frac{L_{ef}^4}{D_e^2 t^2}}$
Effective Area	$\left(\frac{(\sigma_y + 68.95)2t}{D_e}\right) \left[\frac{\left(1 - \frac{A_{ef}}{A_0}\right)}{\left(1 - \frac{A_{ef}}{A_0 M}\right)} \right]$	$L_{ef} > \sqrt{50D_e t}$	$0.032 \frac{L_{ef}^2}{D_e t} + 3.3$

Na Tabela 1 D_e é o diâmetro externo do duto, t é a espessura da parede do duto, d é a profundidade máxima do defeito, L é o comprimento do defeito, M é o fator de

dilatação, σ_y é a tensão de escoamento do material, σ_u é a tensão última do material. A_{ef} é a área corroída da região do defeito, A_0 é a área original da região do defeito e L_{ef} é o comprimento efetivo do defeito.

2.1.2 Métodos numéricos

Os métodos semi-empíricos, apesar de fácil implementação e baixo custo computacional, fornecem resultados conservadores, o que pode acarretar uma substituição prematura de um trecho de duto. O método dos elementos finitos é uma opção que produz resultados de pressões de falha menos conservadores, em muitos casos bem próximos ao obtido através de testes experimentais, como apresentado em Cabral (2007), Andrade et al. (2006) e Cabral et al. (2017).

Em Cabral (2007) e Cabral et al. (2017) é apresentado um processo de criação dos modelos de elementos finitos tridimensionais, considerando defeitos idealizados, análise e validação, comparando os resultados obtidos através do método dos elementos finitos (MEF) com resultados de modelos experimentais de Benjamin et al. (2005), Benjamin et al. (2006) e Andrade et al. (2006). Além disso, os resultados obtidos através de MEF foram comparados com os obtidos através das normas, mostrando que o MEF gerou resultados mais próximos aos experimentais. Além disso, muitos trabalhos demonstraram a eficiência de análises via elementos finitos de dutos com defeitos idealizados e múltiplos defeitos idealizados, como apresentado nos trabalhos de Choi et al. (2003), Andrade et al. (2006), Cabral (2007), Karuppanan et al. (2012), Cabral et al. (2017) e Bruère et al. (2019).

Em Pimentel et al. (2020), é apresentado um procedimento de geração de modelos de elementos finitos tridimensionais com defeitos de corrosão complexos que usam dados obtidos de inspeção ultrassônica. A validação é realizada com resultados obtidos dos trabalhos de Souza et al. (2004) e Souza et al. (2005), que apresentam resultados obtidos em dutos retirados do campo e que tiveram as espessuras remanescentes medidas com um aparelho manual de ultrassom. Os resultados obtidos através do MEF foram comparados com resultados obtidos através das normas e apresentaram erros menores em relação ao experimental.

Em Ferreira (2011) é apresentado um procedimento para a criação automática de modelos sintéticos de dutos com defeitos complexos. É usada a distribuição de Valor Extremo Generalizado para um ajuste estatístico no mapa de corrosões e uma função de correlação espacial do tipo exponencial é aplicada nos pontos aleatórios. Uma análise estatística utilizando o método de Monte Carlo foi aplicada e distribuição de falha é comparada com os parâmetros espessura mínima e média do defeito.

Em Cabral et al. (2022) é apresentado um procedimento para a geração de modelos de elementos finitos axissimétricos com defeitos baseados no perfil *river-bottom*. Também é apresentada a validação com resultados experimentais encontrados nos trabalhos de Souza

et al. (2004) e Souza et al. (2005), onde os resultados obtidos com o modelo bidimensional foi bem próximo ao experimental. Além disso, foi observada uma redução no tempo de análise e uma diminuição da demanda por recursos computacionais, o que faz com que demande-se menos infraestrutura computacional para a execução das análises e também menos tempo para obter-se os resultados do que utilizando modelos de elementos finitos tridimensionais, visto que os modelos bidimensionais são bem menores e mais simples do que os modelos tridimensionais.

2.1.3 Metamodelos

Os métodos numéricos, ou de alta fidelidade, fornecem resultados bem próximos aos obtidos através de experimentos em laboratório, mas apresentam um alto custo computacional, o que acaba dificultando o seu uso para análises de confiabilidade, como apresentado no trabalho de Torres (2009), e inviabilizando seu uso para otimização de projeto baseada em confiabilidade Kroetz, Tessari e Beck (2017).

Segundo Wang (2014) modelos aproximados, também conhecidos como modelos substitutos ou metamodelos, são aproximações matemáticas simplificadas de modelos complexos. Esses modelos são usados para fazer o mapeamento de dados de entrada para os dados de saída, quando se desconhece a relação entre eles ou o modelo de alta complexidade tem um alto custo computacional Han e Zhang (2012). No caso de análise de integridade estrutural de dutos os dados que são mapeados podem ser oriundos de experimentos ou de análises de modelos numéricos. Existem vários tipos de metamodelos utilizados no contexto de avaliação de integridade estrutural de dutos, como funções de base radial (*Radial Basis Function, RBF*) que foi utilizado nos trabalhos de Sousa (2022) e Cabral, Willmersdorf e Afonso (2021), krigagem no trabalho de Torres (2009) e redes neurais artificiais que foram utilizadas no trabalho de Ferreira (2022).

No contexto de análise de integridade estrutural, metamodelos vêm sendo utilizados em vários trabalhos (TORRES, 2009; KROETZ; TESSARI; BECK, 2017; DAI; CAO, 2017; SUN et al., 2017; LI et al., 2018; XU; WANG, 2019; SOUSA; AFONSO; WILLMERSDORF, 2021; CABRAL; WILLMERSDORF; AFONSO, 2021; SOUSA, 2022). Em Kroetz, Tessari e Beck (2017) é comentado que o custo computacional de uma análise de integridade estrutural utilizando modelos de alta fidelidade é muito alto. Esse custo cresce de forma abrupta quando se faz otimização de projeto baseada em confiabilidade, isso acontece devido a necessidade das várias avaliações da função.

Um outro ponto importante apresentado pelos autores é que o maior custo computacional dos metamodelos está na concepção, depois que o modelo é criado o custo computacional de uma análise através dele é insignificante, quando comparado a uma análise através de elementos finitos Kroetz, Tessari e Beck (2017).

Em Sinha e Pandey (2002) foi gerado um metamodelo usando resultados oriundos

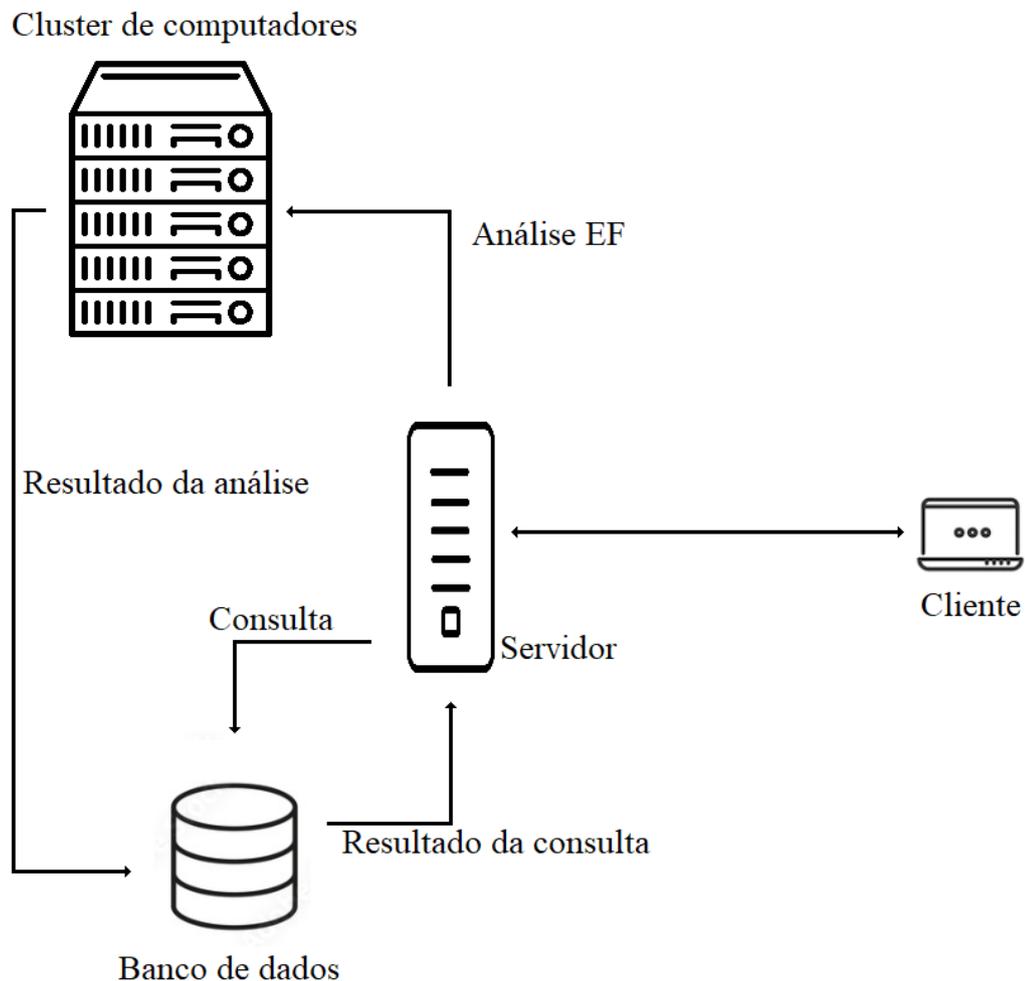
da norma ASME B31G. Em Keshtegar e Seghier (2018) e Phan e Dhar (2021), aplica-se metamodelos para a predição da pressão de falha em dutos, os dados são oriundos de modelos experimentais que estão disponíveis na literatura. Em Chin et al. (2020) e em Lu et al. (2021), os dados são provenientes de MEF e experimentais, ambos oriundos da literatura. Kumar, Karuppanan e Ovinis (2022) e em Sousa (2022) são usados resultados obtidos através apenas do MEF. Em Ferreira (2022) foram criados modelos sintéticos de elementos finitos bidimensional e tridimensional, com geometria complexa. A transformada *wavelet* discreta foi aplicada sobre esses modelos e o resultado dessa transformação foi utilizado para treinar uma rede neural artificial profunda para a predição da pressão de falha de dutos com defeitos complexos. O erro obtido com o uso dessa rede neural foi inferior a 3%.

Este trabalho se diferencia pela criação e análise de modelos de elementos finitos de dutos com defeitos de corrosão, que foram armazenados em um banco de dados e disponibilizados através de uma interface de programação de aplicação web, segundo a arquitetura REST. A partir desses dados são criados modelos substitutos utilizando métodos de superfícies de resposta para a predição de maneira rápida e precisa da pressão de falha de dutos com defeitos de corrosão e levando-se em conta vários tipos de aços.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a arquitetura do sistema que fornece uma interface web entre as aplicações cliente e o servidor que se conecta com o banco de dados. Nesse banco de dados estão armazenados os resultados de milhares de análises estruturais de dutos corroídos. As análises foram realizadas remotamente utilizando o método dos Elementos Finitos (EF) em um cluster de computadores. Uma visão geral do sistema é apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Arquitetura do sistema.



Fonte: O autor.

A interface para o sistema cliente foi desenvolvida como uma API REST (FIELDING, 2000), onde as solicitações são recebidas via protocolo HTTP, são tratadas pelo servidor e o sistema suporta as seguintes opções para o cliente:

- solicitação de dados contidos no banco de dados;
- armazenamento de novos dados de análises estruturais realizadas através do método dos elementos finitos.

Os resultados das análises, contidos no banco de dados, são de modelos de dutos com defeito de corrosão que foram previamente analisados em um cluster de computadores de forma remota. A geração dos modelos, o envio dos modelos, o recolhimento dos resultados das análises e a inserção dos resultados no banco de dados foram feitos de forma automática.

Nas seções subsequentes serão dados mais detalhes sobre as características dos modelos de elementos finitos e análise, a recuperação dos resultados das análises, a API que foi desenvolvida e o modelo do banco de dados que foi utilizado. Além disso, também serão apresentadas formas de utilização dos dados e aplicação em modelos substitutos.

3.1 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Neste trabalho a geração dos modelos computacionais foi feita através do programa CORDUT, programa que foi desenvolvido pelo grupo PADMEC em parceria com o CENPES/PETROBRAS (CABRAL, 2007; CABRAL et al., 2017), o CORDUT usa utiliza dois programas comerciais o PATRAN (MSC.PATRAN, 2015) e o ANSYS (ANSYS, 2016), o primeiro para a geração da malha do modelo de elementos finitos e o segundo para a análise não linear desse modelo. Os modelos de elementos finitos gerados são tridimensionais, utilizando elementos sólidos, hexaédricos, tri-lineares, conforme apresentado em Cabral (2007), além disso, os carregamentos que foram aplicados nos modelos de elementos finitos são a pressão interna e pressão longitudinal, na borda livre, como apresentado na Figura 4, para simular a situação existente em um ensaio de laboratório (duto fechado com pressão interna), tal configuração aqui será denominada duto com tampa. A pressão longitudinal P_{long} é calculada de acordo com a Equação 3.1,

$$P_{long} = P_i \frac{D_i^2}{D_e^2 - D_i^2} \quad (3.1)$$

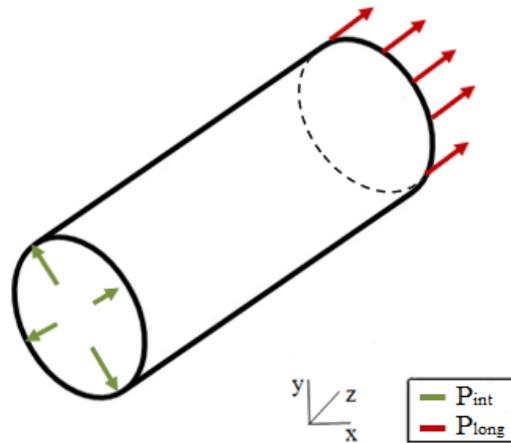
onde P_i é a pressão interna do modelo no passo i , D_i e D_e são os diâmetros interno e externo do modelo, respectivamente.

Foram gerados modelos de elementos finitos com defeitos do tipo idealizado, isto é, os defeitos possuem o formato retangular, com profundidade (d), largura circunferencial (w) e comprimento longitudinal (L), como apresentado na Figura 5. Além disso, os defeitos são não interagentes, isto é, os defeitos estão longe o bastante para não haver influência de um defeito na determinação de pressão de falha causada por um outro defeito.

Para o cálculo da pressão de falha foi utilizado o `code_aster`, que é um solver de código aberto desenvolvido pelo departamento de pesquisa e desenvolvimento da empresa

de Energia da França (EDF) e que utiliza o método dos elementos finitos (CODE-ASTER, 2019). Devido a necessidade de executar milhares de casos em paralelo, a utilização do ANSYS como solver era inviável, pois a licença que o grupo de pesquisa PADMEC possui não dá suporte a execução em paralelo. Então, foi adotado o code_aster como solver. Devido aos modelos gerados não serem compatíveis com o code_aster, foi necessário fazer a conversão do arquivo do modelo para um formato que o code_aster possa interpretar, essa conversão foi implementada e é apresentada em Ferreira (2022).

Figura 4 – Carregamentos aplicados ao duto.



Fonte: O autor.

Para realizar uma análise estrutural no code_aster é necessário criar elementos de superfície para a aplicação das cargas de pressão interna e também para a aplicação da pressão longitudinal equivalente, visto que o modelo considerado neste trabalho é o duto com tampa.

As funções numéricas do code_aster foram desenvolvidas em Fortran (GATES, 2020) e demais funcionalidades em Python (PYTHON, 2011), além disso, o arquivo de configurações do code_aster aceita comandos em Python, o que permite o uso de bibliotecas e de comandos da linguagem, a criação de scripts para a automatização de algumas atividades repetitivas, estudos paramétricos, criação e adaptação de malhas, dentre outros (EDF, 2011a; EDF, 2011b).

Como forma de viabilizar a análise de milhares de casos para alimentar o banco de dados aqui proposto foi utilizado o cluster de computadores do grupo PADMEC, segundo o PADMEC (2023) o sistema SGI ICE X instalado possui 17 nós com o total de 544 núcleos computacionais. Os nós são interconectados através de uma rede infiniband de alto desempenho. Cada nó possui a seguinte configuração:

1. CPU

- Modelo: AMD Opteron(TM) Processor 6272
- Threads por core: 2
- Cores por socket: 8
- Quantidade de sockets: 2
- Frequência da CPU: 2.1GHz
- Arquitetura: X86_64
- Quantidade total de threads por nó: 32

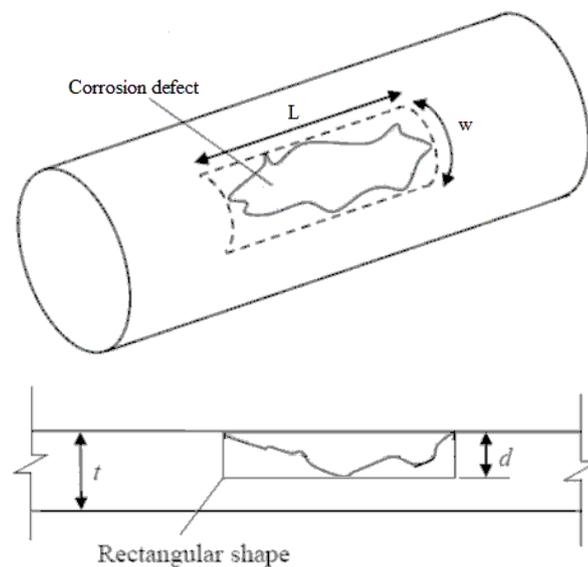
2. Memória

- Memória: 132 GB

3. Ambiente operacional

- Sistema operacional: CentOS release 6.3
- Versão do kernel: 2.6.32-279.el6.x86_64
- Escalonador de processos: SLURM

Figura 5 – Esquemáticos de um defeito idealizado.



Fonte: O autor.

Além da rotina para converter o arquivo do modelo do formato do ANSYS também foram utilizadas outras para a criação dos demais arquivos para a análise do modelo pelo code_aster. São gerados os arquivos <modelo>.mail, que contém a malha de elementos finitos, launcher_script.sh, que é um arquivo de comandos do shell e que é passado para o escalonador de processos, neste caso o SLURM, para reservar os recursos necessários para

a execução da análise, `export`, que define os arquivos de entrada e saída para a execução da análise, além de limitar o quanto de memória será utilizada, dentre outros parâmetros e o arquivo `<modelo>.comm`, que possui os comandos que serão executados para a análise não-linear por elementos finitos e também possui a curva do material que será utilizada, que é gerada utilizando a equação de Ramberg-Osgood (RAMBERG; OSGOOD, 1943).

3.1.1 Condição de parada

Considera-se o instante em que houve a ruptura de um duto com defeito de corrosão o instante em que há vazamento através de uma descontinuidade na região do defeito (CABRAL, 2007).

A formulação de elementos finitos utilizada neste trabalho considera a mecânica do contínuo (CABRAL, 2007), então, no caso desta dissertação, como apresentado no trabalho de Ferreira et al. (2021), a pressão de ruptura será definida como a pressão obtida quando qualquer ponto dentro da região do defeito atingir a tensão equivalente de Von Mises igual a tensão última do material.

3.1.2 Automatização do processo de análise no cluster

Para automatizar o processo de inicialização de múltiplas análises, recuperação dos dados e alimentação do banco de dados com os resultados das análises, foram desenvolvidas rotinas utilizando as bibliotecas Paramiko (FORCIER, 2022), scp (RAMPIN, 2022), re (ROSSUM, 2020) e SQLAlchemy (BAYER, 2012).

A Paramiko é uma biblioteca escrita em Python e que implementa o protocolo SSH-2 (Secure Shell Protocol version 2) (YLONEN; LONVICK, 2006), que é um protocolo de rede criptografada para operar em serviços de rede seguros sobre uma rede insegura (YLONEN; LONVICK, 2006). A biblioteca scp implementa o protocolo SCP (OPENBSD, 2019) (*Secure Copy protocol*), que é um protocolo para o envio e recebimento de arquivos sobre o protocolo SSH (OPENBSD, 2019). Para este trabalho foi implementada uma classe com a finalidade de inicializar uma conexão SSH com o servidor e também foram implementados 3 métodos:

- `send_folder`, para o envio de um diretório do cliente para o servidor usando a biblioteca scp;
- `recv_result`, para recuperar o arquivo de resultados que está no servidor e envia para uma pasta do lado cliente;
- `exec_cmd`, para enviar comandos através do protocolo ssh para o servidor.

Uma outra biblioteca que foi utilizada foi a re, que implementa métodos de expressões regulares. Todo o processamento dos arquivos de resultados foi feito através

de expressões regulares, de forma a tornar mais prática a coleta dos dados de pressão de falha, pressão de escoamento e tensão última alcançada na análise. Além disso, o acompanhamento das análises que ainda estavam em execução no servidor também fez uso de expressões regulares. Primeiro se fazia uma consulta ao servidor de quais processos estavam em execução, depois se verificava através do ID dos processos quais eram de análises que já tinham sido encerradas e com essa lista se fazia a requisição dos arquivos de resultados.

A SQLAlchemy é uma biblioteca escrita em Python, com um *toolkit* para banco de dados e um sistema de mapeamento objeto-relacional (do inglês *object-relational mapping*, ORM), esse mapeamento permite que se trabalhe com o paradigma orientado a objeto com banco de dados relacionais, de forma que as tabelas são representadas como classes e os registros de cada tabela são representados como instâncias das classes correspondentes (BAYER, 2012). Nesse ponto a biblioteca foi utilizada para a alimentação do banco de dados com os resultados das análises, carregando os dados do modelo, os dados da curva do material e os dados da análise, sempre verificando se não há repetição dos dados para uma mesma tripla {modelo, curva do material, resultado da análise}.

3.2 API

Uma interface de programação de aplicação (*Application Programming Interface* - API), segundo Reddy (2011), fornece uma abstração para um dado problema e especifica como os usuários devem interagir com os componentes que implementam a solução para esse problema. Os próprios componentes são organizados como uma biblioteca de software, permitindo o seu uso em múltiplas aplicações. De forma abrangente, APIs definem blocos reusáveis que tornam possível que sejam incorporados a aplicações de terceiros. Segundo Rendle (2020) a primeira API remonta ao início da computação eletrônica na década de 1940, no uso de bibliotecas modulares no EDSAC, que foi o segundo computador eletrônico digital com programa armazenado (COMPUTING,). Mas o termo só começou a ser empregado no final da década de 1960 e começo de 1970 (RENDLE, 2020).

O propósito de uma API é prover uma interface lógica para a funcionalidade de um determinado componente, enquanto esconde os detalhes de implementação. Segundo Reddy (2011) as principais vantagens do uso de APIs são:

- implementação escondida: o foco é fornecer ao usuário uma interface pública e abstrair toda a implementação da solução, de forma que ele não precisa se preocupar com os detalhes de implementação;
- promover modularização: uma API é focada na resolução de uma tarefa específica ou caso de uso;

- redução de duplicação de código: todo o código de uma determinada aplicação é concentrado em único ponto e se fornece uma interface para os usuários, assim todos os clientes utilizam o mesmo código através dessa interface;
- mais facilidade de modificar a implementação: como só há uma interface pública e todo o código está por trás dessa interface, é possível alterar a implementação sem que afetar dependências nos códigos do usuário;
- mais facilidade para otimizar: de forma semelhante, pode-se realizar otimizações no código que está por trás da interface pública sem a necessidade de modificações no código do cliente.

Existem vários tipos de APIs, dentre eles bibliotecas, frameworks, em sistemas operacionais, remotos e web. Neste trabalho foi utilizada uma API web para fazer a interface entre o cliente, software que irá consumir os dados, e o servidor, software que lidará com as requisições do cliente e fornecerá os dados contidos no banco de dados. O uso desse tipo de API se deu pela flexibilidade para escolha do dispositivo cliente, como um smartphone, tablet ou desktop. Além disso, como o retorno é feito através de texto, a resposta é compatível com o protocolo HTTP e é de fácil compreensão por uma pessoa. Do lado servidor a API web possibilita que o servidor seja leve e de fácil manutenção. Uma API web faz uso do protocolo HTTP (FIELDING; RESCHKE, 2014), para realizar as requisições, e as mensagens de resposta podem ser no formato JSON, acrônimo do termo em inglês *JavaScript Object Notation* (BRAY, 2017), ou no formato XML, acrônimo do termo em inglês *eXtensible Markup Language* (GARCÍA; CAMARILLO, 2008).

Neste trabalho foi utilizado o micro framework Flask, que é escrito em Python. O Flask fornece um núcleo simples, expansível, rápido e com uma sintaxe semelhante ao Python (GRINBERG, 2018). Para a interação com sistemas de persistência de dados a biblioteca padrão do Python possui a `sqlite3` (ROSSUM, 2020), que é uma biblioteca para implementar um servidor SQLite, que é um servidor auto-contido, para aplicações de pequeno porte, muito utilizado em sistemas móveis (HIPPEL, 2020). Dentre as principais características da biblioteca `sqlite3` estão, as consultas são feitas através de comandos em SQL (Structured Query Language), além disso, como o próprio nome sugere, ela só dá suporte ao SQLite (ROSSUM, 2020), o que pode ser um problema quando os sistemas se tornam maiores e é necessário a utilização de um sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD) mais robusto, que suporte muitas requisições por segundo ou que funcione numa arquitetura cliente-servidor. Por esses motivos, se deu preferência a um outro pacote, o SQLAlchemy, que fornece uma interface simples para qualquer banco de dados, de forma que não há necessidade de configuração para a utilização da maioria dos SGBDs disponíveis. Além disso, não há necessidade de conhecimento da sintaxe do SQL, o pacote abstrai toda a interação com o banco de dados, de forma que os comandos de consulta são

métodos escritos em Python, através do ORM, mas ainda é preciso saber a semântica do SQL.

Na Figura 6 é possível visualizar um exemplo da diferença de código necessária para uma determinada consulta utilizando a SQLAlchemy e a SQL, quando se precisa utilizar o comando JOIN para unir dados de várias tabelas e realizar uma consulta sobre eles.

Figura 6 – Exemplo de uma mesma consulta feita com SQLAlchemy e com SQL.

```
>>> stmt = (  
...     select(User).  
...     join(User.orders).  
...     join(Order.items)  
... )  
>>> print(stmt)
```

```
SELECT user_account.id, user_account.name, user_account.fullname  
FROM user_account  
JOIN user_order ON user_account.id = user_order.user_id  
JOIN order_items AS order_items_1 ON user_order.id = order_items_1.order_id  
JOIN item ON item.id = order_items_1.item_id
```

Fonte: O autor.

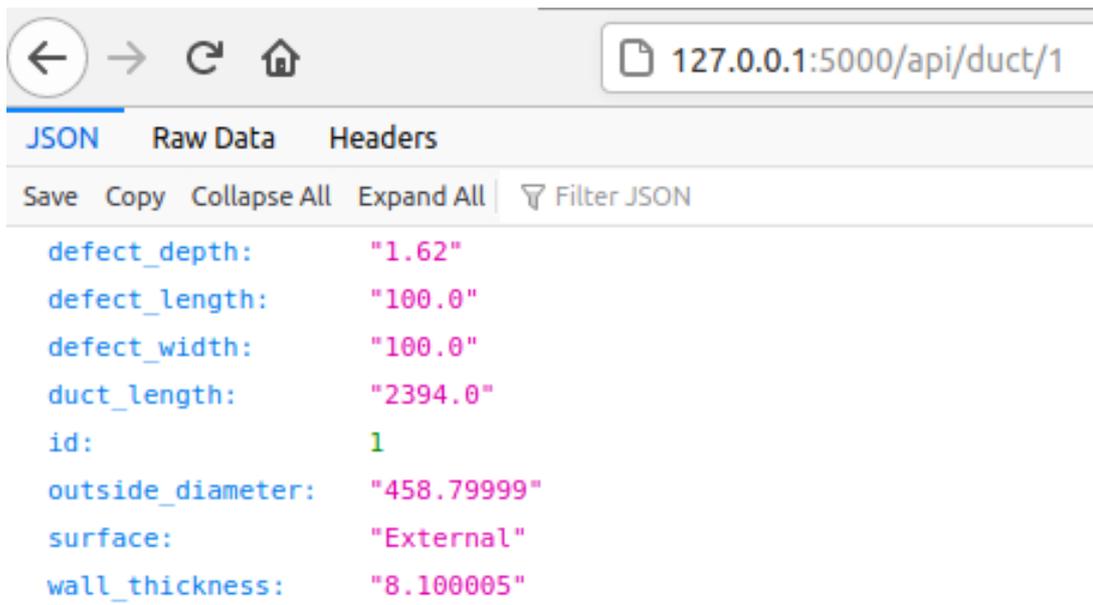
A arquitetura do sistema foi pensada para ser REST API, de forma a ser de fácil extensão no futuro, visto que a arquitetura REST é pensada para lidar com mudanças (FIELDING, 2000), utiliza uma arquitetura cliente-servidor, sem estados armazenados no servidor e possui uma interface uniforme para comunicação. Além disso, o formato de retorno dos dados foi definido como JSON, um exemplo do retorno obtido no formato JSON através do navegador é apresentado na Figura 7.

JSON é um formato largamente utilizado na internet, possui suporte nativo em várias linguagens, incluindo em Python, o que torna o seu manuseio mais fácil, como apresentado na Figura 8, onde é apresentado um exemplo de implementação de código usando a biblioteca json e a biblioteca urllib (ROSSUM, 2020), para tratar requisições em uma URL qualquer e retornar os dados como um dicionário, ambas são bibliotecas padrão do Python. Além disso, devido a forma como é estruturado, uma mensagem no formato JSON utiliza menos largura de banda do que se essa mesma mensagem estivesse no formato XML.

Foram desenvolvidas duas funções para facilitar a interação do usuário com o sistema, de forma a abstrair a comunicação com o sistema e tratar os dados. A 1ª função é a `get_data()`, onde o usuário pode informar se deseja receber todos os dados contidos no banco de dados ou filtrar os dados de acordo com algum parâmetro, o que pode ser feito quando não se passa nenhum parâmetro na função ou se define os valores como parâmetros, respectivamente. A outra função é a `set_data()`, nessa função pode-se

enviar dados para serem adicionados no banco de dados, após uma avaliação dos dados enviados, por isso é necessário fornecer as dimensões do modelo (D_E , τ , $L_{defeito}$, w , d , L_{duto}), dados da curva do aço e a pressão última atingida na análise por elementos finitos.

Figura 7 – Exemplo de uma mensagem no formato JSON.



```

{
  "defect_depth": "1.62",
  "defect_length": "100.0",
  "defect_width": "100.0",
  "duct_length": "2394.0",
  "id": 1,
  "outside_diameter": "458.79999",
  "surface": "External",
  "wall_thickness": "8.100005"
}

```

Fonte: O autor.

3.3 BANCO DE DADOS

Um banco de dados é um conjunto organizado de informações estruturadas (ORACLE,). Na década de 1970 Codd publica seu artigo que serve de base para os bancos de dados relacionais (CODD, 1970), que são baseados em álgebra relacional, e se tornaram dominantes na década de 1980. Os itens nesse modelo de banco são organizados como um conjunto de tabelas com colunas e linhas, sendo as tabelas as relações, as linhas são tuplas e as colunas dessa tabela são atributos, todos os valores em uma determinada coluna são do mesmo tipo (ORACLE, ; ELMASRI; NAVATHE, 2010), como apresentado na Figura 9. Como exemplos desse modelo de banco de dados estão o MySQL, o PostgreSQL, MariaDB, dentre outros.

Existem várias formas de representação de modelos de banco de dados, para descrever os sistemas entidade relacional têm-se o modelo entidade-relacionamento (MER), a forma gráfica de representação desse modelo é o Diagrama Entidade e Relacionamento (DER). O MER pode ser apresentado em três níveis, o modelo conceitual, o modelo lógico e o modelo físico, aqui vamos apresentar os dois primeiros níveis, que são independentes de SGBD. O nível mais abstrato é o conceitual, nesse tipo de modelo o foco é identificar as

entidades e relacionamentos de forma global, não se tem detalhes do modelo de banco de dados e nem de sua implementação, a notação do DER do modelo conceitual foi proposta em 1976 por Chen (1976). Na Figura 10 é apresentado o DER conceitual do banco de dados que foi desenvolvido neste trabalho, onde são armazenados os dados referentes a cada análise executada, incluindo o aço que foi utilizado e suas características, as dimensões do modelo analisado, o usuário que realizou a análise e os resultados da análise.

Figura 8 – Exemplo de consumo de dados através do JSON.

```
Python 3.6.9 (default, Jan 26 2021, 15:33:00)
[GCC 8.4.0] on linux
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>> import json
>>> from urllib.request import urlopen
>>> url = 'http://127.0.0.1:5000/api/duct/1'
>>> response = urlopen(url)
>>> data_json = json.loads(response.read())
>>> print(data_json)
{'defect_depth': '1.62', 'defect_length': '100.0', 'defect width': '100.0', 'duct_length': '2394.0', 'id': 1, 'outside_diameter': '458.79999', 'surface': 'External', 'wall_thickness': '8.100005'}
>>>
```

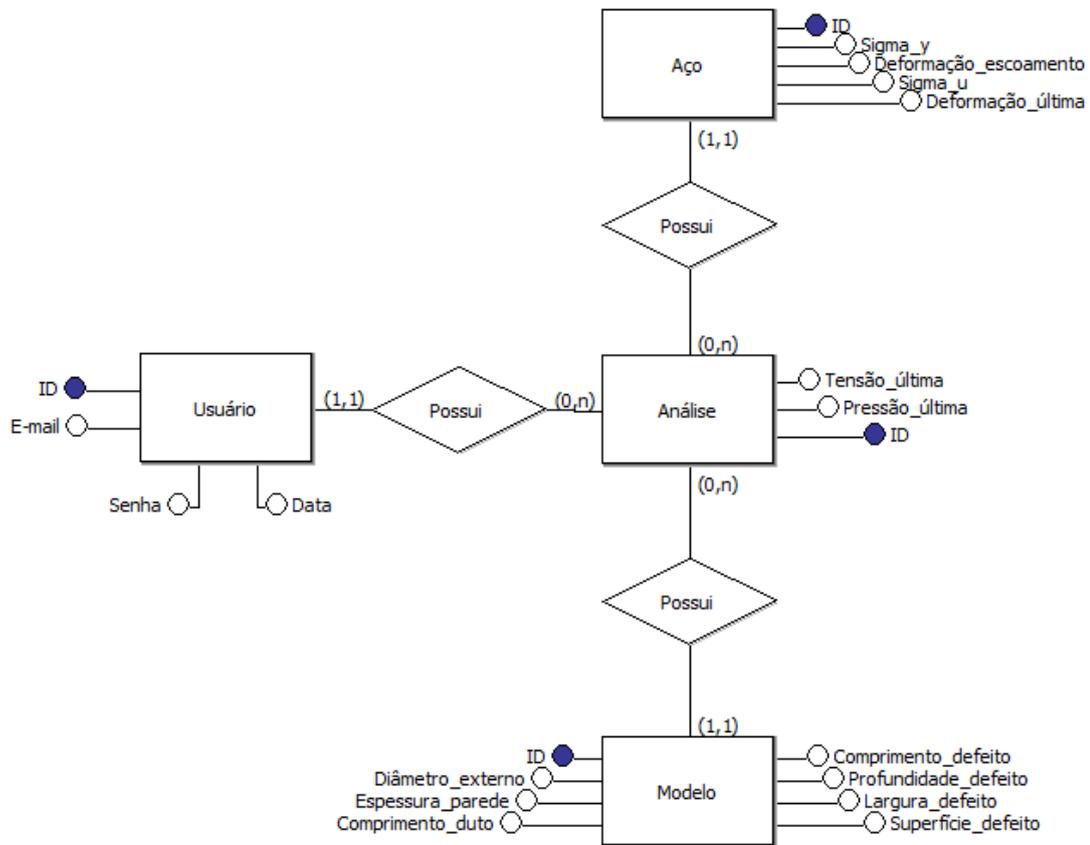
Fonte: O autor.

Figura 9 – Exemplo de uma tabela de um banco de dados relacional.

ID	Diâmetro externo	Largura	Comprimento do defeito	Profundidade	Espessura	Superfície	Comprimento do duto
1	458	100	100	1,64	8,2	Interno	4680
2	458	200	100	3,28	8,2	Externo	4680
3	458	300	400	2,46	8,2	Externo	4980
4	458	400	500	5,74	8,2	Interno	5080
5	458	500	300	6,56	8,2	Interno	4880

Fonte: O autor.

Figura 10 – DER conceitual.



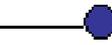
Fonte: O autor.

Na Tabela 2 são apresentados os símbolos, segundo a notação de Chen (1976), utilizados na Figura 10. Além destes símbolos existem outros, tais como atributos multivalorados, entidade fraca, atributo composto.

Uma entidade é uma representação de uma coisa ou objeto, cada entidade possui atributos, que são as características particulares que as definem. Quando um atributo é dito ser um atributo chave é por que através desse atributo se consegue identificar de forma única uma determinada entidade. Um relacionamento é uma associação entre entidades (ELMASRI; NAVATHE, 2010; CHEN, 1976).

A modelagem lógica é necessária para compilar os requisitos de negócio e representar os requisitos como um modelo. Ela descreve como os dados que serão armazenados no banco e também seus relacionamentos. Esse modelo adota alguma tecnologia, pode ser: relacional, orientado a objetos, orientado a colunas, entre outros. O DER lógico também modela as informações coletadas dos requisitos de negócios. É mais complexo do que o modelo conceitual em que os tipos de coluna são definidos.

Tabela 2 – Sumário da notação para o DER conceitual.

Símbolo	Significado
	Entidade
	Relacionamento
	Atributo
	Atributo chave

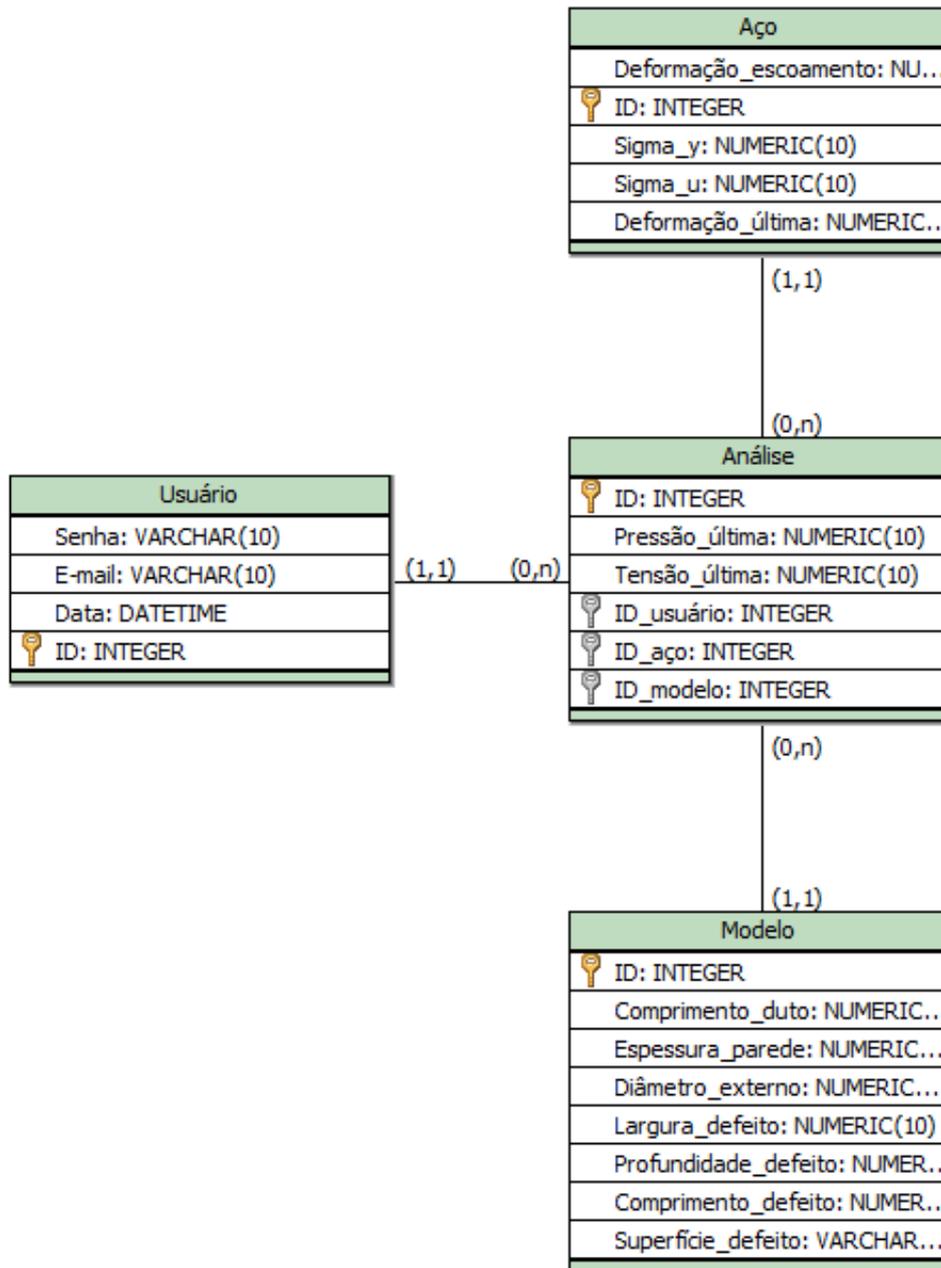
No DER lógico tem-se mais detalhes do modelo, há a separação por tabelas, o tipo de cada atributo, a identificação das chaves primárias e chaves estrangeiras, as chaves primárias são os identificadores únicos de cada tupla, as chaves estrangeiras são as chaves de identificação de uma tupla que é armazenada numa outra tabela, como apresentado na Figura 11, considerando a tabela Análise, a chave primária dessa tabela é denominada ID e as chaves estrangeiras são ID_usuario, ID_aço e ID_modelo, que são referentes a entradas nas tabelas Usuário, Aço e Modelo, respectivamente.

Na Tabela 3 são apresentadas as variáveis de projeto, são eles diâmetro externo (D_E), espessura da parede do duto (t), a largura circunferencial do defeito (w), o comprimento longitudinal do defeito ($L_{defeito}$), a profundidade relativa do defeito (d/t), onde d é a profundidade do defeito, o comprimento do modelo (L_{duto}), e os tipos de aços que foram armazenados no banco de dados. Tais valores para as variáveis de projeto foram selecionados baseados em dados de inspeções que o autor teve acesso.

3.4 METAMODELOS

Simulações numéricas são utilizadas para a resolução de problemas de engenharia e vêm ganhando mais espaço com o avanço do poder de processamento dos computadores atuais, Com isto os modelos estão se tornando mais completos e complexos, para representar melhor os eventos no mundo real, acarretando uma maior demanda por processamento (FORRESTER; SOBESTER; KEANE, 2008; JIANG; ZHOU; SHAO, 2020; SILVA, 2019; PINTO, 2020).

Figura 11 – DER lógico.



Fonte: O autor.

Por outro lado, problemas que envolvem análise de confiabilidade demandam muitas análises para serem resolvidos. Apesar de haver opções aproximadas como o FORM (MELCHERS; BECK, 2018), nem sempre é possível utilizar esses métodos aproximados, o que traz a necessidade de utilizar o método de Monte Carlo (METROPOLIS; ULAM, 1949) que precisa de milhões de análises para convergir, tornando inviável a análise de confiabilidade com modelos de alta fidelidade. Além disso, existe também a Otimização de Projeto utilizando confiabilidade, que a cada iteração do algoritmo necessita a execução de uma análise de confiabilidade. Para esses casos torna-se impossível a utilização de modelos

de alta fidelidade, que são modelos numéricos que simulam as características do modelo real, sendo necessária a utilização de metamodelos (KROETZ; TESSARI; BECK, 2017).

Tabela 3 – Variáveis de projeto.

Parâmetros	Unidade	Valor(es)
D_E	mm	300, 400, 500, 600, 700
t	mm	5,0, 12,5, 20,0
w	mm	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000
$L_{defeito}$	mm	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100
d/t	-	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9
L_{duto}	mm	$5D_E + L_{defeito}$
Material	-	API 5L X42
	-	API 5L X46
	-	API 5L X52
	-	API 5L X56
	-	API 5L X60
	-	API 5L X65
	-	API 5L X70
	-	API 5L X80
	-	API 5L X120
	Superfície	-
-		Externa

Metamodelos, também conhecidos como modelos substitutos, possuem um baixo custo computacional, dando resultados de forma imediata, apesar de não serem tão precisos quanto os modelos de alta fidelidade. O principal desafio na geração de metamodelos é a criação de modelos com a maior precisão possível utilizando o menor número de análises de alta fidelidade, dessa forma, reduzindo o custo computacional para a geração dos modelos (PINTO, 2020). Dentre os principais pontos que levam a utilização de metamodelos estão o alto custo computacional para a execução de análises usando modelos de alta fidelidade, como mecanismo de calibração para modelos com acurácia limitada e reduzir o ruído ou lidar com ausência de dados (FORRESTER; SOBESTER; KEANE, 2008; JIANG; ZHOU; SHAO, 2020).

Segundo SERAFINI (1999), as técnicas de construção de modelos podem ser divididas em duas categorias, funcionais e físicas, sendo a primeira baseada na relação entre os dados de entrada do modelo de alta fidelidade e os respectivos resultados, e a segunda

metamodelo (ANDRADE, 2022). Uma vez que as respostas dos modelos de alta fidelidade possuem um alto custo computacional para serem obtidas, faz-se necessário que se encontre um plano de amostragem eficaz, com um número mínimo de pontos que sejam suficientes para garantir uma boa precisão para o modelo e reduzir o custo computacional (AFONSO; HOROWITZ; WILLMERSDORF, 2008).

As técnicas de Projetos de Experimentos (DOE - *Design of Experiments*) (GIUNTA; WOJTKIEWICZ; ELDRED,) baseiam-se neste conceito e entre as várias técnicas de plano de amostragem disponíveis na literatura encontram-se: Monte Carlo, Quase Monte Carlo (QMC), Hipercubo Latino (Latin Hypercube Sampling - LHS) (KEANE; NAIR, 2005; QUEIPO et al., 2005), vetor ortogonal (OA) (FORRESTER; SOBESTER; KEANE, 2008; GIUNTA,), diagramação de Voronoi no centróide (Centroidal Voronoi Tessellation - CVT) e a diagramação de Voronoi no centróide latinizada (“Latinized” Centroidal Voronoi Tessellation - LCVT) (ROMERO et al., 2006).

Neste trabalho foi utilizado a técnica do tipo LHS, pois fornece pontos com uma distribuição bem uniforme, isto se deve a uma maior regularidade na geração das amostras individuais em cada dimensão dos parâmetros, essa fase acontece antes dos parâmetros serem combinados para gerar o grupo final de pontos (ROMERO et al., 2006).

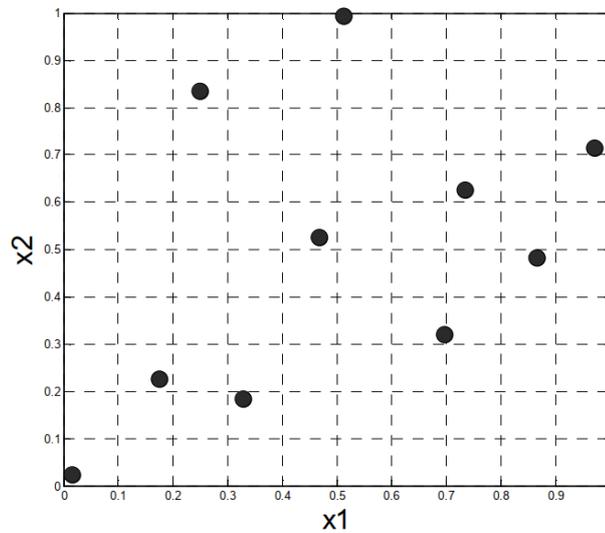
3.4.2 Hipercubo Latino (LHS)

A técnica LHS foi proposta por McKay, Beckman e Conover (1979), como uma alternativa às técnicas de Monte Carlo, é um tipo de amostragem estratificada e pode ser vista como uma extensão n-dimensional da técnica de amostragem quadrado latino (RAJ, 1968; ANDRADE, 2022; PINTO, 2020).

A ideia é dividir o intervalo de cada variável de projeto em n compartimentos de igual probabilidade, isto gerará um total de n^p compartimentos no espaço de projeto, onde p é o número de variáveis de projeto. Em seguida, n amostras são geradas seguindo a restrição, para cada variável não haverá 2 valores em um mesmo compartimento, de forma que, caso seja feita uma projeção unidimensional, haverá uma única amostra por compartimento (KEANE; NAIR, 2005).

Na Figura 13 têm-se um exemplo de uma possível amostra gerada para duas variáveis de projeto, x_1 e x_2 , $p = 2$ e $n = 10$, então, são cem compartimentos onde as amostras poderiam ser alocadas. Como é possível observar, caso seja feita uma projeção no eixo x_1 ou no eixo x_2 , pode-se observar que não haverá duas amostras num mesmo compartimento.

Figura 13 – Exemplo de amostragem através do LHS.



Fonte: PINTO (2014).

3.4.3 Técnicas de interpolação

Nesta seção serão apresentadas as técnicas de interpolação de dados que foram utilizadas neste trabalho, são elas a função de base radial (RBF) e a interpolação multilinear. Esses métodos foram escolhidos pois cada um aborda o problema de interpolação de dados de uma maneira, o RBF é voltado para dados espalhados de maneira não uniforme, o que demanda menos memória mas por outro lado maior computação. Já no caso da interpolação multilinear o método que foi utilizado foi com dados uniformemente espaçados sobre uma grade, de forma que há maior demanda por memória para alocar os dados, mas por outro lado uma menor necessidade de computação.

3.4.3.1 Funções de base radial

O método das funções de base radial (*Radial Basis Function* - RBF) utiliza somas ponderadas de funções simples para tentar reproduzir o comportamento do espaço de projeto, mesmo que não linear (SILVA, 2019). Assim, é uma ferramenta que visa aproximar funções multivariáveis em termos de funções mais básicas, de propriedades conhecidas e de mais fácil análise (ELSAYED et al., 2012; FORRESTER; SOBESTER; KEANE, 2008).

O método foi desenvolvido inicialmente por Hardy (1971), com fins cartográficos, com a finalidade de interpolar de forma adequada colinas e vales com uma precisão, local e global, razoavelmente alta (ANDRADE, 2022). Wu (1995) forneceu um critério para a função positivo definido das funções de base com suporte compacto, que produziu séries de funções de base definidas positivas (PINTO, 2020). Krishnamurthy () adicionou um polinômio à definição do método com a finalidade de melhorar a performance (PINTO,

2020).

Dado um conjunto de N diferentes pares formados por pontos $\{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N\}$, onde $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^d$ e d é o número de dimensões do espaço de projeto, e por respostas $\mathbf{F} = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$, onde $y \in \mathbb{R}$. Busca-se uma RBF \hat{f} da forma (GUTMANN, 2001):

$$\hat{f}(x) = p(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \phi(\|x - x_i\|), x \in \mathbb{R}, \quad (3.2)$$

que interpole os dados $(\mathbf{X}_1, y_1), \dots, (\mathbf{X}_N, y_N)$. Onde x_i é o i -ésimo dos n_c centros das funções de base e ϕ é um vetor contendo os valores das próprias funções de base ϕ , avaliados na distância Euclidiana entre um ponto x e o centro x_i das funções de base, $r = \|x - x_i\|$ e λ são os coeficientes de ponderação da RBF. Uma RBF pode ser definida como uma soma ponderada de translações de uma função básica, radialmente simétrica, ϕ , aumentada por um termo polinomial de baixo grau, p (PINTO, 2020). Na Tabela 4 são apresentadas alguns tipos de RBF.

Tabela 4 – Principais funções básicas.

Função básica	$\phi(r)$
Linear	r
Cúbica	r^3
<i>Thin plate spline</i> (TPS)	$r^2 \log(r)$
Multiquadrática	$\sqrt{1 + r^2}$
Multiquadrática inversa	$\frac{1}{\sqrt{1+r^2}}$
Gaussiana	$\exp(-r^2)$

Após a escolha das funções de base, deve-se definir os coeficientes λ_i , da Equação 3.2. Eles podem ser calculados pela condição de interpolação da Equação 3.3

$$\hat{f}(x_i) = y_i, i = 1, \dots, N. \quad (3.3)$$

Uma vez que essa equação produz um sistema subdeterminado, as condições de ortogonalidade ou condições laterais, dadas pela Equação 3.4, são adicionalmente impostas aos coeficientes $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_N)^T$.

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \pi_j(x_i) = 0, j = 1, \dots, \hat{g}. \quad (3.4)$$

Seja $\{\pi_1(x), \dots, \pi_{\hat{g}}(x)\}$ a base para polinômios de grau no máximo \hat{g} e seja $c = (c_1, \dots, c_{\hat{g}})$ os coeficientes que dão p em termos dessas bases. Então, as Equações 3.3 e 3.4 podem ser escritas em forma de matriz, como está apresentado na Equação 3.5 (WILD; REGIS; SHOEMAKER, 2008).

$$\begin{bmatrix} A & P \\ P^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Onde F é um vetor cujas entradas são os valores de resultados $y_i, i = 1, \dots, N$, A é dado pela matriz da Equação 3.6,

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} & \cdots & \phi_{1N} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{23} & \cdots & \phi_{2N} \\ \phi_{31} & \phi_{32} & \phi_{33} & \cdots & \phi_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \phi_{N2} & \phi_{N3} & \cdots & \phi_{NN} \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

sendo A a matriz que comporta o valor das funções de base em relação a cada par amostral, $P_{i,j} = \pi_j(x_i), i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, \hat{g}$. Ao se resolver o sistema linear da Equação 3.5, λ e c serão determinados, logo o metamodelo \hat{f} estará determinado (PINTO, 2020).

3.4.3.2 Interpolação multilinear

Como apresentado em Weiser e Zarantonello (1988), um interpolador multilinear por partes é uma aproximação de $F(x_1, \dots, x_N)$ para uma função $f(x_1, \dots, x_N)$ que é computada utilizando os valores conhecidos de f

$$\{f(X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_N}) : i_1 = 1, \dots, n_1, \dots, i_N = 1, \dots, n_N\}. \quad (3.7)$$

onde os pontos onde se conhece os resultados são uniformemente espaçados formando uma grade. Utilizando-se esses valores para a definição dos intervalos, têm-se

$$(X_{I_1}, X_{I_1+1}), \dots, (X_{I_N}, X_{I_N+1}), \quad (3.8)$$

de tal forma que,

$$X_{I_1} \leq x_1 \leq X_{I_1+1}, \dots, X_{I_N} \leq x_N \leq X_{I_N+1}. \quad (3.9)$$

Cada um dos intervalos é mapeado para um intervalo $(0, 1)$. Assim, a função a ser aproximada passa a ser $g(y_1, \dots, y_N)$ e a função de interpolação será $G(y_1, \dots, y_N)$ gerando um N-cubo unitário dado por

$$\Omega = \{(y_1, \dots, y_N) : 0 \leq y_1 \leq 1, \dots, 0 \leq y_N \leq 1\} \quad (3.10)$$

usando-se os valores conhecidos

$$\{g(j_1, \dots, j_N) : j_1 = 0 \text{ ou } 1, \dots, j_N = 0 \text{ ou } 1\}, \quad (3.11)$$

onde

$$y_i = \frac{x_i - X_{I_i}}{X_{I_i+1} - X_{I_i}} \text{ e } g(j_1, \dots, j_N) = f(X_{I_1+j_1}, \dots, X_{I_N+j_N}). \quad (3.12)$$

Assim, um interpolador multilinear por partes F_M pode ser computado recursivamente:

$$F_M = G(y_1, \dots, y_N) = G(y_1, \dots, y_{N-1}, 0) + y_N G^{y_N}(y_1, \dots, y_N), \quad (3.13)$$

onde

$$G^{y_N}(y_1, \dots, y_N) = G(y_1, \dots, y_{N-1}, 1) - G(y_1, \dots, y_{N-1}, 0). \quad (3.14)$$

De forma geral,

$$G(y_1, \dots, y_i, j_{i+1}, \dots, j_N) = G(y_1, \dots, y_{i-1}, 0, j_{i+1}, \dots, j_N) + y_i G^{y_i} G(y_1, \dots, y_{i-1}, y_i, j_{i+1}, \dots, j_N). \quad (3.15)$$

onde

$$G(y_1, \dots, y_i, j_{i+1}, \dots, j_N) = G(y_1, \dots, y_{i-1}, 1, j_{i+1}, \dots, j_N) - G(y_1, \dots, y_{i-1}, 0, j_{i+1}, \dots, j_N) \quad (3.16)$$

e

$$G(j_1, \dots, j_N) = g(j_1, \dots, j_N). \quad (3.17)$$

Como exemplo, dado $N = 2$, renomeando $y_1 = x$ e $y_2 = y$,

$$G_M = G(x, y) = G(x, 0) + y(G(x, 1) - G(x, 0)), \quad (3.18)$$

onde

$$G(x, 0) = G(0, 0) + x(G(1, 0) - G(0, 0)) \quad (3.19)$$

$$G(x, 1) = G(0, 1) + x(G(1, 1) - G(0, 1)) \quad (3.20)$$

onde $G(0, 0)$, $G(0, 1)$, $G(1, 0)$ e $G(1, 1)$ são valores conhecidos.

4 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

Neste capítulo será apresentada uma aplicação para o uso de metamodelos e consequentemente o sistema desenvolvido ao longo desse trabalho. Análise de confiabilidade estrutural é uma ferramenta muito utilizada para determinar qual a probabilidade de falha de um determinado sistema.

4.1 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL (C)

Confiabilidade é uma probabilidade que reflete a segurança de uma estrutura em termos de cumprir a função para a qual foi projetada, ao longo da vida útil e dentro do orçamento definido, respeitando os parâmetros de projeto. A falha é definida como qualquer estado em que não se cumpra algum desses parâmetros (BECK, 1999). A probabilidade de falha, P_f , é complementar à confiabilidade e é definida como apresentado na Equação 4.1:

$$P_f = 1 - C \quad (4.1)$$

4.2 ESTADO LIMITE

Estado indesejado é quando uma determinada estrutura deixa de cumprir os requisitos para o qual foi projetada. A forma como esse estado indesejado é atingido é denominada de modo de falha, que é um modelo físico de uma falha estrutural. Cada modo de falha origina um estado limite.

4.3 EQUAÇÃO DE ESTADO LIMITE

Um modo de falha é definido através de uma equação de estado limite, a qual divide o domínio em região de sucesso (D_s) e região de falha (D_f). Para cada estado limite uma equação de estado limite é escrita em função das variáveis de projeto x como:

$$g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (4.2)$$

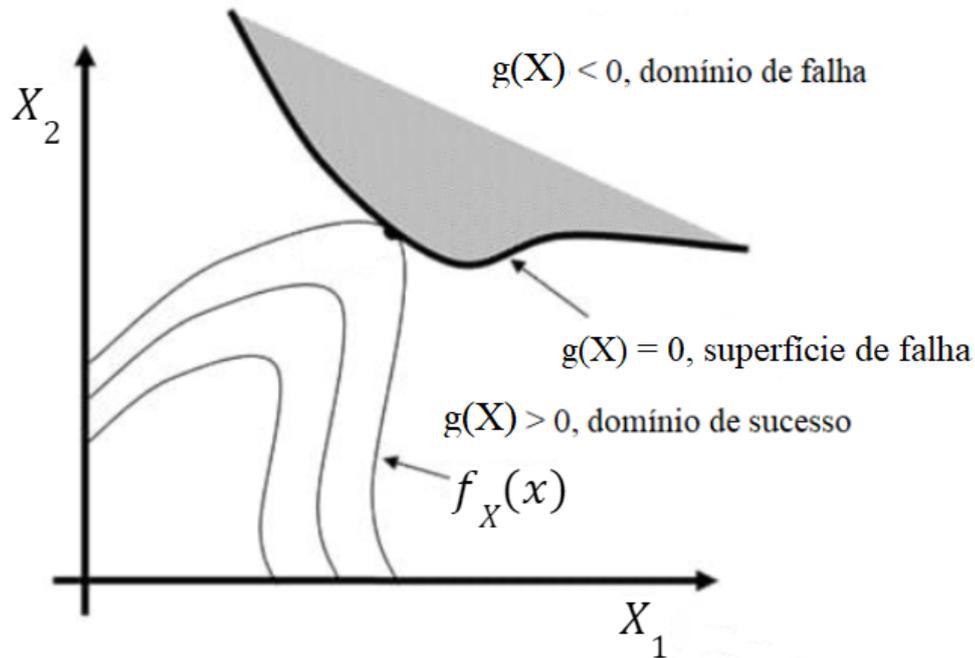
Os domínios de sucesso e falha são definidos como:

$$D_f = \{x | g(x) \leq 0\} \quad (4.3)$$

$$D_s = \{x | g(x) > 0\} \quad (4.4)$$

Dessa forma, a equação de estado limite estabelece a fronteira entre o domínio de falha e o domínio de sucesso, como apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Representação dos domínios de falha e sucesso.



Fonte: o autor.

4.4 MODELOS DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Uma questão fundamental nos projetos de engenharia é a qualidade e quantidade da informação estatística a respeito de fenômenos envolvidos nos projetos. Normalmente, a informação estatística disponível são as distribuições marginais das variáveis aleatórias e os coeficientes de correlação entre pares de variáveis aleatórias. Dessa forma, as soluções em confiabilidade estrutural incluem uma função de densidade de probabilidade (FDP) conjunta $f_X(x)$ para as variáveis aleatórias.

Segundo Bjerager (1990) os modelos de confiabilidade estrutural podem ser divididos em 3 tipos: modelos para variáveis aleatórias, modelos para processos estocásticos e modelos para campos estocásticos. Neste trabalho o foco será no primeiro tipo de modelo e que será apresentado a seguir. Dentre os modelos citados, o modelo para variáveis aleatórias é o mais simples. A equação de estado limite depende apenas de variáveis aleatórias:

$$g(x) = 0 \quad (4.5)$$

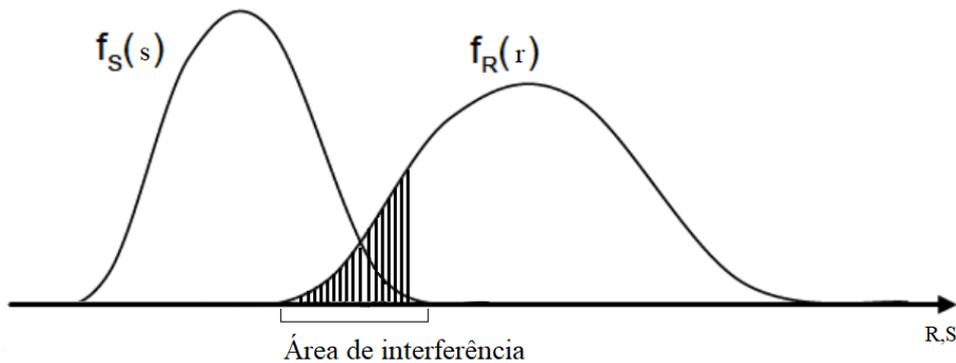
A probabilidade de falha é obtida através da integração da FDP conjunta das variáveis aleatórias no domínio de falha:

$$P_f = \int_{D_f} f_X(x) dx \quad (4.6)$$

Um modelo de confiabilidade estrutural para variáveis aleatórias muito comum é o de interferência entre populações. Na área de estruturas é comum se caracterizar esse

modelo com apenas duas variáveis aleatórias, resistência e solitação, respectivamente, R e S . Assim, para garantir que uma estrutura não vai falhar $R > S$. Como apresentado na Figura 15, como R e S são variáveis aleatórias há uma área onde $R \leq S$, o que caracteriza a falha, que é indicada pela área hachurada entre as PDFs.

Figura 15 – Interferência entre variáveis aleatórias.



Fonte: o autor.

A relação entre as variáveis pode ser escrita como: $R - S \leq 0$. A função de distribuição de densidade conjunta que representa a distribuição de $R - S$ é $f_{R,S}(r, s)$. A probabilidade de falha pode ser calculada da seguinte forma:

$$P_f = P(R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^S f_{R,S}(r, s) dr ds \quad (4.7)$$

4.5 FORM

O Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (First Order Reliability Method, FORM) foi proposto por Hasofer e Lind (1974) e é capaz de lidar com funções de estado limite não-lineares e variáveis aleatórias não-normais e correlacionadas (MANOJ, 2016). A denominação do método se deve ao uso de séries de Taylor de 1ª ordem para a linearização da equação de estado limite. O FORM usa apenas a média e o desvio padrão das variáveis aleatórias (MANOJ, 2016).

O FORM consiste em linearizar a equação de estado limite em um ponto adequado, de forma a obter uma aproximação para a solução da expressão:

$$P_f = \int_{D_f} f_X(x) dx \quad (4.8)$$

O ponto mais adequado para a linearização é o ponto mais provável de falha (MPP), em torno do qual está o maior conteúdo de probabilidade da FDP conjunta, no domínio de falha. Este ponto se localiza sobre a superfície de falha, $g(x) = 0$, e é o ponto mais próximo à origem do espaço de variáveis aleatórias. Assim, a probabilidade de falha é dada por:

$$P_f = \phi(-\beta_{HL}) \quad (4.9)$$

onde β_{HL} é a menor distância entre o ponto mais provável e a origem do espaço das variáveis aleatórias e ϕ é a função de probabilidade acumulada (*FPA*) normal padrão.

A precisão da aproximação do FORM depende do grau de linearidade da equação de estado limite em torno do ponto de projeto. A aproximação é assintótica, melhora à medida que β_{HL} aumenta. O erro do FORM aumenta à medida que aumenta o número de variáveis aleatórias do problema. Além disso, o método não fornece uma maneira de estimar o erro (BECK, 1999). O algoritmo pode ser dividido em 3 partes:

1. transformação da FDP conjunta do espaço original de projeto X para o espaço normal padrão Y ;
2. cálculo das coordenadas do ponto de projeto em Y , através de um algoritmo de otimização;
3. aproximação de 1ª ordem da $P_f = \phi(-\beta_{HL})$ no ponto de projeto.

4.6 TRANSFORMAÇÃO PARA O ESPAÇO NORMAL

No mundo real a ocorrência de distribuições marginais limitadas, ou assimétricas, a existência de correlação entre as variáveis aleatórias, perturba a simetria necessária para o cálculo do ponto de projeto. Desse modo, aplicar o método de primeira ordem exige que se converta a FDP conjunta $f_X(x)$ qualquer em uma distribuição $f_Y(y)$ multi-normal padrão (com média zero e desvio padrão unitário). Esta transformação mapeia pontos e vetores do espaço de projeto X para o espaço Y .

Considera-se que as informações disponíveis a respeito do problema permitem determinar as distribuições marginais e momentos de 1ª e 2ª ordem, respectivamente, média e variância, da variável aleatória, bem como o coeficiente de correlação entre cada par de variáveis aleatórias. A transformação para o espaço normal padrão inclui um modelo para a FDP conjunta do problema $f_X(x)$ desconhecida.

4.6.1 Transformação de Rosenblatt

Dado um vetor $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ de n variáveis aleatórias com uma função de probabilidade acumulada conjunta qualquer $F_X(x)$, procura-se uma transformação do domínio X para o domínio Y , para gerar um vetor de variáveis aleatórias $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ normais padrão independentes (BECK, 1999; MELCHERS; BECK, 2018; LEBRUN; DUTFOY, 2009).

A transformação de Rosenblatt (MELCHERS; BECK, 2018) é obtida fazendo-se:

$$\phi [y_1] = F_1(x_1) \tag{4.10}$$

$$\phi [y_2] = F_2(x_2|x_1) \tag{4.11}$$

⋮

$$\phi [y_n] = F_n(x_n|x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) \quad (4.12)$$

onde $F_2(x_2|x_1)$ é a probabilidade condicional de x_2 dada a ocorrência de x_1 .
Invertendo-se $\phi []$, têm-se:

$$y_1 = \phi^{-1} [F_1(x_1)] \quad (4.13)$$

$$y_2 = \phi^{-1} [F_2(x_2|x_1)] \quad (4.14)$$

⋮

$$y_n = \phi^{-1} [F_n(x_n|x_1, x_2, \dots, x_{n-1})] \quad (4.15)$$

A função de densidade de probabilidade condicional $f_i()$ é dada por:

$$f_i(x_i|x_1, x_2, \dots, x_{i-1}) = \frac{f_{X_i}(x_1, x_2, \dots, x_i)}{f_{X_{i-1}}(x_1, x_2, \dots, x_{i-1})} \quad (4.16)$$

onde $f_{X_i}(x_1, x_2, \dots, x_i)$ é a função de densidade de probabilidade marginal, obtida através de:

$$f_{X_i}(x_1, x_2, \dots, x_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_{i+1} \dots dx_n \quad (4.17)$$

$F_i()$ é então obtida integrando-se $f_i()$ sobre x_i :

$$F_i(x_i|x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f_{X_i}(x_1, x_2, \dots, x_i, t) dt}{f_{X_{i-1}}(x_1, x_2, \dots, x_{i-1})} \quad (4.18)$$

Para aplicar a transformação de Rosenblatt é necessário o conhecimento da função densidade de probabilidade conjunta $f_X(x)$, que na maioria dos problemas práticos é desconhecida. Neste trabalho as variáveis aleatórias serão consideradas independentes, logo, a função densidade de probabilidade conjunta é dada por:

$$f_X(x) = f_{Y,Z}(y, z) = f_Y(y) \cdot f_Z(z) \quad (4.19)$$

Dessa forma, a função densidade de probabilidade conjunta pode ser calculada. Para os casos onde não se tem conhecimento da função de probabilidade conjunta pode-se usar a transformação de Nataf (MELCHERS; BECK, 2018).

4.7 CÁLCULO DAS COORDENADAS DO MPP

Para fazer a avaliação de β_{HL} é necessário localizar o MPP, que é o ponto y^* localizado na superfície de falha e que é o ponto mais próximo à origem do espaço normal padrão. Assim, podemos expressar essa busca como um problema de otimização com as seguintes características:

$$\begin{aligned} \text{minimize } & f(y) = \sqrt{y^T \cdot y}, \\ \text{sujeito a: } & g(y) = 0. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Onde f é a função objetivo, com $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ e $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ é a superfície de falha.

Existem muitas maneiras de se resolver o problema apresentado na Equação 4.20, dentre elas está o método modificado de Hasofer, Lind, Rackwitz e Fiessler (HLRF-M), que é muito utilizado na implementação do FORM, por ser mais simples de implementar do que outros métodos, como o de programação quadrática sequencial, além de ser eficiente (BECK, 1999). O algoritmo HLRF-M será apresentado a seguir.

4.8 ALGORITMO HLRF-M

O algoritmo HLRF foi proposto por Hasofer e Lind e então estendido por Rackwitz e Fiessler (HASOFER; LIND, 1974; RACKWITZ; FLESSLER, 1978), é um algoritmo clássico e largamente utilizado na implementação do FORM. Este algoritmo apresenta um problema de convergência lenta ou não convergência para os casos em que a função de estado limite é altamente não linear. Liu e Kiureghian (1986), Liu e Kiureghian (1991) propuseram uma versão modificada do HLRF (HLRF-M), que introduziu um parâmetro para o tamanho dos passos e uma função mérito para induzir a convergência.

Através do algoritmo HLRF clássico o ponto é obtido através da seguinte equação:

$$y_{K+1} = \frac{1}{\|\nabla g(y_K)\|^2} [\nabla g(y_K)^T y_K - g(y_K)] \nabla g(y_K) \quad (4.21)$$

onde o vetor $y \in \mathbb{R}^n$ é definido no espaço normal padrão e $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ é a superfície de falha.

Devido a falta de convergência do algoritmo foram propostas, nos trabalhos de Liu e Kiureghian, formas de transpor esse problema no algoritmo HLRF-M. Os autores combinaram a direção de busca dada por:

$$d_k = y_{K+1} - y_K = \frac{y_K \cdot \nabla g(y_K) - g(y_K)}{\|\nabla g(y_K)\|^2} \nabla g(y_K) - y_K \quad (4.22)$$

com uma busca linear nessa direção. Essa busca é realizada até ser atingido um determinado limiar da função mérito, $m(y)$. A seguinte função foi utilizada:

$$m(y_K) = \frac{1}{2} \left| y_K - \frac{y_K \cdot \nabla g(y_{K-1})}{\|\nabla g(y_{K-1})\|^2} \cdot \nabla g(y_{K-1}) \right|^2 + \frac{1}{2} \cdot c \cdot g(y_K)^2 \quad (4.23)$$

onde c é uma constante positiva. Utilizando essa função de mérito têm-se uma melhora considerável na convergência do algoritmo, mas ela pode ter mínimos que não são solução da equação 4.21 e d_K pode não ser a direção de descida de $m(y_k)$. Assim, a convergência global do HLRF-M não é garantida.

4.9 IMPLEMENTAÇÃO

Neste trabalho foi utilizada a biblioteca PYRE (HACKL, 2018) que implementa alguns algoritmos para o cálculo da avaliação de confiabilidade, dentre eles, o método de Monte Carlo, o FORM e o SORM. O Modelo de confiabilidade utilizado foi o de interferência entre populações, e que possui a seguinte equação:

$$g_{R,S}(R, S) = R - S \quad (4.24)$$

onde R é a resistência da estrutura e S é a carga solicitante. No caso deste trabalho, R será definida como a P_f e denotará a pressão de ruptura do duto estimada através dos seguintes métodos PCORRC, DNV, RBF e interpolação multilinear, que foram apresentados no capítulo 4. S será definida como a pressão interna de serviço, P_0 , calculada através da fórmula de Barlow (ADAMS et al., 2018):

$$P_0 = \frac{2 \cdot \sigma_{esc} \cdot t}{D_E \cdot S_F} \quad (4.25)$$

onde σ_{esc} é a tensão de escoamento do aço do qual o duto é feito, t é a espessura da parede do duto, D_E é o diâmetro externo do duto e S_F é o fator de segurança, que é definido por norma. Dessa forma, a equação de estado limite ficará da seguinte forma:

$$g(D_E, L_{def}, \sigma_{esc}, \sigma_{ult}, P_0) = P_f - P_0 \quad (4.26)$$

onde D_E é o diâmetro externo do duto, t é a espessura da parede do duto, d a profundidade do defeito, L_{def} é o comprimento longitudinal do defeito, σ_{esc} é a tensão de escoamento do aço e σ_{ult} é a tensão última do aço.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da pesquisa. Primeiro serão apresentados os resultados da validação do procedimento de análise via método dos elementos finitos. A seguir os resultados de um estudo de convergência para a construção do modelo substituto RBF, em função da quantidade de variáveis aleatórias e a validação dos modelos substitutos RBF e interpolação multilinear, e por último a aplicação de modelos substitutos para a análise de confiabilidade utilizando o método FORM.

5.1 VALIDAÇÃO DA ANÁLISE VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para validar o procedimento de análise não linear e o critério de falha, a pressão de falha obtida com simulações através de elementos finitos é comparada com cinco resultados de testes experimentais obtidos por testes de ruptura obtidos nos seguintes trabalhos Benjamin et al. (2006), Andrade et al. (2006) e Freire et al. (2011) e com resultados provenientes de métodos semi-empíricos de avaliação. Segundo Cosham e Hopkins (2002), neste trabalho foram utilizados métodos de avaliação de nível 2 que são procedimentos técnicos baseados para defeitos isolados.

As amostras tubulares, denominadas RDTS1, RDTS2, CDTS3, IDTS2 e IDTS8, com defeitos usinados com geometria retangular, foram consideradas tal como o apresentado na Figura 16 para o caso IDTS8, na Figura 17 é apresentada a região do defeito no modelo de elementos finitos, devido as condições de dupla simetria, apenas $\frac{1}{4}$ do modelo é gerado. Os dutos são feitos de aço API 5L X80 e suas propriedades foram medidas através de teste de tração uniaxial. A curva tensão verdadeira x deformação verdadeira para esse material é apresentada na Figura 18, ela foi gerada usando a relação de Ramberg e Osgood (1943) e a deformação última foi calculada usando a equação fornecida na norma API.

Nos testes de laboratório apresentados nas referências Benjamin et al. (2006), Andrade et al. (2006) e Freire et al. (2011), as amostras tubulares foram carregadas apenas com pressão interna e foram fechadas por soldagem de chapas lisas e espessas conhecidas como *endcaps*.

Essa configuração de duto para o experimento, aqui denominada duto com tampa, acaba gerando uma pressão longitudinal que é considerada nos modelos de elementos finitos, a equação para calcular essa carga foi apresentada na seção 4.1.

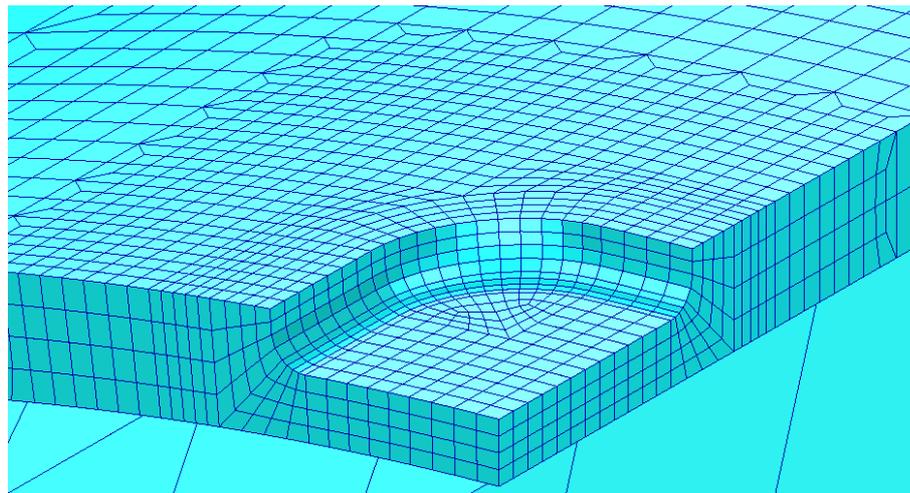
As principais dimensões das amostras de dutos e parâmetros de defeitos são mostradas na Tabela 5 e são: diâmetro externo D_e , espessura da parede do duto t , comprimento longitudinal do defeito L_d , largura circunferencial do defeito w , profundidade d .

Figura 16 – Foto do defeito usinado IDTS8.



Fonte: BENJAMIN et al..

Figura 17 – Região do defeito de 1/4 do modelo de elementos finitos do espécime IDTS8.



Fonte: O autor.

Tabela 5 – Dados de cada modelo.

Espécime	D_e (mm)	t (mm)	L_d (mm)	w (mm)	d (mm)	Material	fonte
RDTS1	459,00	8,10	208,00	32,10	2,36	API 5L X80	(FREIRE et al., 2011)
RDTS2	459,00	8,10	208,00	32,10	4,05	API 5L X80	(FREIRE et al., 2011)
CDTS3	459,00	8,10	40,00	445,00	6,01	API 5L X80	(FREIRE et al., 2011)
IDTS2	458,80	8,10	39,60	31,90	5,39	API 5L X80	(ANDRADE et al., 2006)
IDTS8	459,40	8,00	40,05	32,00	3,75	API 5L X80	(BENJAMIN et al., 2006)

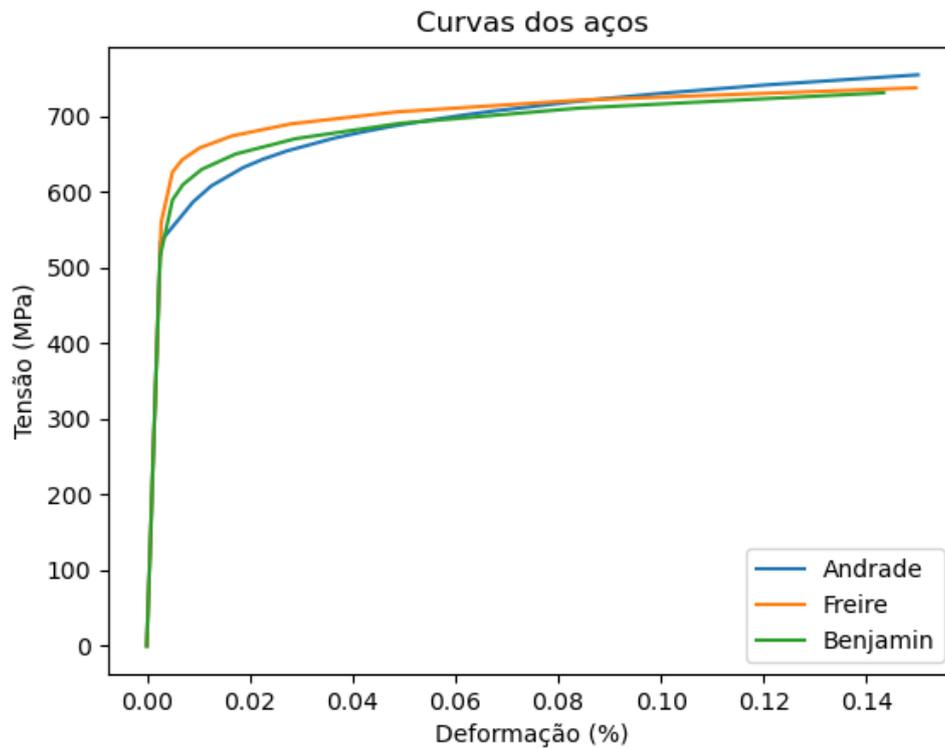
A Tabela 6 apresenta os resultados de teste experimental e calculado através do método dos elementos finitos, usando o code_aster e o programa desenvolvido pelo grupo de pesquisa CORDUT. Além disso, também estão apresentados os erros de cada um dos

programas. Tais erros foram calculados utilizando-se a Equação 5.1

$$\frac{P_F - P_{Exp}}{P_{Exp}} * 100\% \quad (5.1)$$

onde, P_F é a pressão de falha obtida numericamente e P_{Exp} é a pressão de falha experimental.

Figura 18 – Curvas tensão verdadeira em função da deformação verdadeira dos espécimes testados.



Fonte: O autor.

Tabela 6 – Pressões de falha experimental e por elementos finitos

Espécime	$P_{f_{exp}}$ (MPa)	$P_{f_{CA}}$ (MPa)	P_{f_C} (MPa)	E_{CA} (%)	E_C (%)
RDTS1	22,73	21,00	22,25	-7,61	-2,11
RDTS2	17,36	16,00	17,10	-7,83	-1,49
CDTS3	20,51	18,00	19,73	-12,24	-3,80
IDTS2	22,679	21,75	22,34	-4,09	-1,49
IDTS8	24,2	24,00	24,24	-0,83	0,16

Na Tabela 6 o $P_{f_{exp}}$ se refere a pressão de falha obtida através de ensaios destrutivos, $P_{f_{CA}}$ se refere a pressão de falha obtida através do software Code_Aster, P_{f_C} é a pressão de falha obtida através do software CORDUT, E_{CA} é o erro percentual obtido através do Code_Aster e E_C se refere aos erros obtidos através do CORDUT. Como é possível observar na Tabela 6, os resultados obtidos através de elementos finitos são bem próximos

ao obtido experimentalmente. Sendo os resultados do Code_Aster mais conservadores e a favor da segurança do que os obtidos através do CORDUT.

5.2 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA

Para a criação do banco de dados foram combinados os dados apresentados na Tabela 3, na Seção 3.3, no total foram realizadas 267.300 análises não lineares, como dito anteriormente, esses parâmetros dos defeitos foram escolhidos devido a dados presentes em relatórios de inspeção aos quais o autor teve acesso.

Na Tabela 7 são apresentados os tempos para cada um dos métodos estimar a pressão de falha de um dado modelo, todos os tempos estão em segundos. Como é possível observar, o tempo dos métodos semi-empíricos é aproximadamente zero, pois é uma chamada de função para resolver uma equação analítica, não sendo possível medir o tempo de resposta, mesmo considerando microssegundos. Para o caso dos metamodelos, foi considerado o tempo de criação do modelo, que nesse caso inclui a requisição dos dados ao servidor, a criação do modelo e a estimativa da pressão. No modelo RBF ainda se leva em consideração a criação das amostras via LHS. Já no caso do método de elementos finitos não foi considerado o tempo de criação do modelo, que em relação ao tempo da análise pode ser desconsiderado, nos modelos aqui apresentados foi utilizado o gerador automático de modelos de elementos finitos desenvolvido pelo grupo PADMeC em parceria com o CENPES/PETROBRAS, o tempo total de criação do maior modelo foi de aproximadamente 6 minutos.

Tabela 7 – Comparativo dos tempos de execução de métodos semi-empíricos, modelos substitutos e método dos elementos finitos.

Preditor	Interpolação	RBF	DNV	PCORRC	MEF
Tempo (s)	0,01	0,02	≈ 0	≈ 0	3473

Cada análise não linear leva em média 30 minutos para ser concluída, nos modelos maiores a análise chegou a durar 32h. Se todos esses modelos fossem analisados de maneira sequencial, seriam necessários um pouco mais de 15 anos para executar todas as análises. Dessa maneira, a execução em paralelo no cluster tornou viável a análise de todos os casos em tempo hábil.

5.3 METAMODELOS

Nesta seção é avaliada a possibilidade de utilização dos metamodelos para a estimativa da pressão de falha de dutos com defeitos idealizados. Inicialmente será feito um estudo de convergência do erro da pressão de falha em relação ao número de amostras para os modelos gerados utilizando funções de base radial. Em seguida, é feita uma validação dos modelos substitutos, RBF e interpolação multilinear, em comparação aos resultados

obtidos através do método dos elementos finitos e com resultados obtidos através de algumas normas de nível 2.

5.3.1 Estudo de convergência do modelo substituto via RBF

Como foi apresentado na seção 4.4.3, o processo de amostragem foi realizado usando a técnica LHS. Para o estudo de convergência, foram utilizadas cinco variáveis aleatórias: espessura da parede do duto (t), diâmetro externo (D_e), tensão última (σ_u), profundidade do defeito (d) e comprimento longitudinal do defeito (L_d). Dessa forma, foram definidos 3 modelos para avaliar a convergência:

- RBF2N, modelo com o dobro de amostras do que variáveis, ou seja, 10 amostras;
- RBF5N, modelo com o número de amostras igual a cinco vezes o número de variáveis, no caso, serão 25 amostras;
- RBF10N, modelo onde o número de amostras é igual a 10 vezes o número de variáveis, assim, serão 50 amostras;
- RBF15N, modelo onde o número de amostras é igual a 15 vezes o número de variáveis, dessa forma, serão 75 amostras;
- RBF20N, modelo onde o número de amostras é igual a 20 vezes o número de variáveis, ou seja, serão 100 amostras.

Os modelos citados acima foram construídos do mesmo modo, com amostragem via LHS, utilizando os mesmos intervalos entre as 5 variáveis aleatórias. No entanto, como o LHS foi utilizado separadamente para cada um deles, as amostras são diferentes. Para cada uma das amostras, foi feita uma solicitação para o banco de dados para requisitar a pressão de falha calculada via método dos elementos finitos. Dessa forma, os modelos de elementos finitos serão considerados os modelos de alta fidelidade.

Com a finalidade de ter um referencial de comparação, foi gerada uma nova amostragem com 4 casos, e as respectivas pressões de falha foram calculadas utilizando elementos finitos. Vale ressaltar que esses 4 casos foram gerados utilizando o LHS de forma independente de qualquer dado utilizado para a geração dos modelos utilizados.

Em seguida, os metamodelos de RBF *Thin Plate Spline* foram cada um dos modelos acima citados (RBF2N, RBF5N, RBF10N, RBF15N e RBF20N), e as pressões de falha foram solicitadas através da API e também usando cada um dos metamodelos dos três modelos estudados, e os resultados dessa comparação estão mostrados na Tabela 8, com os respectivos valores de pressão de falha.

Como maneira de melhor visualizar o comportamento dos modelos, também foi calculado o erro percentual, apresentado na Equação 5.1, para cada amostra, para cada um

Tabela 8 – Comparação entre os valores de pressão de falha previstos pelos modelos de alta fidelidade e metamodelos de RBF.

Espécime	MEF (MPa)	RBF2N (MPa)	RBF5N (MPa)	RBF10N (MPa)	RBF15N (MPa)	RBF20N (MPa)
Caso 1	17,05	11,79	16,29	16,59	16,62	16,49
Caso 2	12,9	10,84	14,01	12,51	12,52	14,57
Caso 3	14,82	18,44	16,50	14,50	14,51	14,49
Caso 4	11,97	6,41	12,65	11,86	12,03	12,14

dos 5 modelos substitutos, e os resultados estão apresentados na Tabela 9. Ao analisar as tabelas 8 e 9 se percebe a convergência que existe com o aumento do número de amostras utilizadas na construção do modelo substituto. Observa-se, na Tabela 9, que os valores de erros percentuais para o metamodelo RBF10N estão inferiores a 4% para todas as amostras avaliadas, e a média desses erros fica em torno de 2%, para esse modelo com mais amostras. Além disso, com o aumento no número das amostras no modelo RBF15N se observa que não houve grande variação no erro, assim indicando a convergência em relação ao modelo RBF10N. Já no modelo RBF20N se observa o aumento no erro, o que indica que houve um *overfitting* do modelo aos dados. O *overfitting* acontece quando um modelo estatístico se ajusta muito bem a um determinado conjunto de dados observados anteriormente, mas que não consegue prever novos resultados fora desse conjunto inicial.

Tabela 9 – Comparação entre os erros absolutos percentuais previstos pelos modelos de baixa fidelidade.

Espécime	RBF2N (%)	RBF5N (%)	RBF10N (%)	RBF15N (%)	RBF20N (%)
Caso 1	30,85	4,48	2,69	2,50	3,25
Caso 2	15,97	-8,60	3,02	2,95	-12,97
Caso 3	-24,43	-11,33	2,16	2,10	2,23
Caso 4	46,45	-5,68	0,92	-0,50	-1,43

5.3.2 Validação dos metamodelos

Para validar a utilização dos metamodelos utilizados neste trabalho para dutos com defeitos idealizados, em seguida foram gerados vinte novos casos de maneira aleatória e foram submetidos à análise não linear. A pressão de falha calculada foi comparada com os modelos substitutos gerados a partir do RBF e da interpolação multilinear, e com as normas B31G, DNV e PCORRC. Por fim, os resultados dos metamodelos e das normas foram comparadas com os resultados experimentais.

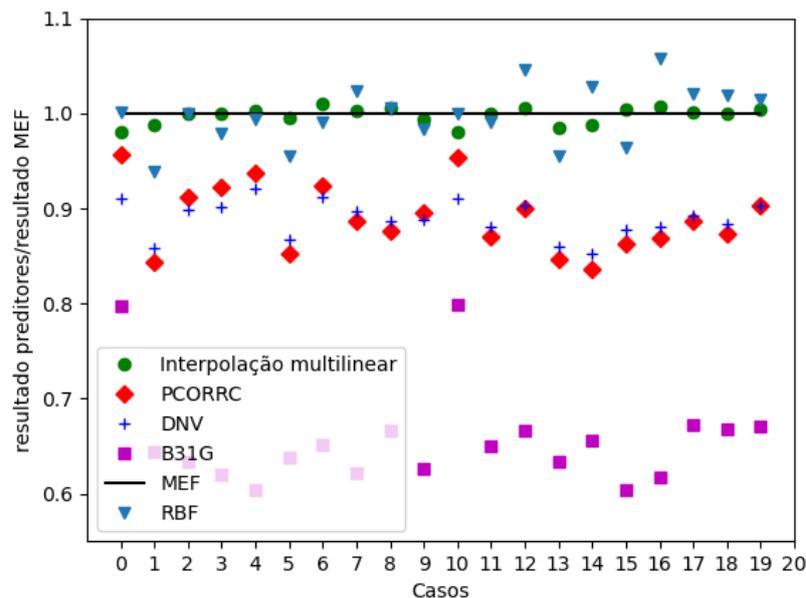
Na Figura 19 são apresentados os resultados da razão entre a pressão de falha prevista calculada usando análise de elementos finitos e a calculada utilizando normas e modelos substitutos. Nela podemos observar que os resultados obtidos com os modelos substitutos foram mais próximos dos que os observados com as normas, além disso, a

interpolação linear apresentou resultados mais próximos ao do MEF do que os obtidos através do modelo de RBF, apesar de em ambos os casos a diferença apresentada entre os resultados dos preditores e o de alta fidelidade ser inferior à $\pm 10\%$. E os resultados do modelo de interpolação linear são mais em favor da segurança do que os do RBF.

Segundo levantamento realizado por Li et al. (2022), os seguintes métodos foram os mais utilizados para verificar a acurácia de modelos substitutos na última década RMSE, R^2 , MSE, MAE e MAPE, suas equações estão apresentadas nas equações 5.2 a 5.6. Quanto mais próximo de zero os valores obtidos através dos métodos RMSE, MSE, MAE e MAPE melhor é o comportamento do preditor utilizado. Já no caso do método R^2 , quanto mais próximo de um é o resultado obtido, melhor o preditor consegue estimar os valores e quanto mais o resultado se afasta de 1, em direção a $-\infty$, pior é o preditor.

Os mesmos vinte casos foram utilizados para calcular os erros de cada um dos preditores, como apresentado na Tabela 10. Como é possível observar, os valores obtidos através das normas foram piores do que os obtidos através dos modelos substitutos, sendo os valores obtidos pela norma B31G os mais distantes dos obtidos pelo análise de elementos finitos. Os valores observados para a DNV e a PCORRC são bem próximos entre si. Já os modelos substitutos obtiveram resultados bem próximos aos oriundos de elementos finitos, sendo o modelo de interpolação multilinear o que obteve os menores erros.

Figura 19 – Comparação entre a pressão de falha calculada utilizando MEF e os preditores.



Fonte: O autor.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5.2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2} \quad (5.3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (5.5)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (5.6)$$

Onde:

- n é o número de casos que serão analisados;
- y_i é a i -ésima pressão de falha calculada através da análise de elementos finitos, aqui sendo considerado o valor real ou observado;
- \hat{y}_i é a i -ésima pressão de falha calculada através dos preditores, ou seja, o valor predito;
- \bar{y} é a média dos valores observados, nesse caso, a média dos valores obtidos através de elementos finitos.

Tabela 10 – Comparativo dos erros obtidos através de métodos semi-empíricos e modelos substitutos.

Preditor	RMSE	MAE	R^2	MAPE (%)	MSE
Interpolação	0,13679447	0,09568368	0,99783565	0,67270448	0,01871273
RBF	1,04180308	1,18193679	0,91030229	4,80947345	1,07059921
DNV	1,52745651	1,52745651	0,73014684	11,07363319	2,33312340
B31G	4,51913253	4,51913253	-1,36210907	34,28799660	20,42255883
PCORRC	1,54763364	1,54763364	0,72297043	10,97190563	2,39516990

Na Tabela 11 são apresentados os resultados obtidos através de resultados experimentais, análise por elementos finitos, code_aster e Cordut, metamodelos, interpolação multi-linear e RBF, e as normas DNV e PCORRC. Na Tabela 12 são apresentados os erros obtidos em cada um dos preditores em relação ao resultado experimental. Como é possível observar na Tabela 12 os metamodelos apresentaram resultados próximos aos obtidos através do MEF, o que é esperado, visto que os dados de entrada dos modelos são oriundos de análises de elementos finitos. As normas apresentaram bons resultados, apesar de alguns casos darem contra a segurança como no caso do espécime CDTS3, onde a DNV apresentou um erro de 15,41% a mais e a PCORRC apresentou um erro de 3,36% além do valor experimental.

Tabela 11 – Pressões de falha experimental e preditores (MPa)

Espécime	Experimental	Code_aster	Cordut	DNV	PCORRC	Multi-linear	RBF
RDTS1	22,73	21,00	22,25	20,51	21,51	20,82	20,63
RDTS2	17,36	16,00	17,10	16,31	17,46	16,12	15,24
CDTS3	20,51	18,00	19,73	23,67	21,2	17,55	17,87
IDTS2	22,679	21,70	22,34	24,63	21,99	21,54	22,35
IDTS8	24,2	24,00	24,24	23,95	24,01	23,81	24,15

Tabela 12 – Erro pressões de falha experimental e preditores (%)

Espécime	Code_aster	Cordut	DNV	PCORRC	Multi-linear	RBF
RDTS1	7,61	2,11	9,77	5,37	8,40	9,24
RDTS2	7,83	1,49	6,04	-0,57	7,14	12,21
CDTS3	12,24	3,80	-15,41	-3,36	14,43	12,87
IDTS2	4,09	1,49	-8,60	3,04	5,02	1,45
IDTS8	0,83	-0,16	4,17	0,78	1,61	0,21

5.4 APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A ferramenta apresentada neste trabalho para avaliação de integridade estrutural de dutos com defeitos de corrosão foi aplicada para o cálculo do índice de confiabilidade para o caso de um duto com defeito idealizado e não interagente. Serão apresentados resultados provenientes de métodos semi-empíricos e de metamodelos para a determinação da pressão de falha deste tipo de estrutura para a análise de confiabilidade. Para isso foi aplicado o método analítico de primeira ordem FORM para determinar o índice de confiabilidade.

Foram adotadas seis variáveis aleatórias diretamente ligadas aos parâmetros geométricos do duto e do defeito, bem como o carregamento aplicado e propriedades do material. Os parâmetros considerados como variáveis aleatórias são:

- diâmetro externo do duto (D_E);
- espessura da parede do duto (t);
- comprimento longitudinal do defeito (L_D);
- profundidade do defeito (d);
- tensão de ruptura do material (σ_u);
- pressão de serviço (P_0).

Na Tabela 13 são apresentadas as características probabilísticas de cada uma das variáveis. As distribuições de probabilidade são definidas em DNV GL AS (2017) e em Ahammed e Melchers (1996).

A análise de confiabilidade foi aplicada aqui através do método analítico de primeira ordem FORM para a determinação do índice de confiabilidade. Os resultados da análise são apresentados na Tabela 14. Nessa tabela é possível observar que os modelos substitutos consumiram mais tempo de análise para fazer o cálculo da confiabilidade, apesar disso, o número de avaliações da função é inferior, o que indica que o consumo maior de tempo se deu na geração dos modelos, o que é esperado, visto que a cada iteração um novo modelo foi gerado. Como apresentado na Tabela 14, as probabilidades de falha são bem próximas para todos os métodos.

Tabela 13 – Variáveis aleatórias e seus parâmetros usados no exemplo do duto com defeito de corrosão.

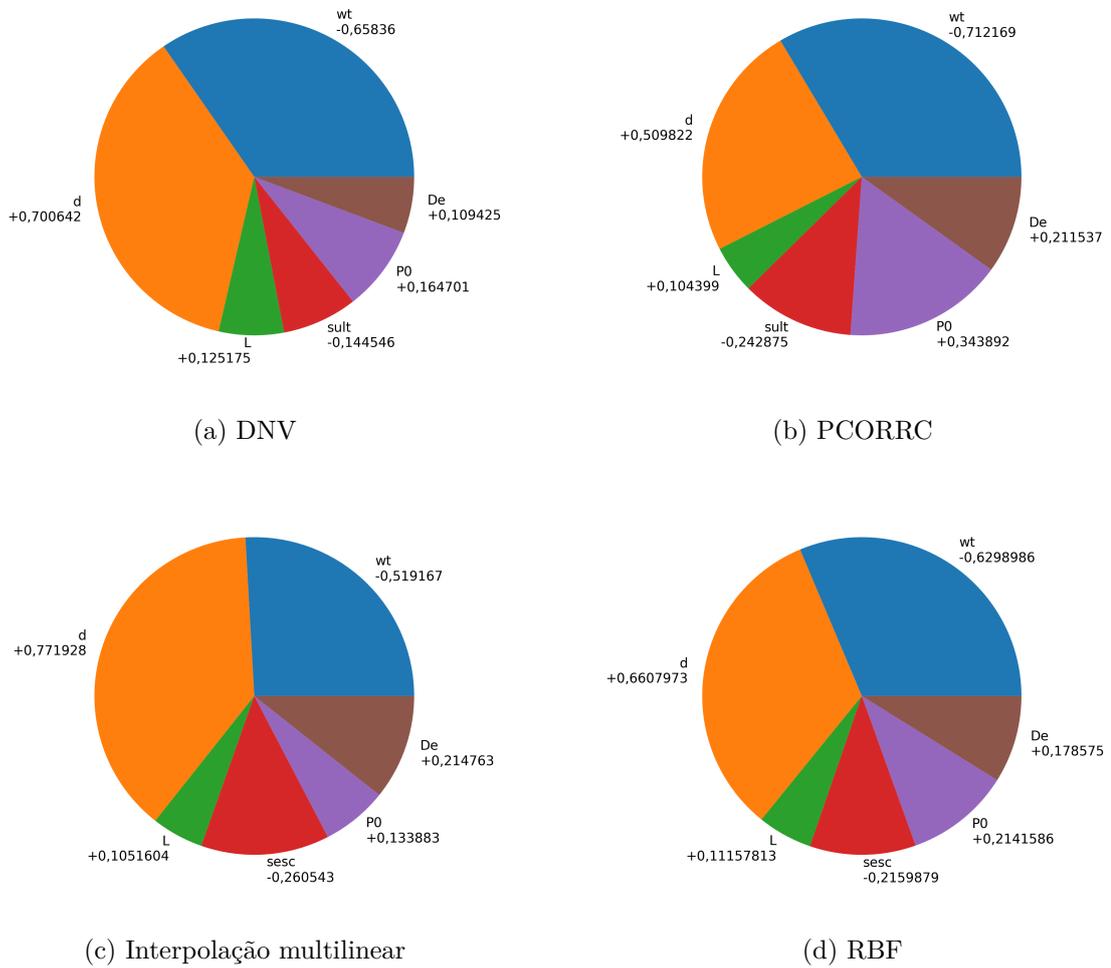
Variável	Distribuição	Média (μ)	Coefficiente de variação (cov)	Desvio padrão (σ)
P_0	Gumbel	1,05 x 12,51	3,0%	0,394
D_E	Normal	406,4	3,0%	12,192
t	Normal	7,9	3,0%	0,237
σ_y	Normal	1,08 x 413,0	4,0%	17,842
σ_u	Normal	1,09 x 517,1	3,0%	16,609
L_D	Normal	54,0	5,0%	2,700
d	Normal	4,0	10,0%	0,400

Tabela 14 – Comparativo dos resultados obtidos através de métodos semi-empíricos e modelos substitutos.

Preditor	Probabilidade de falha	β_{HL}	tempo (s)	Avaliações da função
Interpolação	$2,767 \times 10^{-05}$	4,031788	8	111
RBF	$3,494 \times 10^{-05}$	3,976645	9	120
DNV	$4,461 \times 10^{-05}$	3,918149	0,316	176
PCORRC	$4,941 \times 10^{-05}$	3,893432	0,114	150

Além disso, como apresentado na Figura 20, têm-se que a espessura da parede do duto (t) e a profundidade do defeito (d) são as duas variáveis que possuem mais influência na falha do duto, sendo que a primeira, quanto maior, menor a probabilidade de falha e quanto mais profundo é o defeito, maior é a probabilidade de falha. E as variáveis que têm menos influência na pressão de falha são o comprimento do defeito e o diâmetro externo do duto, e em ambos os casos, quanto mais essas variáveis aumentam, menor é a pressão de falha.

Figura 20 – Influência de cada variável na probabilidade de falha.



Fonte: O autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta seção apresenta as conclusões e as propostas de trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

Em relação aos resultados da aplicação do sistema para avaliação de integridade estrutural de dutos:

- Para a validação do método de análise não linear apresentado em Ferreira et al. (2021) foram avaliados cinco espécimes disponíveis na literatura e o resultados obtidos, em sua maioria apresentou um erro percentual inferior a 10%, além disso, os resultados sempre foram em favor da segurança. Os modelos utilizados foram gerados no programa CORDUT (CABRAL, 2007; CABRAL et al., 2017; CABRAL et al., 2019).
- Foi desenvolvido um banco de dados contendo os resultados de análises via método dos elementos finitos de dutos idealizados e com defeitos não interagentes causados por corrosão.
- Foi desenvolvida uma interface web que permite o acesso aos dados armazenados no banco de dados utilizando a arquitetura REST API, de forma que através do protocolo HTTP um programa pode consumir os dados disponíveis.
- Foram criados modelos substitutos utilizando os dados armazenados no sistema, um deles utilizando interpolação linear por partes e o outro utilizando funções de base radial. Foram feitos estudos comparando os dois modelos com resultados obtidos através de análise de elementos finitos e de normas semi-empíricas. Os modelos substitutos apresentaram resultados mais próximos aos obtidos através de elementos finitos do que as normas semi-empíricas, o que os torna bastante atraentes, pois possuem um baixo custo computacional e os resultados são próximos aos obtidos experimentalmente.
- Foi realizada uma análise de confiabilidade utilizando os modelos substitutos e também normas semi-empíricas. A probabilidade de falha dos modelos substitutos é um pouco menor do que as apresentadas pelas normas, além disso, o número de vezes que houve avaliação da função também foi inferior, chegando à 58% mais avaliações da função para a norma DNV em relação ao modelo de interpolação multilinear. Em relação ao tempo para executar as análises, os métodos semi-empíricos apresentaram valores bem inferiores. Dessa forma, as análises de confiabilidade

utilizando os métodos semi-empíricos é vantajosa, pois apesar do alto número de avaliações da função, ela ainda apresenta resultados próximos aos obtidos utilizando os metamodelos e com um tempo inferior.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade deste trabalho, foram definidas algumas propostas:

- Adicionar outras condições de contorno, de forma a deixar o sistema com uma abrangência maior de dados que permita simular dutos em outras condições além das experimentais, tais como dutos enterrados e dutos não enterrados.
- Adicionar outros carregamentos além da pressão interna, como, por exemplo, momentos fletores e cargas térmicas.
- Utilização dos dados armazenados no banco para aplicar em análises futuras que podem auxiliar no planejamento da manutenção dos dutos corroídos.
- Alimentar o banco de dados com outros tipos de defeitos, como defeitos circunferencialmente alinhados, defeitos longitudinalmente alinhados, defeitos do tipo pit, defeitos de geometria complexa.

REFERÊNCIAS

- The Barlow Equation for Tubular Burst: A Muddled History*, Day 3 Thu, March 08, 2018 de *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, (SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Day 3 Thu, March 08, 2018). D031S013R001. Disponível em: <<https://doi.org/10.2118/189681-MS>>. Citado na página 48.
- AFONSO, S. M.; HOROWITZ, B.; WILLMERSDORF, R. B. Comparative study of surrogate models for engineering problems. *ASMO-UK (Association for Structural and Multidisciplinary Optimization in the UK)*, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- AHAMMED, M.; MELCHERS, R. E. Reliability estimation of pressurised pipelines subject to localised corrosion defects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Elsevier, v. 69, n. 3, p. 267–272, dec 1996. ISSN 0308-0161. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0308016196000099>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 58.
- AMAYA-GÓMEZ, R. et al. *Reliability assessments of corroded pipelines based on internal pressure - A review*. 2019. Citado na página 18.
- ANDRADE, E. de F. *Otimização da locação e vazão de poços em reservatórios de petróleo utilizando algoritmos genéticos e modelos substitutos adaptativos*. Dissertação (Master Dissertation) — Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, PE, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 38.
- ANDRADE, E. Q. de et al. Finite element modeling of the failure behavior of pipelines containing interacting corrosion defects. In: *25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 315–325. Citado 3 vezes nas páginas 19, 49 e 50.
- ANSYS. *Ansys Release 16.2 Documentation*. 16.2. ed. Canonsburg, PA: Butterworth-Heinemann, 2016. Citado na página 23.
- ASME. *Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines*. [S.l.]: American Society of Mechanical Engineers, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.
- BAGHERI, M. et al. Hybrid intelligent method for fuzzy reliability analysis of corroded x100 steel pipelines. *Engineering with Computers*, v. 37, n. 4, p. 2559–2573, Oct 2021. ISSN 1435-5663. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00366-020-00969-1>>. Citado na página 18.
- BAYER, M. *Sqlalchemy*. In: BROWN, A.; WILSON, G. (Ed.). *The Architecture of Open Source Applications Volume II: Structure, Scale, and a Few More Fearless Hacks*. aosabook.org, 2012. Disponível em: <<http://aosabook.org/en/sqlalchemy.html>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 26 e 27.

BAZÁN, F. A. V.; BECK, A. T. Stochastic process corrosion growth models for pipeline reliability. *Corrosion Science*, v. 74, p. 50–58, 2013. ISSN 0010-938X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X13001364>>. Citado na página 18.

BECK, A. T. *Um metodo para analise de confiabilidade para elementos finitos*. Dissertação (Master Dissertation) — Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 42, 45 e 47.

BENJAMIN, A. C. et al. Burst Tests on Pipeline Containing Interacting Corrosion Defects. In: *24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: Volume 3*. ASME, 2005. p. 403–417. ISBN 0-7918-4197-9. Disponível em: <<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1575773>>. Citado na página 19.

BENJAMIN, A. C. et al. Burst tests on pipeline containing closely spaced corrosion defects. In: . [S.l.: s.n.], 2006. (International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 4: Terry Jones Pipeline Technology; Ocean Space Utilization; CFD and VIV Symposium), p. 103–116. Citado 3 vezes nas páginas 19, 49 e 50.

BHOWMIK, S. *Digital Twin of Subsea Pipelines: Conceptual Design Integrating IoT, Machine Learning and Data Analytics*. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 2019. 9 p. OTC. Disponível em: <<https://doi.org/10.4043/29455-MS>>. Citado na página 15.

BJERAGER, P. On computation methods for structural reliability analysis. *Structural Safety*, v. 9, n. 2, p. 79–96, 1990. ISSN 0167-4730. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167473090900016>>. Citado na página 43.

BRAY, T. *The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format*. RFC Editor, 2017. RFC 8259. (Request for Comments, 8259). Disponível em: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc8259>>. Citado na página 28.

BRITISH-PETROLEUM. *BP Statistical Review of World Energy*. [S.l.], 2020. Citado na página 13.

BRITISH-STANDARD. BS 7910: Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures. BSI, London, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.

BRUÈRE, V. et al. Failure pressure prediction of corroded pipes under combined internal pressure and axial compressive force. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 41, p. 172, 03 2019. Citado na página 19.

CABRAL, H. D. L. *Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais para Modelagem e Análise Automática de Defeitos de Corrosão em Dutos*. Dissertação (Master Dissertation) — Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, PE, 2007. In Portuguese. Citado 5 vezes nas páginas 14, 19, 23, 26 e 60.

CABRAL, H. L. et al. The development of a computational tool for generation of high quality FE models of pipelines with corrosion defects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2017. ISSN 18063691. Citado 3 vezes nas páginas 19, 23 e 60.

CABRAL, M. A. F. S.; WILLMERSDORF, R. B.; AFONSO, S. M. B. Development of a computational tool for immediate assessment of the structural integrity of corroded pipelines. In: *XLII Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering and III Pan-American Congress on Computational Mechanics*. Rio de Janeiro, RJ, Brazil: [s.n.], 2021. Citado na página 20.

CABRAL, R. M. et al. Assessment by finite element modeling of pipelines with corrosion defects based on river-bottom profile model. *Engineering Structures*, v. 261, p. 114246, 2022. ISSN 0141-0296. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622003741>>. Citado na página 19.

CABRAL, R. M. S. et al. Automatic modelling and finite element analysis of pipelines with a river bottom profile corrosion defect. In: *Rio Pipeline Conference and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2019. Citado na página 60.

CHEN, P. P.-S. The entity-relationship model—toward a unified view of data. *ACM Trans. Database Syst.*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 1, n. 1, p. 9–36, mar 1976. ISSN 0362-5915. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/320434.320440>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

CHIN, K. T. et al. Failure pressure prediction of pipeline with single corrosion defect using artificial neural network. *Pipeline Science and Technology*, 2020. Citado na página 21.

CHOI, J. B. et al. Development of limit load solutions for corroded gas pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2003. ISSN 03080161. Citado na página 19.

CODD, E. F. A relational model of data for large shared data banks. *Commun. ACM*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 13, n. 6, p. 377–387, jun 1970. ISSN 0001-0782. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/362384.362685>>. Citado na página 30.

CODE-ASTER. *Documentation 15*. <https://www.code-aster.org/>, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 24.

COMPUTING, T. N. M. of. *EDSAC - Electronic Delay Storage Automatic Calculator*. Disponível em: <<https://www.tnmoc.org/edsac>>. Citado na página 27.

COSHAM, A.; HOPKINS, P. The pipeline defect assessment manual. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS DIGITAL COLLECTION. *2002 4th International Pipeline Conference*. [S.l.], 2002. p. 1565–1581. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 49.

DAI, H.; CAO, Z. A wavelet support vector machine-based neural network metamodel for structural reliability assessment. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 32, n. 4, p. 344–357, 2017. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/mice.12257>>. Citado na página 20.

DNV GL AS. *Recommended Practice DNVGL-RP-F101 - Corroded pipelines*. [S.l.]: DET NORSKE VERITAS, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 14, 17 e 58.

EDF. *Code_Aster: Analysis of Structures and Thermomechanics for Studies Research*. https://www.code-aster.org/V2/UPLOAD/DOC/Presentation/plaquette_aster_en.pdf, 2011. Citado na página 24.

EDF. *Code_Aster: python scripting*. <https://www.code-aster.de/services/python-scripting.html>, 2011. Citado na página 24.

ELMASRI, R.; NAVATHE, S. *Fundamentals of Database Systems*. 6. ed. [S.l.]: Prentice Hall International, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.

ELSAYED, K. et al. Comparison between rbf and kriging surrogates in design optimization of high dimensional problems. In: *3rd International Conference on Engineering Optimization*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 38.

FERREIRA, A. D. M. *FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE DE DUTOS COM DEFEITOS REAIS*. Dissertação (Master Dissertation) — Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, PE, 2011. Citado na página 19.

FERREIRA, A. D. M. *Análise Multiresolução e Redes Neurais Profundas para Avaliação de Dutos Corroídos*. 161 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco — UFPE, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 24.

FERREIRA, A. D. M. et al. Multiresolution analysis and deep learning for corroded pipeline failure assessment. *Advances in Engineering Software*, v. 162-163, p. 103066, 2021. ISSN 0965-9978. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997821000958>>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 60.

FIELDING, R. T. *Architectural styles and the design of network-based software architectures*. Tese (Publication) — University of California, Irvine, 2000. Disponível em: <<https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 29.

FIELDING, R. T.; RESCHKE, J. *Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Message Syntax and Routing*. RFC Editor, 2014. RFC 7230. (Request for Comments, 7230). Disponível em: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc7230>>. Citado na página 28.

FORCIER, J. *Paramiko's documentation*. <https://docs.paramiko.org/en/stable/>, 2022. Citado na página 26.

FORRESTER, A. I.; KEANE, A. J. Recent advances in surrogate-based optimization. *Progress in Aerospace Sciences*, v. 45, n. 1, p. 50–79, 2009. ISSN 0376-0421. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042108000766>>. Citado na página 36.

FORRESTER, A. I. J.; SOBESTER, A.; KEANE, A. J. *Engineering Design via Surrogate Modelling - A Practical Guide*. [S.l.]: Wiley, 2008. I-XVIII, 1-210 p. ISBN 978-0-470-06068-1. Citado 5 vezes nas páginas 33, 35, 36, 37 e 38.

FREIRE, J. L. F. et al. Burst strength of pipeline test specimens containing longitudinal or circumferential corrosion defects. In: PROULX, T. (Ed.). *Experimental and Applied Mechanics, Volume 6*. New York, NY: Springer New York, 2011. p. 487–494. ISBN 978-1-4614-0222-0. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.

GARCÍA, M. A.; CAMARILLO, G. *Extensible Markup Language (XML) Format Extension for Representing Copy Control Attributes in Resource Lists*. RFC Editor, 2008. RFC 5364. (Request for Comments, 5364). Disponível em: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc5364>>. Citado na página 28.

GATES, M. *Fortran 90/95 reference*. <http://www.icl.utk.edu/~mgates3/docs/fortran.html>, 2020. Citado na página 24.

GIUNTA, A. Use of data sampling, surrogate models, and numerical optimization in engineering design. In: _____. *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*. [s.n.]. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2002-538>>. Citado na página 37.

GIUNTA, A.; WOJTKIEWICZ, S.; ELDRED, M. Overview of modern design of experiments methods for computational simulations (invited). In: _____. *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. [s.n.]. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2003-649>>. Citado na página 37.

GIUNTA, A. A.; ELDRED, M. Implementation of a trust region model management strategy in the dakota optimization toolkit. In: . [S.l.: s.n.], 2000. Citado na página 36.

GLOBALDATA. *Oil and gas pipelines length and capacity and capital expenditure (CAPEX) forecast by region, countries and companies including details of new build and expansion (announcements and cancellations) projects, 2022-2026*. 2022. Disponível em: <<https://www.globaldata.com/store/report/oil-and-gas-pipelines-length-and-capital-expenditure-market-analysis/>>. Citado na página 13.

GONG, C.; ZHOU, W. Importance sampling-based system reliability analysis of corroding pipelines considering multiple failure modes. *Reliability Engineering System Safety*, v. 169, p. 199–208, 2018. ISSN 0951-8320. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832016306378>>. Citado na página 18.

GRINBERG, M. *Flask web development: developing web applications with python*. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2018. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 28.

GUTMANN, H.-M. A radial basis function method for global optimization. *Journal of Global Optimization*, v. 19, n. 3, p. 201–227, Mar 2001. ISSN 1573-2916. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1011255519438>>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 39.

HACKL, J. *Structural Reliability Analysis with Python*. <http://github.com/hackl/pyre>, 2018. Citado na página 48.

HAN, Z.-H.; ZHANG, K.-S. Surrogate-based optimization. In: ROEVA, O. (Ed.). *Real-World Applications of Genetic Algorithms*. Rijeka: IntechOpen, 2012. cap. 17. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/36125>>. Citado na página 20.

HARDY, R. L. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, v. 76, n. 8, p. 1905–1915, 1971. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JB076i008p01905>>. Citado na página 38.

HASOFER, A. M.; LIND, N. C. Exact and invariant second-moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, v. 100, n. 1, p. 111–121, 1974. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JMCEA3.0001848>>. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 47.

HIPP, R. D. *SQLite*. 2020. Disponível em: <<https://www.sqlite.org/index.html>>. Citado na página 28.

JIANG, P.; ZHOU, Q.; SHAO, X. *Surrogate Model-Based Engineering Design and Optimization*. Springer Singapore, 2020. (Springer Tracts in Mechanical Engineering). ISBN 9789811507335. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=E1XyzQEACAAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 33, 35 e 36.

KARTAM, N.; FLOOD, I.; GARRETT, J. H. *Artificial Neural Networks for Civil Engineers: Fundamentals and Applications*. USA: American Society of Civil Engineers, 1997. ISBN 0784402256. Citado na página 36.

KARUPPANAN, S. et al. Estimation of burst pressure of corroded pipeline using finite element analysis (fea). In: . [S.l.: s.n.], 2012. v. 879. Citado na página 19.

KEANE, A. J.; NAIR, P. B. *Computational Approaches for Aerospace Design: The pursuit of Excellence*. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2005. 602 p. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

KESHTEGAR, B.; SEGHIER, M. el A. B. Modified response surface method basis harmony search to predict the burst pressure of corroded pipelines. *Engineering Failure Analysis*, v. 89, p. 177–199, 2018. ISSN 1350-6307. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630717313158>>. Citado 3 vezes nas páginas 13, 18 e 21.

KIEFNER, J. F.; VIETH, P. H. A modified criterion for evaluating the remaining strength of corroded pipe. *Battelle Columbus Div., OH (USA)*, 12 1989. Citado na página 17.

KRISHNAMURTHY, T. Response surface approximation with augmented and compactly supported radial basis functions. In: _____. *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. [s.n.]. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2003-1748>>. Citado na página 38.

KROETZ, H. M.; TESSARI, R. K.; BECK, A. T. Performance of global metamodeling techniques in solution of structural reliability problems. *Advances in Engineering Software*, v. 114, p. 394–404, 2017. ISSN 0965-9978. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997817305331>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 35.

KUMAR, S. D. V.; KARUPPANAN, S.; OVINIS, M. Artificial neural network-based failure pressure prediction of API 5L X80 pipeline with circumferentially aligned interacting corrosion defects subjected to combined loadings. *Materials (Basel)*, MDPI AG, v. 15, n. 6, p. 2259, mar. 2022. Citado na página 21.

LEBRUN, R.; DUTFOY, A. Do rosenblatt and nataf isoprobabilistic transformations really differ? *Probabilistic Engineering Mechanics*, v. 24, n. 4, p. 577–584, 2009. ISSN 0266-8920. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266892009000307>>. Citado na página 45.

LI, H. et al. Residual strength assessment and residual life prediction of corroded pipelines: A decade review. *Energies*, v. 15, n. 3, 2022. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/726>>. Citado na página 55.

LI, X. et al. A sequential surrogate method for reliability analysis based on radial basis function. *Structural Safety*, v. 73, p. 42–53, 2018. ISSN 0167-4730. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167473016302156>>. Citado na página 20.

LIU, P.-L.; KIUREGHIAN, A. D. *Optimization algorithms for structural reliability analysis*. [S.l.: s.n.], 1986. Citado na página 47.

LIU, P.-L.; KIUREGHIAN, A. D. Optimization algorithms for structural reliability. *Structural safety*, Elsevier, v. 9, n. 3, p. 161–177, 1991. Citado na página 47.

LU, H. et al. Novel data-driven framework for predicting residual strength of corroded pipelines. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, v. 12, n. 4, p. 04021045, 2021. Citado na página 21.

MAHMOODIAN, M.; LI, C. Q. Failure assessment and safe life prediction of corroded oil and gas pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 151, p. 434–438, 2017. ISSN 0920-4105. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410516313547>>. Citado na página 18.

MANOJ, N. R. *First-order reliability method: Concepts and application*. Tese (Doutorado), 2016. Citado na página 44.

MCKAY, M. D.; BECKMAN, R. J.; CONOVER, W. J. Comparison the three methods for selecting values of input variable in the analysis of output from a computer code. *Technometrics; (United States)*, 5 1979. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/5236110>>. Citado na página 37.

MELCHERS, R.; BECK, A. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. Wiley, 2018. ISBN 9781119265993. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=8yE6DwAAQBAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 34, 45 e 46.

METROPOLIS, N.; ULAM, S. The monte carlo method. *Journal of the American Statistical Association*, Taylor Francis, v. 44, n. 247, p. 335–341, 1949. PMID: 18139350. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1949.10483310>>. Citado na página 34.

MSC.PATRAN. *User's Guide Reference Manual*. <http://www.mscsoftware.com>, 2015. Citado na página 23.

NAIDU, S. L. *Neural network surrogate model for multidisciplinary design optimization*. Dissertação (Master Dissertation) — Indian Institute of Technology, Bombay - India, 2004. Citado na página 36.

OPENBSD. *SCP's manual*. <https://man.openbsd.org/scp>, 2019. Citado na página 26.

ORACLE. *What is database?* Disponível em: <<https://www.oracle.com/br/database/what-is-database/>>. Citado na página 30.

PADMEC. *Infraestrutura*. 2023. Disponível em: <<https://zumbi.padmec.org/sitepadmec/pt/sobre/infraestrutura/>>. Citado na página 24.

PHAN, H. C.; DHAR, A. S. Predicting pipeline burst pressures with machine learning models. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 191, p. 104384, 2021. ISSN 0308-0161. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030801612100082X>>. Citado na página 21.

PHMSA. *Pipeline Incident 20 Year Trends*. 2022. Disponível em: <<https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-20-year-trends>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

PIMENTEL, J. T. et al. New procedure of automatic modeling of pipelines with realistic shaped corrosion defects. *Engineering Structures*, v. 221, p. 111030, 2020. ISSN 0141-0296. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619353805>>. Citado na página 19.

PINTO, J. W. O. *Otimização Robusta do Controle de Poços de Reservatórios de Petróleo Utilizando Modelo Substituto*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, PE, 2020. Citado 7 vezes nas páginas 33, 35, 36, 37, 38, 39 e 40.

PYTHON. *Tutorial and Library Reference Manual*. <http://www.python.org/doc/>, 2011. Citado na página 24.

QUEIPO, N. V. et al. Surrogate-based analysis and optimization. *Progress in Aerospace Sciences*, v. 41, n. 1, p. 1–28, 2005. ISSN 0376-0421. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042105000102>>. Citado na página 37.

RACKWITZ, R.; FLESSLER, B. Structural reliability under combined random load sequences. *Computers & structures*, Elsevier, v. 9, n. 5, p. 489–494, 1978. Citado na página 47.

RAJ, D. *Sampling theory*. [S.l.], 1968. Citado na página 37.

RAMBERG, W.; OSGOOD, W. R. Description of stress-strain curves by three parameters. In: . [S.l.: s.n.], 1943. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 49.

RAMPIN, R. *Pure python scp module*. <https://github.com/jbardin/scp.py>, 2022. Citado na página 26.

REDDY, M. *API Design for C++*. Elsevier Science, 2011. ISBN 9780123850041. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=IY29LylT85wC>>. Citado na página 27.

RENDLE, M. *A Brief History of the Future of the API*. 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=fGejBibvWiQ>>. Citado na página 27.

ROMERO, V. J. et al. Comparison of pure and "latinized"centroidal voronoi tessellation against various other statistical sampling methods. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, v. 91, n. 10-11, p. 1266–1280, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.023>>. Citado na página 37.

ROSSUM, G. V. *The Python Library Reference, release 3.8.2*. [S.l.]: Python Software Foundation, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 16, 26, 28 e 29.

SERAFINI, D. B. *A framework for managing models in nonlinear optimization of computationally expensive functions*. Tese (Doutorado) — Rice University, Texas, 1999. Citado na página 35.

SHUAI, Y.; SHUAI, J.; XU, K. Probabilistic analysis of corroded pipelines based on a new failure pressure model. *Engineering Failure Analysis*, v. 81, n. February, p. 216–233, 2017. ISSN 13506307. Citado na página 18.

SILVA, H. V. C. *Método Cooperativo Assistido do Exame de Partículas Aplicado à Otimização do Controle das Vazões dos Poços em Reservatórios de Petróleo*. Dissertação (Master Dissertation) — Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, PE, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 38.

SINHA, S. K.; PANDEY, M. D. Probabilistic neural network for reliability assessment of oil and gas pipelines. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 17, n. 5, p. 320–329, 2002. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1467-8667.00279>>. Citado na página 20.

SOUSA, P. F. S. *PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÕES EM DUTOS CORROÍDOS USANDO METAMODELOS*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

SOUSA, P. F. S.; AFONSO, S. M. B.; WILLMERSDORF, R. B. Reliability-based preventive maintenance planning for corroded pipelines using a rbf surrogate model. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 43, n. 12, p. 521, Nov 2021. ISSN 1806-3691. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40430-021-03247-3>>. Citado na página 20.

SOUZA, R. D. et al. Burst tests on pipeline containing long real corrosion defects. In: *International Pipeline Conference*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

SOUZA, R. D. et al. Burst tests of corroded pipe segments removed from service. In: *Rio Pipeline Conference and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

SUN, Z. et al. LIF: A new Kriging based learning function and its application to structural reliability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 157, n. C, p. 152–165, 2017. Disponível em: <<https://ideas.repec.org/a/eee/reensy/v157y2017icp152-165.html>>. Citado na página 20.

TEE, K. F.; PESINIS, K. Reliability prediction for corroding natural gas pipelines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 65, p. 91–105, 2017. ISSN 0886-7798. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779816301079>>. Citado na página 18.

TEIXEIRA, A. et al. Reliability of pipelines with corrosion defects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Elsevier, v. 85, n. 4, p. 228–237, apr 2008. ISSN 03080161. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016107001342>, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308016107001342>>. Citado na página 18.

TORRES, J. von S. *Uma Metodologia para Verificação da Segurança e Dimensionamento Ótimo de Dutos com Defeitos Causados por Corrosão*. Tese (Doutorado) — UFPE, 2009. Citado na página 20.

WANG, L. B. *Development of Software for Residual Strength Evaluation and Residual Life Prediction of Corroded Pipelines*. Dissertação (Master Dissertation) — Xi'an Shiyou University, Xi'an, China, 2014. Citado na página 20.

WEISER, A.; ZARANTONELLO, S. A note on piecewise linear and multilinear table interpolation in many dimensions. *Mathematics of Computation*, v. 50, 01 1988. Citado na página 40.

WILD, S. M.; REGIS, R. G.; SHOEMAKER, C. A. Orbit: Optimization by radial basis function interpolation in trust-regions. *SIAM Journal on Scientific Computing*, v. 30, n. 6, p. 3197–3219, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1137/070691814>>. Citado na página 39.

WU, Z. Compactly supported positive definite radial functions. *Advances in Computational Mathematics*, v. 4, n. 1, p. 283, Dec 1995. ISSN 1572-9044. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF03177517>>. Citado na página 38.

XU, J.; WANG, D. Structural reliability analysis based on polynomial chaos, voronoi cells and dimension reduction technique. *Reliability Engineering System Safety*, v. 185, p. 329–340, 2019. ISSN 0951-8320. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832018307749>>. Citado na página 20.

YLONEN, T.; LONVICK, C. *The Secure Shell (SSH) Connection Protocol*. IETF, 2006. RFC 4254 (Proposed Standard). (Request for Comments, 4254). Disponível em: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc4254.txt>>. Citado na página 26.
