

ADAPTAÇÃO DA METODOLOGIA “FITNESS FOR SERVICE” À MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS INDUSTRIAIS SUJEITAS A CORROSÃO ATMOSFÉRICA

CRISTIANE CAETANO DA SILVA COLEN

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Professor Dr. José Miguel de Freitas Castro

Coorientador:

JULHO DE 2023

MESTRADO EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ mestec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Ao meu marido e filhos.

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita.”

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que Ele me deu de maravilhoso para que eu pudesse realizar esse trabalho: uma minha família que foi a base de tudo para percorrer esse longo caminho numa fase já tão tarde da minha vida; meu marido Peter Jan Groetelaars em especial que foi o suporte emocional, psicológico e financeiro que permitiu que essa conquista fosse alcançada me apoiando em todas as etapas; meus filhos maravilhosos João Pedro e Maria Alice que me acompanharam, inclusive nas aulas, com muita educação e disciplina; meus pais que foram o suporte na minha casa enquanto eu estava em outro país; meu irmão David que me acolheu em sua casa; meu parceiro de projeto Victor Chagas que me ajudou a desenvolver os trabalhos da faculdade com muita paciência e dedicação e também se tornou um grande amigo; amigos feitos durante esse período, Sarmiento, Elisa, Jorge, Absalão, Victor Rodrigues e tantos outros dentro e fora da faculdade que não quero citar todos os nomes para não esquecer de nenhum e todos que torceram positivamente para o meu sucesso. E finalmente agradeço ao meu professor, orientador Dr. José Miguel Castro que aceitou o desafio do tema proposto e me deu todo suporte e compartilhou seu conhecimento para que este trabalho pudesse ser concretizado.

RESUMO

A corrosão metálica é um grande desafio econômico mundial, principalmente para os países mais desenvolvidos, os quais possuem grandes aplicações de componentes metálicos em ambientes urbanos e industriais. De acordo com NACE (National Association of Corrosion Engineers), em 2013 cerca de 3,4% do PIB global foram consumidos no tratamento da corrosão, reforçando a demanda por trabalhos de engenharia no sentido de minimizar esses impactos.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia e modelos específicos para avaliar estruturas metálicas corroídas em um ambiente industrial em uma planta petroquímica de grande porte, as quais representam uma parcela significativa dos custos de manutenção desta empresa.

A metodologia escolhida foi uma adaptação da FFS (“Fitness for Service”), usando conceitos da Resistência dos Materiais, técnicas de reparação de componentes estruturais, aplicáveis a maioria dos componentes industriais. Como resultado de uma avaliação FFS é possível decidir manter em uso uma estrutura metálica que já esteja com processo de corrosão avançado, somente demandando uma atividade de pintura para barrar o processo corrosivo, por exemplo. Nessa metodologia normalmente são utilizados critérios específicos, com fatores de segurança menores que os previstos nos projetos de construção. Uma análise de vida residual também pode ser realizada como parte da avaliação, que pode ser usada para definir intervalos de inspeção futura.

Usada corretamente, esta metodologia pode proporcionar um bom equilíbrio entre a economia e a segurança, evitando reparos desnecessários durante a vida em serviço da estrutura. Uma avaliação FFS típica pode envolver várias disciplinas de engenharia, e exige uma quantidade de dados de entrada de acordo com o nível de exigência da avaliação. A metodologia pode variar em sua complexidade, desde avaliações simples até simulações computacionais altamente sofisticadas. O nível de complexidade varia de uma situação para outra. Em alguns casos uma análise avançada é necessária quando uma avaliação simples não é capaz de demonstrar que a estrutura em questão está apta para o serviço contínuo.

Neste cenário, vislumbra-se seu emprego nesse trabalho para conhecer e se familiarizar com sua potencialidade futura. Além disso é possível construir um modelo numérico para identificar a vida residual das estruturas nas suas condições de aplicação, mas que não será o foco desse trabalho.

Por fim, objetivando criar um modelo simplificado de suporte para a tomada de decisão das equipes de inspeção e manutenção, criou-se tabelas e gráficos específicos para algumas condições mapeadas de elementos de estruturas metálicas e níveis de corrosão, indicando para estas, quando da necessidade de uma intervenção imediata.

PALAVRAS-CHAVE: Corrosão, FFS-Fitness for Service, Manutenção em estruturas metálicas, Manutenção industrial e Gestão da Manutenção.

ABSTRACT

Metallic corrosion is a grand global economic challenge, especially for more developed countries, which have large applications of metals components in urban and industrial environments. According to NACE (National Association of Corrosion Engineers), in 2013 around 3.4% of the global GDP was consumed in the treatment of corrosion, reinforcing the demand for engineering works in order to minimize these impacts.

In this context, the objective of this work was to develop a methodology and specific models to evaluate corroded metallic structures in an industrial environment in a large petrochemical plant, which represent a significant portion of its maintenance costs.

The chosen methodology was an adaptation of the FFS (“Fitness for Service”), using concepts of the Strength of Materials and repairing techniques of structural components, applicable to most of the industries. As a result of an FFS evaluation, it is possible to decide to keep in use a metallic structure that is already in an advanced corrosion process, only requiring a painting activity to stop the corrosive process, for example. In this methodology, specific criteria are usually used, with safety factors lower than those provided for in construction projects. A residual life analysis can also be performed as part of the assessment, which can be used to define future inspection intervals.

Used correctly, this methodology can provide a good balance between economy and safety, avoiding unnecessary repairs during the service life of the structure. A typical FFS assessment can involve multiple engineering disciplines and requires an amount of input according to the level of requirement of the assessment. The methodology can vary in its complexity, from simple assessments to highly sophisticated computer simulations. The level of complexity varies from one situation to another. In some cases, an advanced analysis is required when a simple assessment is not able to demonstrate that the structure in question is fit for continuous service.

In this scenario, it is intended to better understand this methodology and to become familiar with his future potential usage. In addition, it is possible to build a numerical model to identify the residual life of structures in their application conditions, but that will not be the focus of this work.

Finally, aiming to create a simplified support model for decision making by inspection and maintenance teams, specific tables and graphs were created for some mapped conditions of elements of metallic structures and levels of corrosion, indicating for these, when necessary, an immediate intervention.

KEYWORDS: Corrosion, FFS - Fitness for Service, Steel structure maintenance, Industrial maintenance and Maintenance Management.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL.....	1
1.2 OBJETIVO	2
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 UTILIZAÇÃO DO AÇO NAS ESTUTURAS	3
2.2 EXPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA	3
2.3 CORROSÃO	6
2.3.1 Corrosão uniforme.....	7
2.4 A MANUTENÇÃO E SUA GESTÃO	7
2.4.1 Custo da Manutenção na Indústria	7
2.4.2 Custo da Corrosão na Indústria	8
2.4.3 Tipos de Manutenção.....	10
2.5 A METODOLOGIA FFS – ADEQUAÇÃO AO USO	11
2.5.1 Metodologia de avaliação de perda de espessura conforme API 579	13
2.5.2 Estado Atual de Integridade x Vida Remanescente	16
3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ADAPTADA.....	17
3.1 MÉTODO ADAPTADO DE FFS	17
3.1.1 Abordagem de avaliação.....	18
3.1.2 Mecanismos de dano	19
3.2 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE SEGURANÇA	19
3.3 NÍVEIS DE CORROSÃO	20
3.4 DESCRIÇÃO DE CRITÉRIOS AVALIADOS	21
3.4.1 Verificação da segurança – elemento alma de viga.....	24
3.4.2 Verificação de segurança – Elemento pilar	32

4 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	36
4.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS AMOSTRAS	36
4.1.1 Limites de resistência e segurança quanto a flexão	37
4.1.2 Limites de resistência e segurança quanto ao esforço transversal	43
4.1.3 Limites de resistência e segurança quanto a compressão.....	45
4.2 RELATÓRIO DA AVALIAÇÃO DE INSPEÇÃO REAL.....	48
4.3 OUTRAS UTILIZAÇÕES DOS RESULTADOS NA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS	48
4.3.1 Divisão em família de elementos	49
4.3.2 Fator de ponderação	50
4.3.3 Fator de intensidade	50
4.3.4 Grau de dano (D)	50
4.3.5 Grau de deterioração de um elemento (Gde).....	51
4.3.6 Grau de deterioração de uma família de elementos (Gdf)	51
4.3.7 Fator de relevância estrutural.....	52
4.3.8 Grau de deterioração da estrutura (Gd)	52
5 CONCLUSÃO	54
5.1 CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de ambientes por categoria de corrosividade.....	4
Figura 2 - Taxa de agressividade por ambiente	4
Figura 3 - Regiões do Brasil por categoria de corrosividade	5
Figura 4 - Regiões de Portugal por categoria de corrosividade	5
Figura 5 - Corrosão uniforme localizada (Fonte: empresa analisada)	6
Figura 6 - Corrosão uniforme	7
Figura 7 - Custo x disponibilidade de equipamentos.....	8
Figura 8 - Classificação da manutenção pela ABRAMAN	10
Figura 9 - Partes do código API-579	12
Figura 10 - Avaliação FFS de perda de espessura (Fonte API-579).....	12
Figura 11 - Procedimento inicial de avaliação API-579	13
Figura 12 - Procedimento de avaliação pelo Nível 3.....	14
Figura 13 – Níveis de corrosão	20
Figura 14 - Estrutura de suporte de tubulação em área industrial (fonte: empresa analisada)	21
Figura 15 - Croqui de dimensionamento da estrutura analisada (fonte: empresa analisada)	22
Figura 16 – Representação da estrutura no FTOOL	22
Figura 17 - Dados do perfil analisado.....	23
Figura 18 - Dados de resistências para a estrutura sem danos	23
Figura 19 - Cargas atuantes na estrutura-Ftool.....	24
Figura 20 - Amostra 1 (Localização do dano no centro do elemento)	25
Figura 21 - Amostra2 (Localização do dano no centro do elemento na parte superior da alma)	25
Figura 22 – Amostra3 (Localização do dano no centro do elemento na parte inferior da alma)	26
Figura 23 – Amostra4 (Localização do dano no centro do elemento no banzo superior).....	27
Figura 24 - Corrosão em mais de 50% do banzo inferior (Fonte: empresa analisada)	28
Figura 25 - Amostra5 (Localização do dano no centro do elemento inferior)	29
Figura 26 - Amostra6 (Localização do dano na extremidade da viga, apoios)	32
Figura 27- Base do pilar com corrosão (Fonte: empresa analisada).....	33
Figura 28 - Amostra7 (Localização do dano no pilar).....	33
Figura 29 - Classificação probabilidade x severidade na indústria avaliada	36
Figura 30 - Grau de risco definido pela indústria para dano nas amostras 1, 2, 3, 4, 5 e 6	38
Figura 31 - Grau de risco avaliado na amostra 1	38
Figura 32 - Grau de risco avaliado na amostra 2	39

Figura 33 - Grau de risco avaliado na amostra 3	40
Figura 34 - Grau de risco avaliado na amostra 4	41
Figura 35 - Grau de risco avaliado na amostra 5	42
Figura 36 – Comparativo da verificação de segurança por amostra	43
Figura 37 - Grau de risco avaliado na amostra 6	44
Figura 38 – Comparativo da verificação da segurança para flexão com esforço transversal	45
Figura 39 - Grau de risco avaliado na amostra 7 para compressão apenas	47
Figura 40 - Grau de risco avaliado na amostra 7 para encurvadura	47
Figura 41 - Fluxograma da metodologia para o cálculo do Grau de Deterioração da Estrutura (GDE)	49

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Cálculo do momento resistente por % de perda de área na Amostra1	25
Tabela 2 - Cálculo do momento resistente por % de perda de área na Amostra2	26
Tabela 3 - Cálculo do momento resistente por % de perda de área na Amostra3	27
Tabela 4 - Cálculo do momento resistente por % de perda de área na Amostra4	28
Tabela 5 - Cálculo do momento resistente por % de perda de área na Amostra5	29
Tabela 6 - Cálculo das resistências da amostra 1	30
Tabela 7 – Cálculo das resistências da amostra 2	30
Tabela 8 – Cálculos das resistências da amostra 3	31
Tabela 9 – Cálculo das resistências da amostra 4	31
Tabela 10 – Cálculo das resistências da amostra 5	31
Tabela 11 - Cálculo do esforço cortante resistente por % de perda de área na Amostra6	32
Tabela 12 - Cálculo da resistência a compressão por % de perda de área no pilar na amostra 7	34
Tabela 13 - Cálculo da resistência a encurvadura por % de perda de área no pilar na amostra 7	35
Tabela 14 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 1	37
Tabela 15 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 2	39
Tabela 16 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 3	40
Tabela 17 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 4	41
Tabela 18 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 5	42
Tabela 19 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 6	44
Tabela 20 - Resistência e segurança quanto à compressão por % de área corroída na amostra 7	46
Tabela 21 - Resistência e segurança quanto à encurvadura por % de área corroída na amostra 7	47
Tabela 22 - Fator de ponderação do elemento	50
Tabela 23 - Fator de intensidade do dano	50
Tabela 24 – Nível de deterioração conforme grau de dano	51
Tabela 25 - Classificação do nível de deterioração	51
Tabela 26 - Fator de relevância da família de elementos	52
Tabela 27 – Planilha para análise rápida	53

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

FFS – Fitness For Service

ELU – Estado Limite Último

EC0 – Euro Código 0

EC3 – Euro Código 3

A – Área da secção transversal bruta

A_{eff} – Área da secção transversal efetiva

b – Largura do banzo

h – Altura total

h_w – altura da alma

t_f – espessura dos banzos

t_w – espessura da alma

I_Δ – inércia total

I_{Δeff} – inércia total efetiva

M_{rd} – Momento resistente

M_{ed} – Momento atuante

Y – distância do eixo do elemento ao ponto de referência (base)

W_{el} – módulo de flexão elástico

CP – corpo de prova

LDC – Carga limite do elemento danificado

LUC – Carga limite do elemento não danificado

RSF – Fator de força restante

SF: coeficiente de segurança (safety fator)

Ed: valor de cálculo do efeito das ações

Rd: valor de cálculo da resistência correspondente

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL

No cenário das estruturas metálicas de suporte nas instalações industriais sujeitas a corrosão atmosférica, normalmente para se diagnosticar a manifestação patológica, é definido um plano de inspeção preventiva composto por um inspetor de equipamentos para efetuar uma inspeção visual na estrutura. Com base na observação do tipo de elemento, sua posição, agressividade do micro clima associada (definido por cada unidade industrial) e no percentual visual de perda de material, é definido o prazo para intervenção seja ela uma nova inspeção ou serviço, porém não é possível dizer exatamente qual ação deverá ser executada em qual prazo e com que assertividade isso poderia ser feito, pois não é conhecida a capacidade resistente e segurança da estrutura durante o processo de inspeção.

Para as estruturas metálicas existe também o Plano Preventivo de Pintura que é periódico e que é definido também conforme as observações citadas acima baseado no tempo.

Para auxiliar na tomada de decisão, sendo que nas situações normalmente existem vários pontos de vista e variáveis, é relevante usar uma análise multicritério que auxiliam no processo de escolha, classificação e ordenação das ações.

A revisão bibliográfica aborda bem o tema de manutenção de estruturas metálicas em pontes, de onde também foram extraídos alguns critérios para este trabalho, porém não se identificou aplicação da metodologia Fitness for Service na construção civil nem na manutenção de estruturas metálicas de suporte de tubulações na indústria por se tratar de uma metodologia aplicável a vasos de pressão, vasos e caldeiras.

Uma estrutura metálica, por exemplo, pode conter mecanismos de dano atuantes, tais como corrosão, fadiga, etc, ou pode ser submetido a condições de uso mais severas do que as previstas pelo projeto inicial tornando possível adaptar a metodologia para esse caso.

Alguns exemplos reais encontrados na indústria avaliada, fruto de inspeção de estruturas, como corrosão média na base de escada em contato com o solo, corrosão média no degrau da escada, corrosão severa em vários pontos de guarda corpo, corrosão severa na extremidade da viga de escada, corrosão severa em suporte de linha de utilidade, entre outras, são os diagnósticos emitidos pela inspeção e não são levados em consideração nas premissas de cálculo dos códigos de projeto, nem tampouco nas normas internas. Então como o engenheiro lida com esses defeitos? Repara? Substitui? Utiliza como está?

A inexistência de critérios específicos para avaliação da condição física de um elemento estrutural corroído faz com que a tomada de decisão do engenheiro responsável seja baseada exclusivamente na experiência prática, podendo levar a situações indesejadas, desde um reparo necessário não realizado, podendo causar um colapso da estrutura até uma intervenção desnecessária, aumentando o custo de manutenção.

Com base nesses fatos, uma boa gestão da manutenção aliada a aplicação de uma metodologia adaptada ao tipo de estrutura em questão, não só será possível responder as perguntas como também gerenciar melhor os custos.

1.2 OBJETIVO

O conceito de FFS estabelece a necessidade de uma avaliação quantitativa para demonstrar se a integridade estrutural de um componente em serviço que contém um dano ou está operando abaixo de uma condição específica de projeto pode causar uma falha.

As três perguntas mais comuns dos engenheiros em planta são:

- É seguro continuar operando?
- Por quanto tempo pode-se continuar operando?
- Posso aguardar até a próxima parada programada de manutenção em X tempo?

O principal objetivo deste trabalho é verificar se a tabela de avaliação de risco utilizada pelo inspetor de estruturas está definida de acordo com as verificações de resistência e segurança fazendo uso dos cálculos sugeridos pela metodologia adaptada na avaliação de danos causados pela corrosão atmosférica em estruturas de suporte de tubulações industriais na indústria petroquímica, através de um procedimento simplificado, atingindo somente o nível 1 da metodologia adaptada à estruturas de suporte, que permitam reavaliar as condições de uso, executar reparos, troca ou reforço das estruturas.

O nível 1 da metodologia original aborda o uso de formulações simples de cálculo de resistência dos materiais para verificar as resistências e a segurança de projeto. O nível 2 utiliza formulações mais complexas de cálculo para verificar esses parâmetros. O nível 3 da metodologia envolve o uso de sistemas computacionais como elementos finitos e modelagem numérica.

Também poderá ser feita uma análise de vida residual que poderá ser usada para definir intervalos de inspeção futura, mas que será objeto de outro estudo.

Para alcançar esse objetivo será necessário:

- Avaliar criticamente o valor das cargas aplicadas em cada elemento da estrutura para efeito de verificação de segurança em estado limite último.
- Avaliar as resistências seccionais devido a perda de material por corrosão.
- Realizar uma análise comparativa entre os dados obtidos das verificações de resistência e segurança atuante e de projeto com os custos de manutenção devido ao colapso

2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 UTILIZAÇÃO DO AÇO NAS ESTRUTURAS

O aço dá qualidade na construção civil, é essencial às moradias, às indústrias, à montagem da infraestrutura. Está presente em pontes, viadutos, elevadores, tubulações, revestimentos, acabamentos e coberturas. O aço impulsiona o desenvolvimento, fortalece a independência econômica e melhora a qualidade de vida.

Apesar de já existirem excelentes soluções em FRP (Fiber Reinforced Polimer) que substituem o aço na construção civil perfeitamente e assim ser evitado o dano da corrosão, temos que lidar com projetos de instalações antigas e novos projetos em estruturas de aço que requerem manutenção, reforço ou reparo com materiais já pré-definidos em normas internas para evitar os conhecidos “Management of change” (MOC). Devido a resistência e facilidade de reforço e substituição do aço, a indústria possui grande parte da sua estrutura sendo de aço ou mista (concreto e aço). Quando falamos de elementos metálicos expostos às condições atmosférica e num ambiente industrial, o grande fator de preocupação é a corrosão, que seria facilmente resolvido com um sistema de proteção anticorrosiva adequado e a devida manutenção o que garante a durabilidade das estruturas metálicas, mas que requerem periodicidade de execução.

Por isso no projeto de novas estruturas já devem ser incluídos condições de serviço, classificação de micro e macro climas, avaliação de propriedades mecânicas dos materiais e projeto de manutenção e reparação, porém nas antigas isso não existe.

Um projeto de manutenção e reparação ser concebido ainda na fase de projeto da estrutura não é ainda muito comum. Nele é proposto formas executivas que facilitem a manutenção e a reparação do sistema de proteção de partes ou do todo da estrutura considerando o ambiente atmosférico, a classificação de corrosividade ambiental e as condições de serviço.

2.2 EXPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA

A exposição atmosférica no ambiente de pesquisa deste trabalho é caracterizada como industrial, com base na ocorrência dos agentes corrosivos produzidos pela indústria (micro clima) que é o ambiente na interface entre a estrutura e a atmosfera classificada por regiões (macro clima), conforme descrito na EN 12500:2000.

Esses micro e macro climas estão apresentados nas tabelas abaixo conforme região brasileira e em função do grau de corrosividade aplicadas para o aço carbono adaptado da ISO 9223:1992 e da NP EN ISO 12944-2:1999 para exemplo de ambientes típicos no primeiro ano de exposição.

Categoria	Corrosividade	Taxa de corrosão		Exemplos de ambientes típicos em clima moderado (apenas informativo)	
		g/(m ² ano)	µg/ano	Exterior	Interior
C ₁	Muito baixa	≤10	≤1.3	-	Edifícios com aquecimento e atmosferas limpas.
C ₂	Baixa	>10 ≤200	>1.3 ≤25	Atmosferas com um nível baixo de corrosão. Geralmente zonas rurais.	Edifícios sem aquecimento, onde pode ocorrer condensação.
C ₃	Média	>200 ≤400	>25 ≤50	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por dióxido de enxofre. Zonas costeiras com baixa salinidade.	Salas de produção com elevada humidade e alguma poluição atmosférica.
C ₄	Elevada	>400 ≤650	>50 ≤80	Zonas industriais e costeiras com salinidade moderada.	Indústria química, piscinas, estaleiros costeiros de navios e barcos.
C _{5-I}	Muito elevada	>650 ≤1500	>80 ≤200	Zonas industriais com elevada humidade e atmosfera agressiva.	Edifícios ou zonas com condensação quase permanente e poluição elevada.

Figura 1 - Exemplo de ambientes por categoria de corrosividade

Metal	Ambiente		
	Industrial (µm.ano)	Marinha (µm.ano)	Rural (µm.ano)
Alumínio	0,81	0,71	0,025
Cobre	1,19	1,32	0,58
Chumbo	0,43	1,41	0,48
Zinco	5,13	1,60	0,86
Aço Carbono	13,72	6,35	5,08
Aço Patinável	2,54	3,81	1,27

Figura 2 - Taxa de agressividade por ambiente

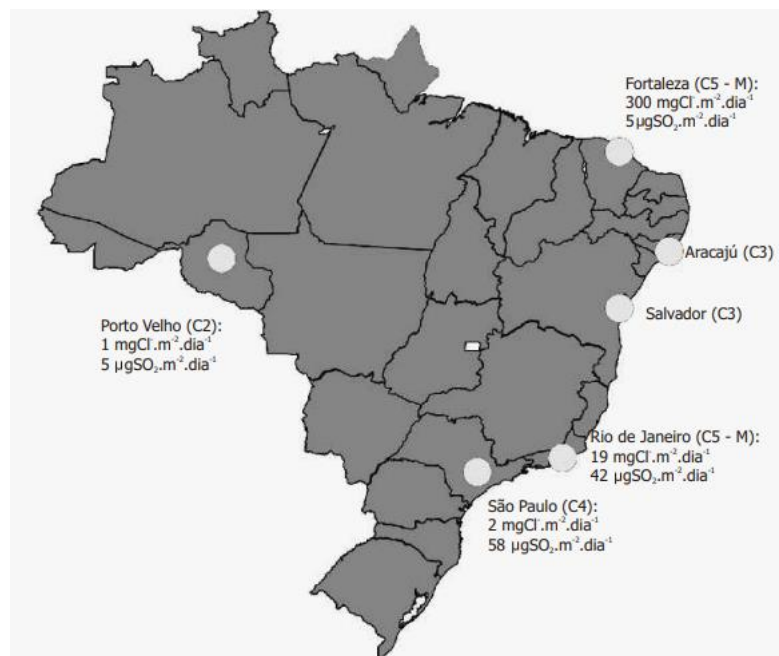


Figura 3 - Regiões do Brasil por categoria de corrosividade

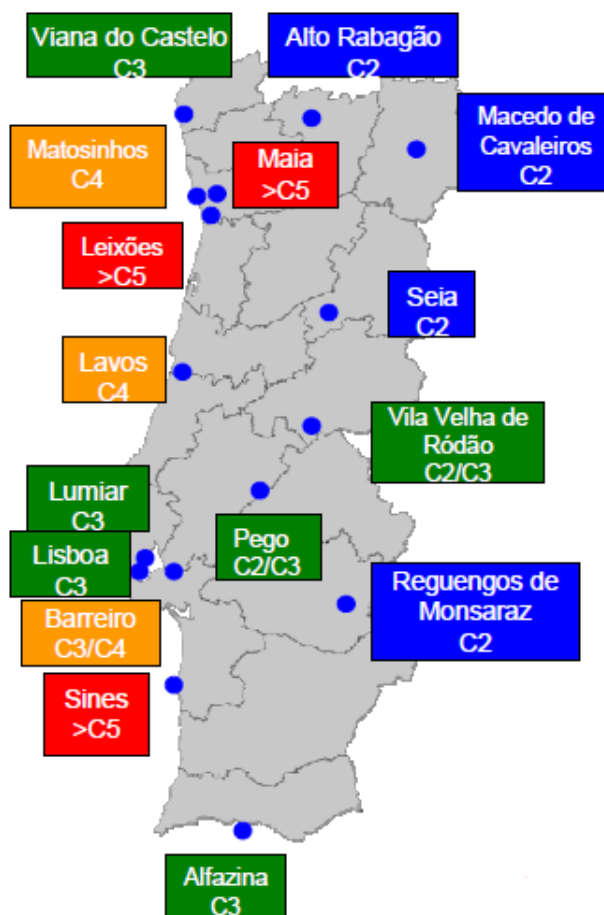


Figura 4 - Regiões de Portugal por categoria de corrosividade

2.3 CORROSÃO

De modo geral, as patologias em estruturas metálicas, estão relacionadas a processos de corrosão existentes em suas partes, como ligações soldadas e aparafusadas, almas e banzos (mesas) e podem levar toda a estrutura ao colapso, podendo resultar em incidentes com prejuízo material ou até acidentes com perdas humanas. Sendo assim, quanto antes forem identificadas e corrigidas, menores serão os prejuízos em custos de manutenção e riscos de acidentes no local. (Pannoni 2007)

Os metais raramente são encontrados no estado puro. Eles quase sempre são encontrados em combinação com um ou mais elementos não-metálicos presentes no ambiente. Minérios são, de modo geral, formas oxidadas do metal.

Corrosão pode ser definida, de modo simples, como sendo a tendência espontânea do metal produzido e conformado de reverter ao seu estado original, de mais baixa energia livre. Uma outra definição, amplamente aceita, é a que afirma que corrosão é a deterioração de propriedades que ocorre quando um material reage com o ambiente.

A corrosão afeta a sociedade de várias maneiras: utilização de maiores coeficientes de segurança, necessidade de manutenção preventiva (p. ex.: pintura) e corretiva, utilização de materiais mais "nobres" e caros, parada temporária da utilização do equipamento ou da estrutura, contaminação de produto, perda de eficiência, perda de credibilidade, etc. Obviamente todos estes itens envolvem aspectos econômicos. Assim, existem muitas razões para se evitar a corrosão. A corrosão pode ocorrer através de variadas formas, e sua classificação pode ser feita através da aparência do metal corroído. As formas mais comuns de corrosão que acometem o aço carbono são a corrosão uniforme, a corrosão galvânica, a corrosão por frestas e a corrosão por pites, menos comum, mas não menos importante.

O ataque uniformemente distribuído por grandes regiões da superfície metálica é certamente a forma mais comum de corrosão. Ela se distribui, em geral, por grandes áreas da superfície metálica e a velocidade com que progride, por ser uniforme, pode ser estimada.



Figura 5 - Corrosão uniforme localizada (Fonte: empresa analisada)

2.3.1 CORROSÃO UNIFORME

É um tipo de corrosão que ocorre em toda a extensão do elemento, quando o aço fica exposto ao ambiente externo, sofrendo assim ação da humidade e do oxigênio. Esta ação promove a perda da seção do elemento de modo uniforme, culminando com a formação de escamas de ferrugem e a respectiva redução da seção transversal da peça, conforme ilustrado na figura. Dependendo do grau de corrosividade da peça, a manutenção pode exigir a substituição total dela, ou até uma preparação específica e tratamento da superfície. Esse tipo será o foco deste trabalho. (Pannoni 2007)

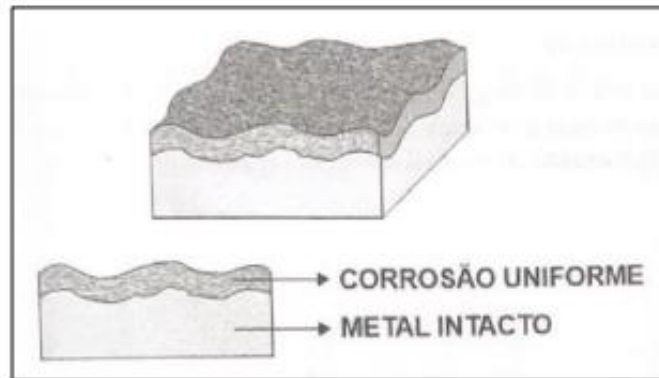


Figura 6 - Corrosão uniforme

2.4 A MANUTENÇÃO E SUA GESTÃO

Segundo a (ABNT,2004) “manutenção é um conjunto de cuidados técnicos indispensáveis ao funcionamento regular e permanente de máquinas, equipamentos, ferramentas e instalações. Esses cuidados envolvem a conservação, a adequação, a restauração, a substituição e a prevenção”.

Podemos dizer que os objetivos da manutenção se confundem com o conceito de manutenção, porém os objetivos são a ação que levam a cumprir o que foi dito conceitualmente: manter, garantir, restaurar, substituir, prevenir.

Uma vez que a manutenção é um custo associado a um processo de produção/fabricação, a importância de uma boa gestão é essencial para garantir a operacionalidade e disponibilidade dos equipamentos para que a empresa seja mais competitiva.

2.4.1 CUSTO DA MANUTENÇÃO NA INDÚSTRIA

Os custos de manutenção nas indústrias podem chegar a 40% dos custos de produção. Com os recentes avanços da indústria, o aumento do nível da automação, sistemas robóticos, o boom da Indústria 4.0, algoritmos de Big Data e Machine Learning, a manutenção enfrenta novos desafios, tendo que acompanhar essa modernização dos sistemas e com isso podendo aumentar o custo com mão de obra e reparos.

A urgência do assunto torna crucial definir a base para os custos de manutenção atuais apoiados em recentes literaturas e dar uma visão clara da realidade na indústria de processo.

O grande desafio na gestão da manutenção é encontrar o ponto ótimo de disponibilidade de equipamentos aliado ao custo de manutenção. (Lemes1 s.d.)

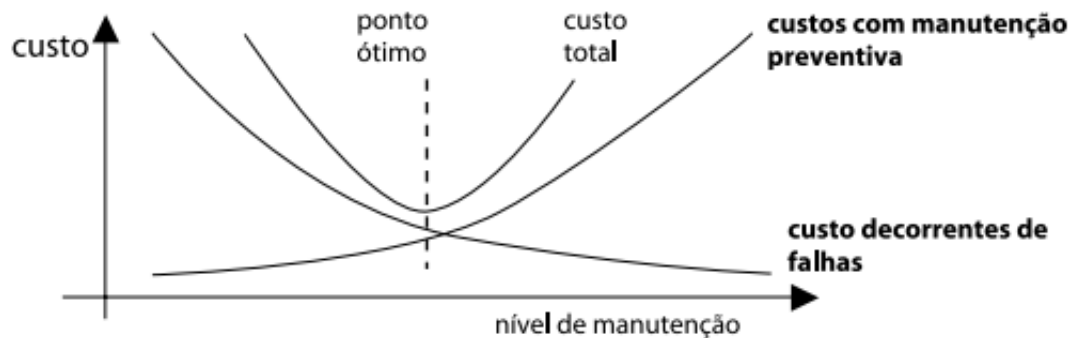


Figura 7 - Custo x disponibilidade de equipamentos

2.4.2 CUSTO DA CORROSÃO NA INDÚSTRIA

O desenvolvimento econômico de qualquer região, estado ou país depende não apenas de seus recursos naturais e atividades produtivas, mas também da infra-estrutura responsável pela exploração, processamento e comercialização de mercadorias. Sistemas de irrigação, estradas, pontes, aeroportos, transporte marítimo, terrestre e aéreo, edifícios escolares, escritórios e residências, instalações industriais são afetadas pela corrosão e, portanto, suscetíveis a processos de deterioração e degradação.

Embora os custos variem de indústria para indústria, vários elementos se combinam para compor o total custo de corrosão. Alguns são facilmente reconhecidos; outros são menos reconhecíveis. Na fabricação, os custos de corrosão são incorridos no ciclo de desenvolvimento do produto de várias maneiras, começando pelos materiais, energia, mão de obra, e conhecimento técnico necessário para produzir um produto. Por exemplo, um produto pode exigir pintura para proteção contra corrosão. Um metal resistente à corrosão pode ser escolhido no lugar do aço carbono comum, e serviços técnicos podem ser necessários para projetar e instalar proteção catódica em um produto. Pode ser necessário tratamento térmico adicional para aliviar as tensões para proteção contra trincas por corrosão sob tensão. Outros custos operacionais também são afetados pela corrosão. Inibidores de corrosão, por exemplo, frequentemente devem ser adicionados aos sistemas de tratamento de água. Partes dos custos de manutenção e reparo podem ser atribuídos à corrosão, e especialistas em corrosão são frequentemente empregados para implementar programas de controle de corrosão.

Os custos de capital também são incorridos devido à corrosão. A vida útil de um equipamento é depreciado pela corrosão. Para a operação espera-se que o equipamento que funcione continuamente, porem a capacidade para permitir paradas programadas e manutenção relacionada à corrosão, exigem custos, uns programados e outros extras. Em outros casos, equipamentos redundantes são instalados para permitir a manutenção em um enquanto o processamento continua com outra unidade.

O estudo original de Battelle / NIST identificou dez elementos do custo de corrosão:

- Substituição de equipamentos
- Perda de produto

- Manutenção e reparação
- Excesso de capacidade
- Equipamento redundante
- Controle de corrosão
- Suporte técnico
- Desenho
- Seguros
- Inventário de peças e equipamentos

Substituição, perda de produto, manutenção e reparo são custos diretos. O excesso de paradas causadas pela manutenção poderia ser reduzida se a corrosão não fosse um fator. Esse elemento representa capacidade extra da planta (capital em estoque) mantida devido à corrosão. Equipamentos redundantes são responsáveis por equipamentos adicionais da planta (capital em estoque) necessários devido à corrosão. Componentes críticos específicos como grandes ventiladores e bombas, têm tratamento idêntico para permitir o processamento durante a manutenção para controle de corrosão.

Os custos do controle de corrosão são diretos, assim como os custos de suporte (engenharia, pesquisa e desenvolvimento e testes) associados à corrosão. Os dois últimos elementos de custo, seguro e inventário de peças e equipamentos, pode ser significativo em casos específicos. Além dos itens relacionados acima, outros fatores de custo menos quantificáveis, como perda de vida, pode e certamente terá um grande impacto. Falhas únicas e catastróficas - por exemplo, um vazamento induzido por corrosão em um oleoduto, com a resultante perda de produto e contaminação ambiental - pode resultar em danos dispendiosos, difíceis de avaliar ou reparar, bem como em multas legais "Dano punitivo".

Segundo a NACE, o custo global da corrosão estimado em 2013 foi de US\$ 2,5 trilhões, o que equivaleu a 3,4% do PIB global naquele ano. Usando práticas de controle de corrosão disponíveis, estima-se que economias entre 15 e 35% do custo da corrosão podem ser realizadas; ou seja, entre US\$ 375 e US\$ 875 bilhões anualmente em uma base global. Esses custos normalmente não incluem segurança individual ou consequências ambientais. Por meio de quase acidentes, incidentes, desligamentos forçados (interrupções), acidentes, etc., várias indústrias perceberam que a falta de gerenciamento da corrosão pode ser muito cara e que, por meio do gerenciamento adequado da corrosão, podem ser alcançadas economias significativas de custos ao longo da vida útil do um ativo. Portanto para atingir essa economia seria necessário a implementação de um sistema de gerenciamento voltado apenas para corrosão. (ui X 2021)

Os custos de capital também são afetados pela corrosão, pois existem equipamentos que tem vida útil depreciada por esse fator.

A Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO) estima que a corrosão seja responsável por 3% do PIB brasileiro (2018) de acordo com um estudo realizado pelos laboratórios Battelle Columbus e pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) nos Estados Unidos.

A corrosão metálica representa um custo de aproximadamente 9% se for considerando o estudo sobre o PIB global na área de manutenção industrial, reduzindo para aproximadamente 4% quando avaliado apenas o setor petroquímico.

2.4.3 TIPOS DE MANUTENÇÃO

A manutenção possui basicamente 3 tipologias: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

A primeira trata-se de corrigir a falha, ou seja, espera-se o dano acontecer para então agir desde que a falha não ponha em risco a segurança da estrutura, é feita sempre que o equipamento/estrutura falha, ou seja, “quebrou, conserta”. Ela pode ser dividida em dois tipos:

Manutenção corretiva não planejada - correção da falha de maneira aleatória, ou seja, é a correção da falha propriamente dita ou desempenho menor que o esperado após a ocorrência do fato. Esse tipo de manutenção implica em altos custos, pois, causa perdas de produção e, em consequência, os danos aos equipamentos é maior.

Manutenção corretiva planejada - é a correção que se faz em função de um acompanhamento preditivo, detectivo ou até mesmo pela decisão gerencial de se operar até ocorrer à falha. “Pelo seu próprio nome planejado”, indica que tudo o que é planejado, tende a ficar mais barato, mais seguro e mais rápido

A manutenção preventiva requer atuação da manutenção mesmo que o componente/peça não apresente nenhum dano, sendo substituído proativamente obedecendo um planejamento baseado em períodos de tempo pré-estabelecidos.

Na manutenção preditiva os componentes são substituídos conforme o monitoramento de condições de operação dos sinais de necessidades das estruturas, normalmente através de aparelhos de medição, como por exemplo, equipamentos de medição de vibração de acordo com as informações adquiridas ou inspeções. Nela são elaborados planos de manutenção periódica para serem executados os serviços antes que a falha aconteça. (Maggard 1992)



Figura 8 - Classificação da manutenção pela ABRAMAN

2.5 A METODOLOGIA FFS – ADEQUAÇÃO AO USO

A metodologia “Fitness-for-Service” (FFS) é amplamente utilizada pelas indústrias de refino e petroquímicas para avaliação de integridade mecânica de equipamentos sob pressão e tubulações. O principal objetivo é avaliar se equipamentos sujeitos à mecanismos de dano ativos, como perdas de espessura devido à corrosão, por exemplo, podem continuar a operar sob determinadas condições já não suportadas pelos cálculos de projeto. O API 579-1/ASME FFS-1 é o código mais usado que aplica a metodologia FFS, porém é restrito seu uso para códigos de projeto de fabricação de equipamentos e tubulações da ASME (The American Society of Mechanical Engineers) e do API (American Petroleum Institute) . (Anderson 2000)

A vantagem de realizar um estudo de Fitness-for-Service é que permite de forma segura prolongar a vida útil de um equipamento que tenha sofrido dano. A norma oferece três níveis de avaliação, a saber:

Nível 1 (Level 1):

- Produz resultados mais conservadores, porém utiliza procedimentos mais fáceis de executar.
- Dependem de um mínimo de informações provenientes da inspeção e informações do equipamento.
- Tanto engenheiros quanto técnicos podem realizar esse tipo de avaliação.
- Geralmente os procedimentos são limitados a determinadas geometrias e materiais específicos.
- São procedimentos que podem se transformar em ferramentas importantes das equipes de acompanhamento da integridade nas unidades devido a rapidez com que o resultado é obtido, sendo recomendado para as situações envolvendo paradas operacionais e condições de emergências.

Nível 2 (Level 2):

- Produz resultados menos conservadores que o Nível 1, porém utiliza procedimentos e cálculos mais complexos.
- A quantidade de informação necessária geralmente é similar ao Nível 1.
- Engenheiros com experiência em realizar estudos FFS são exigidos para esse nível.
- Geralmente os procedimentos possuem menos limitações de aplicação quando comparados aos do Nível 1.

Nível 3 (Level 3):

- Produz resultados menos conservadores que o Nível 2, porém utiliza procedimentos mais complexos, como simulações computacionais pelo método dos elementos finitos ou técnicas experimentais.
- Uma quantidade maior e mais detalhada de informações provenientes da inspeção e do equipamento é requerida.
- Engenheiros com experiência em realizar estudos FFS são exigidos para esse nível.
- Geralmente os procedimentos possuem pouca ou nenhuma limitação de aplicação.

Todas as análises iniciam pelo Nível 1 de avaliação. Caso o dano seja considerado inaceitável pelos critérios de aceitação desse nível ou caso não seja possível utilizá-lo devido aos limites de aplicação, pode-se proceder para o Nível 2 e assim sucessivamente.

Destaca-se que as análises Fitness-For-Service somente são necessárias quando os limites admissíveis do código original de projeto do equipamento são ultrapassados ou quando se espera que sejam ultrapassados antes da próxima parada do ativo.

A metodologia FFS usa os conceitos da Resistência dos Materiais, Mecânica da Fratura e técnicas de monitoramento e reparação de componentes estruturais, aplicáveis a maioria dos componentes industriais. Os resultados da avaliação oferecem uma base sólida para decisões de continuar a funcionar como está ou alterar, reparar, monitorar, retirar ou substituir o equipamento. Uma análise de vida residual também pode ser realizada como parte da avaliação, que pode ser usada para definir intervalos de inspeção futura. Usada corretamente, esta metodologia pode proporcionar um bom equilíbrio entre a economia e a segurança, evitando reparos desnecessários durante a vida em serviço da estrutura. Uma avaliação FFS típica pode envolver várias disciplinas de engenharia, e exige uma quantidade de dados de entrada de acordo com o nível de exigência da avaliação.

Os procedimentos de avaliação FFS no código são organizados em partes por tipos de defeito e mecanismo de dano, conforme é possível verificar abaixo:

- PART 1 - INTRODUCTION
- PART 2 - FITNESS-FOR-SERVICE ENGINEERING ASSESSMENT PROCEDURE
- PART 3 - ASSESSMENT OF EXISTING EQUIPMENT FOR BRITTLE FRACTURE
- PART 4 - ASSESSMENT OF GENERAL METAL LOSS
- PART 5 - ASSESSMENT OF LOCAL METAL LOSS
- PART 6 - ASSESSMENT OF PITTING CORROSION
- PART 7 - ASSESSMENT OF HYDROGEN BLISTERS AND HYDROGEN DAMAGE ASSOCIATED WITH HIC AND SOHC
- PART 8 - ASSESSMENT OF WELD MISALIGNMENT AND SHELL DISTORTIONS
- PART 9 - ASSESSMENT OF CRACK-LIKE FLAWS
- PART 10 - ASSESSMENT OF COMPONENTS OPERATING IN THE CREEP RANGE
- PART 11 - ASSESSMENT OF FIRE DAMAGE
- PART 12 - ASSESSMENT OF DENTS, GOUGES AND DENT-GOUGE COMBINATIONS
- PART 13 - ASSESSMENT OF LAMINATIONS
- PART 14 - ASSESSMENT OF FATIGUE DAMAGE

Figura 9 - Partes do código API-579

No caso específico de avaliação de perda de espessura, considera-se que houve perda de espessura (metal loss) quando a redução da espessura nominal do componente ultrapassa a espessura mínima requerida de projeto (Figura 10). A avaliação FFS é requerida quando há perda de espessura evidenciada ou quando, em função de uma taxa de corrosão conhecida, se espera ter perda de espessura antes da próxima parada do equipamento.

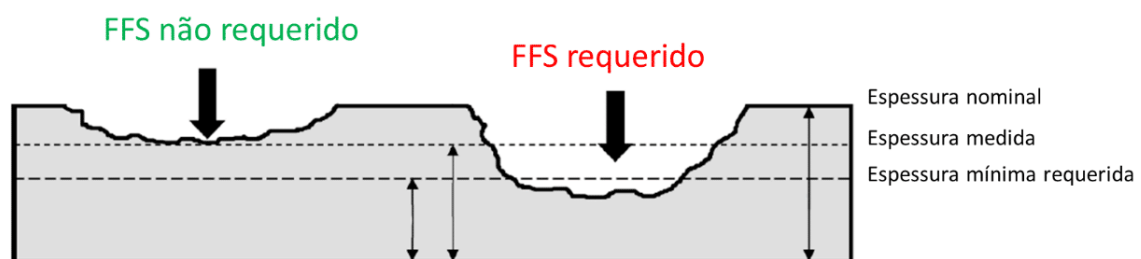


Figura 10 - Avaliação FFS de perda de espessura (Fonte API-579)

A perda de espessura pode ser classificada como generalizada (general metal loss) ou localizada (local metal loss), porém a distinção exata entre ambas somente pode ser realizada conhecendo-se as características do perfil de perda de espessura da região. A avaliação FFS de perda de espessura generalizada é realizada conforme a Part 4 – Assessment of General Metal Loss do API 579-1/ASME FFS-1 e a avaliação de perda de espessura localizada conforme a Part 5 – Assessment of Local Metal Loss.

2.5.1 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE PERDA DE ESPESSURA CONFORME API 579

A Figura 11 apresenta o procedimento inicial para avaliação de perda de espessura em um equipamento. Inicialmente são reunidos os dados de inspeção das regiões com perda de espessura e identificadas quais apresentam perda generalizada e quais apresentam perda localizada. Em seguida, verifica-se de antemão se todas as regiões satisfazem as condições para serem avaliadas analiticamente pelos Níveis 1 ou 2. Caso positivo, realiza-se a verificação conforme os procedimentos da Part 4 (perda de espessura generalizada) ou Part 5 (perda de espessura localizada). Caso alguma região não possa ser avaliada pelos Níveis 1 ou 2, realiza-se diretamente a análise pelo Nível 3. Caso a perda de espessura em alguma região seja considerada inaceitável pelos Níveis 1 ou 2, pode-se optar por avaliar especificamente a região pelo Nível 3 para reduzir o conservadorismo e possibilitar a aprovação.

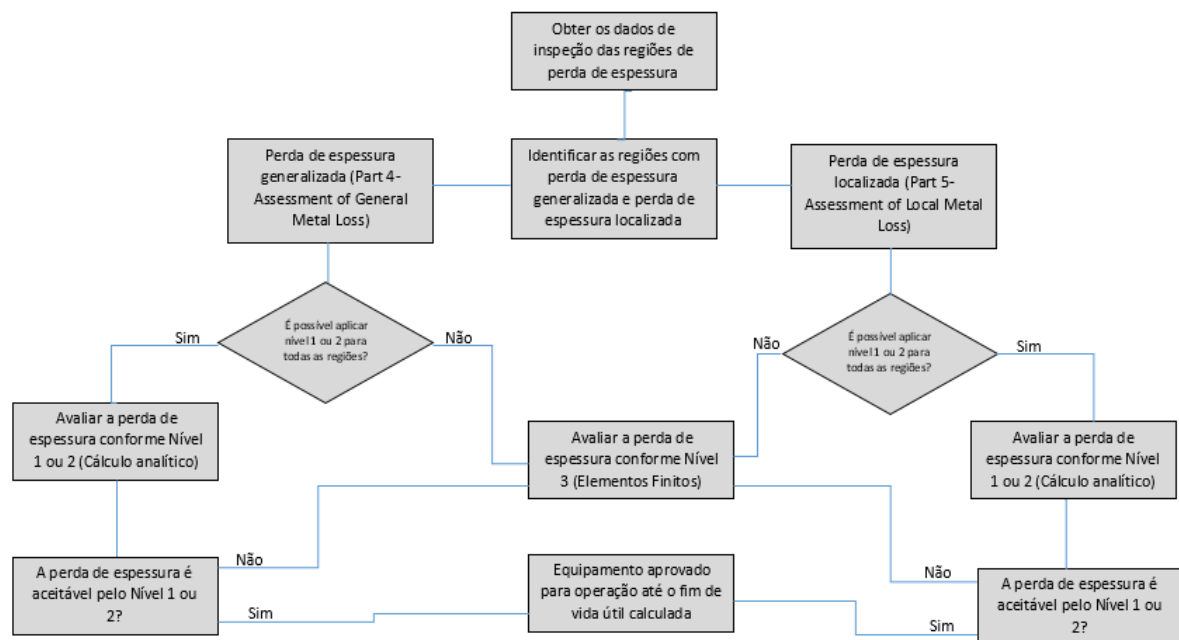


Figura 11 - Procedimento inicial de avaliação API-579

A Figura 12 apresenta o procedimento de avaliação de perda de espessura pelo Nível 3. A avaliação é realizada de forma numérica através de um modelo computacional em elementos finitos seguindo as recomendações do Annex 2D da FFS Assessment do API 579-1/ASME FFS-1, que por sua vez é baseado na Part 5 do código ASME Section VIII Division 2.

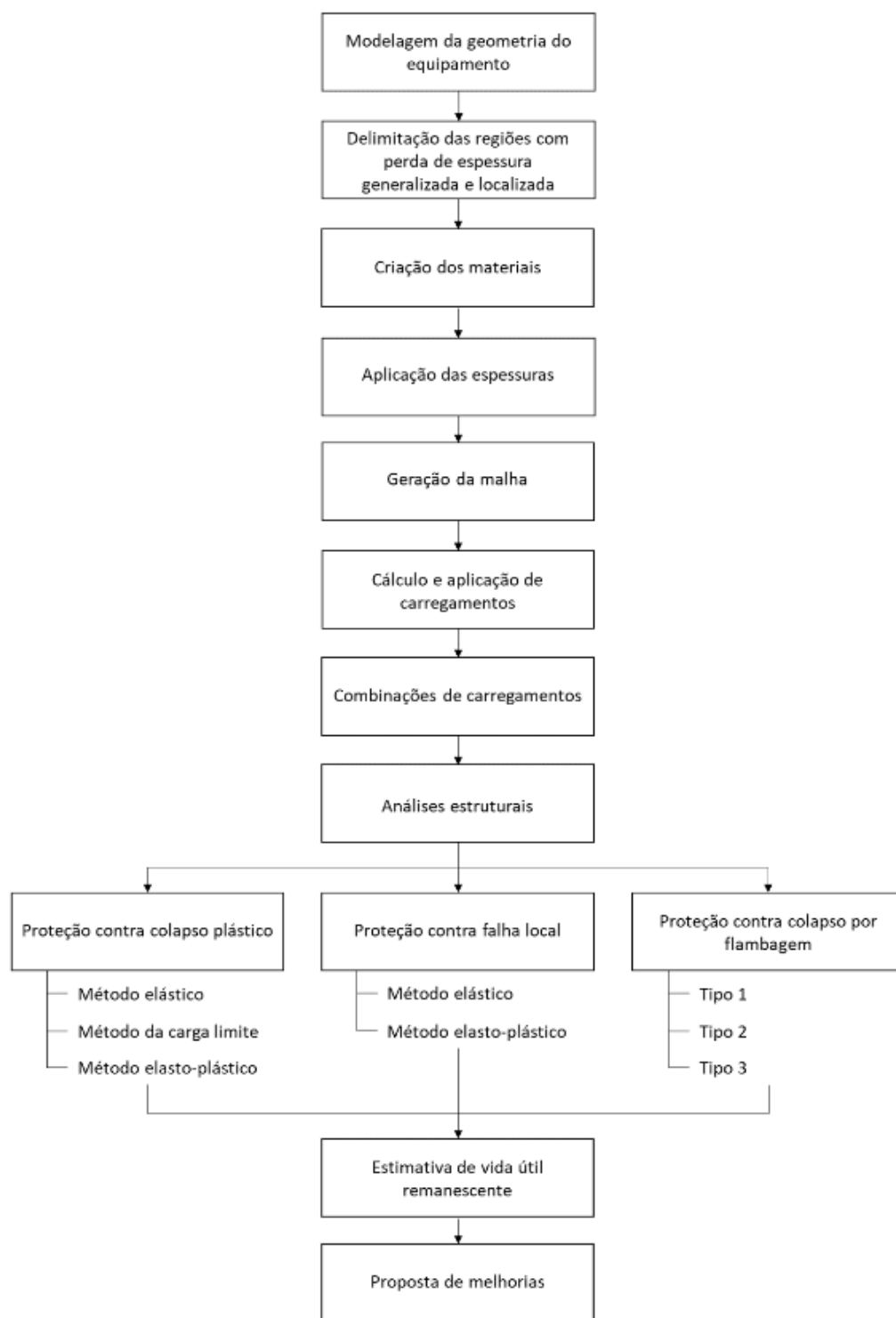


Figura 12 - Procedimento de avaliação pelo Nível 3

A primeira etapa da elaboração do modelo numérico em elementos finitos consiste na modelagem da geometria do equipamento conforme os desenhos de fabricação enviados pelo cliente. No caso de vasos de pressão, os seguintes componentes são considerados no modelo:

- Costado
- Tâmpas
- Suportes
- Pescoço de bocais e bocas de visita
- Reforços de bocais e bocas de visita
- Flanges
- Anéis enrijecedores (se aplicável)

No caso de tanques de armazenamento, os seguintes componentes são considerados no modelo:

- Costado (anéis)
- Teto
- Perfis enrijecedores no costado ou teto (se aplicável)
- Pescoço de bocais e bocas de visita
- Reforços de bocais e bocas de visita
- Flanges

Após a modelagem da geometria do equipamento é realizada a delimitação das regiões com perda de espessura generalizada seguindo as dimensões indicadas no relatório de inspeção enviado pelo cliente. Caso perda de espessura localizada (LTA's ou grooves) seja identificada dentro de alguma região, também é realizada a delimitação dessas áreas.

Após a definição dos materiais, espessuras e geração da malha, é realizado o cálculo e aplicação de carregamentos e combinações. Os carregamentos típicos a serem considerados no modelo estão apresentados em figuras no procedimento que são uma reprodução da tabela 2D.1 do API 579-1/ASME FFS-1. Em geral, são considerados:

- Peso próprio
- Pressão interna
- Pressão externa
- Pressão hidrostática na condição de operação
- Pressão hidrostática na condição de teste hidrostático
- Acelerações
- Sobrecarga no teto (especificamente para tanques)
- Vento
- Temperatura

Em seguida, os carregamentos são combinados de acordo com o método de análise a ser utilizado.

Caso a verificação de proteção contra colapso plástico seja realizada utilizando o Método Elástico, as combinações de cargas são consideradas conforme modelos específicos presentes no código. As combinações para o Método da Carga Limite e Método Elasto-plástico também são apresentadas em tabelas do API 579-1/ASME FFS-1.

Embora este código tenha sido desenvolvido para aplicação em equipamentos e tubulações, as técnicas e métodos, após passarem por adaptações, têm um grande potencial de serem aplicados em estruturas metálicas.

2.5.2 ESTADO ATUAL DE INTEGRIDADE X VIDA REMANESCENTE

Duas perguntas normalmente são respondidas numa avaliação FFS: Qual é o estado atual de integridade? E, Qual a vida restante?

Estas perguntas não significam a mesma coisa. Analisando simplificadaamente imagine uma corrosão ativa. Se ela diminui a espessura da parede para metade do necessário em um local podemos fazer uma análise de tensão e decidir se a região corroída é segura para continuar em operação. Mas isso não diz sobre por quanto tempo mais ela estará segura. Portanto para calcular o tempo de vida restante, será necessário calcular a espessura mínima aceitável no local e identificando uma taxa de corrosão poderia ser possível calcular quanto tempo levaria para se atingir a espessura mínima. Este seria o cálculo de vida residual. Obviamente que as práticas operacionais devem ser monitoradas após a aplicação do FFS para verificar se não houve aumento das taxas aplicadas para realização de uma nova avaliação.

3

ADAPTAÇÃO DA METODOLOGIA FITNESS FOR SERVICE

3.1 MÉTODO ADAPTADO DE FFS

O foco principal deste trabalho é a proposição de recomendações para avaliação de danos causados pela corrosão atmosférica em estruturas de suporte de tubulações industriais numa indústria petroquímica de grande porte, aplicando uma adaptação simplificada da metodologia Fitness For Service-FFS. Como apresentado no capítulo 2.5, as Partes 4 e 5 do API 579 são as aplicadas para avaliação de perda de metal devido a corrosão, seja de forma localizada ou generalizada. Ambas as partes apresentam 3 níveis de abordagem que podem ser atingidas a depender da complexidade da estrutura, porém neste trabalho a proposta será através de um procedimento simplificado, o qual não requer uma grande quantidade de dados nem cálculos complexos, mas que geram uma avaliação rápida e direta, permitindo reavaliar condições de uso.

Desta forma, esse trabalho busca desenvolver uma adaptação da abordagem de nível 1 da metodologia, utilizando tabelas, gráficos ou cálculos rápidos para suportar a decisão dos integrantes dos setores da inspeção e manutenção na tomada de decisão.

Atualmente, a empresa utiliza uma matriz de risco adaptada, a qual avalia o risco de um colapso de uma estrutura metálica *versus* nível de corrosão encontrado para definir prazos para execução da manutenção. Todavia, neste padrão não está claro qual o escopo de manutenção recomendado.

Esta indefinição de escopo, na maioria dos casos, induz o inspetor a definir uma manutenção mais conservativa, levando à uma recomendação de substituição completa ou parcial de um elemento de um suporte metálico, o que implica em custos expressivos de manutenção.

Neste cenário de oportunidades, elaborou-se uma proposta de modelo simplificado que avaliasse o risco envolvido (na mesma base já utilizada pela empresa) porém com a definição de um escopo recomendado baseado no nível de corrosão encontrado e no coeficiente de segurança calculado.

Para avançar no desenvolvimento de um modelo de análise padronizado, limitou-se as avaliações para um modelo de elementos de suporte metálico, para uma carga permanente e centralizada e em diferentes níveis de corrosão em pontos localizados.

Para a análise da carga, admitiu-se que o projeto do suporte metálico foi realizado corretamente e que, com perdas de espessura devido a corrosão, parte do coeficiente de segurança projetado foi “consumido”.

O valor mínimo de coeficiente de segurança utilizado como referência foi calculado a partir de referências internas utilizadas na empresa onde foi realizado o trabalho.

Tabelas e gráficos construídos através das informações e dos cálculos do modelo definido apresentam o risco associado (coeficiente de segurança) versus o nível de corrosão encontrado (resultado da inspeção) e recomendam 4 opções de escopo:

- a) **Substituição Imediata**
O elemento está em um nível de corrosão crítico (maior que 50%) e os níveis de carregamento do elemento são muito elevados, levando a um risco de colapso da estrutura. Os fatores de segurança nestas situações estão abaixo do mínimo admitido pela empresa.
- b) **Reforço ou substituição Programada**
O elemento está numa faixa próxima do limite de corrosão crítico (entre 35 a 50%) e do coeficiente de segurança mínimo admitido. Neste caso, em função das taxas de corrosão dos micro-climas encontrados, dever-se-ia programar um reforço estrutural ou a substituição do elemento corroído.
- c) **Reparo Programado**
O elemento está numa faixa distante do limite de corrosão crítico (até 35%) e do coeficiente de segurança mínimo admitido. Neste caso, caso houvesse disponibilidade de recurso no curto prazo, um tratamento de pintura da região corroída seria o necessário para a manutenção do elemento.
- d) **Não requer Atuação**
Os níveis de corrosão e/ou de carregamento são desprezíveis e não é necessária uma ação corretiva. Preventivamente é recomendado a realização de um pintura para parar o processo corrosivo.

3.1.1 ABORDAGEM DE AVALIAÇÃO

A Parte 4 da FFS aplica-se a perda de metal por corrosão, erosão ou danos mecânicos que reduz a resistência da estrutura à pressão e cargas mecânicas.

A abordagem usada será mais direta de “capacidade x demanda” dentro da estrutura da engenharia e será composta dos seguintes passos:

- Passo 1: análise estrutural “inalterada” da estrutura original, ou seja, desconsiderando os efeitos da corrosão. Será adaptada a abordagem pelo fator de força restante que é a razão entre o limite ou carga de colapso plástica para os limites de resistência e segurança:

$$RSF = \frac{L_{DC}}{L_{UC}} \quad (1)$$

$$SF = \frac{E_D}{R_D} \quad (2)$$

Onde:

LDC: carga limite ou de colapso no elemento danificado (load of damage component)

LUC: carga limite ou de colapso no elemento não danificado (load of undamage component)

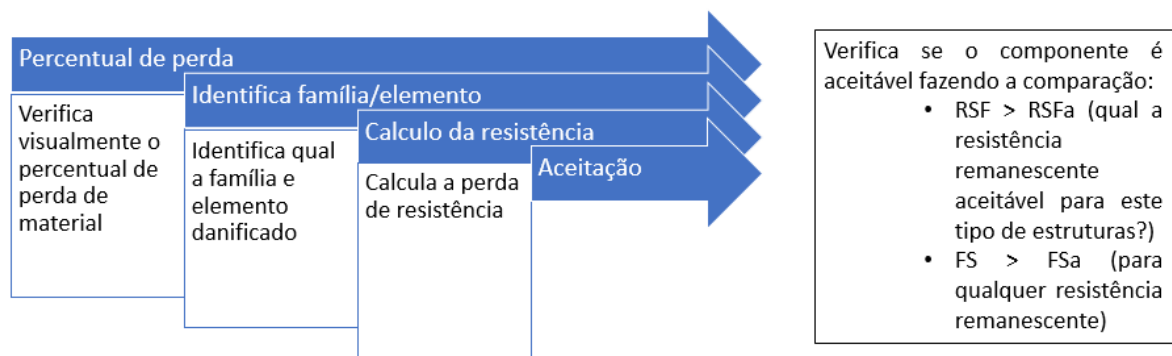
RSF: fator de força restante (remaining strength factor)

SF: coeficiente de segurança (safety factor)

Ed: valor de cálculo do efeito das ações

Rd: valor de cálculo da resistência correspondente

- Passo 2: estimativa do grau crítico de corrosão por meio de equação que considera a perda de secção em cada elemento danificado.



3.1.2 MECANISMOS DE DANO

O mecanismo de dano aqui tratado é a corrosão local e trata-se de um mecanismo incremental e cumulativo e é de extrema importância conhecê-los pois são o modo de falha.

A corrosão consiste na perda progressiva de material devido a um processo eletroquímico que é extremamente sensível às condições ambientais locais e a taxa de perda de material pode variar significativamente durante a vida útil estrutural.

3.2 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE SEGURANÇA

Utilizando-se os princípios e requisitos estabelecidos no Eurocódigo 0, para os cálculos foi considerado a capacidade resistente da secção transversal de um elemento para resistir as ações sem rotura mecânica, como, por exemplo, resistência à flexão, resistência a encurvadura longitudinal e compressão, porém não foi feita a verificação quanto a encurvadura local da resistência seccional.

Foi utilizada a análise elástica linear de primeira ordem sem redistribuição, ou seja, análise estrutural elástica, baseada em relações momentos/curvaturas aplicadas a geometria inicial da estrutura.

Por se tratar de segurança da estrutura, processo ou pessoas, foi utilizado o cálculo para estado limite último com base no método dos coeficientes parciais, sendo adotado $\gamma_{m0}=1$ para cálculo da resistência das secções transversais e $\gamma_{m1}=1$ para resistência do elemento em relação a fenómeno de encurvadura.

Foram consideradas as ações permanentes e desconsiderada as ações do vento e sismo.

Os valores de cálculo das ações permanentes foram expressos da seguinte forma:

$$F_d = \gamma_f \cdot F_{rep}$$

Com:

$$F_{rep} = \psi \cdot F_k$$

Onde:

γ_f : coeficiente parcial relativo a ação

ψ : coeficiente igual a 1 ou ψ_0 , ψ_1 ou ψ_2

F_k : valor característico da ação

F_{rep} : valor representativo da ação

O valor de cálculo da resistência foi obtido diretamente do valor característico da resistência do material.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m}$$

Onde:

R_d : resistência de cálculo

R_k : resistência característica

γ_m : coeficiente parcial de resistência

Conforme previsto em norma a estrutura deve ser projetada de modo que a sua deterioração, ao longo da vida útil de projeto, não reduza o seu desempenho abaixo do prescrito, tendo em conta o ambiente e o nível de manutenção previsto.

3.3 NÍVEIS DE CORROSÃO

As resistências foram calculadas para diversos níveis de corrosão porém foram distribuídas em fatores percentuais de abrangência conforme quadro:

GRAU DO DANO							
Perda de material, parafusos ou solda ($P > 50\%$); Corrosão Severa generalizada.	Perda de material, parafusos ou solda ($50\% > P \geq 40\%$); Corrosão Severa Localizada.	Perda de material, parafusos ou solda ($40\% > P \geq 30\%$); Corrosão Moderada generalizada;	Perda de material, parafusos ou solda ($30\% > P \geq 20\%$); Corrosão Moderada Localizada.	Perda de material, parafusos ou solda ($20\% > P \geq 10\%$); Corrosão Leve generalizada.	Perda de material, parafusos ou solda ($10\% > P$); Corrosão Leve Localizada.	Início de Corrosão; falta de acessórios	Perda de pintura

Figura 13 – Níveis de corrosão

Considerando o fator $P > 50\%$ sendo o mais crítico, com prazo de execução imediata, utilizou-se o coeficiente de segurança obtido para esse nível de corrosão para verificar se os demais elementos foram

classificados em níveis de segurança conservativos de maneira que os resultados obtidos atendessem aos níveis de segurança relativos.

A fiabilidade em termos de vida útil para os elementos apresentados foi expressa em termos probabilísticos considerando causa e severidade, sendo aplicada pela classificação por elemento. Para adopção de um nível de fiabilidade diferente que reduza o risco de rotura, poderá ter-se em conta a velocidade de propagação da corrosão com cálculos de vida útil remanescente por ambiente de exposição, assunto que não será tratado neste trabalho.

3.4 DESCRIÇÃO DE CRITÉRIOS AVALIADOS

Foram avaliadas 7 amostras para família de elementos, viga e pilar, nos critérios existentes no EC3 para avaliação da resistência à flexão, resistência à compressão e resistência ao esforço transversal com suas respectivas verificações de segurança estrutural de projeto. Para isso utilizou-se de uma folha de cálculo preparada para o cálculo quantitativo para a primeira etapa e qualitativo dos parâmetros utilizados em cada critério a ser avaliado numa etapa posterior.

Os critérios avaliados e seus respectivos limites foram considerados nas amostras conforme a localização do dano no elemento e realizada a verificação quanto à flexão, compressão e esforço transversal.

Os resultados dessa avaliação será comparado com o quadro utilizado pela indústria que orienta quanto a prioridade de execução de manutenção em cada componente, portanto foi feita a divisão da estrutura e dos elementos conforme definido pela indústria.



Figura 14 - Estrutura de suporte de tubulação em área industrial (fonte: empresa analisada)

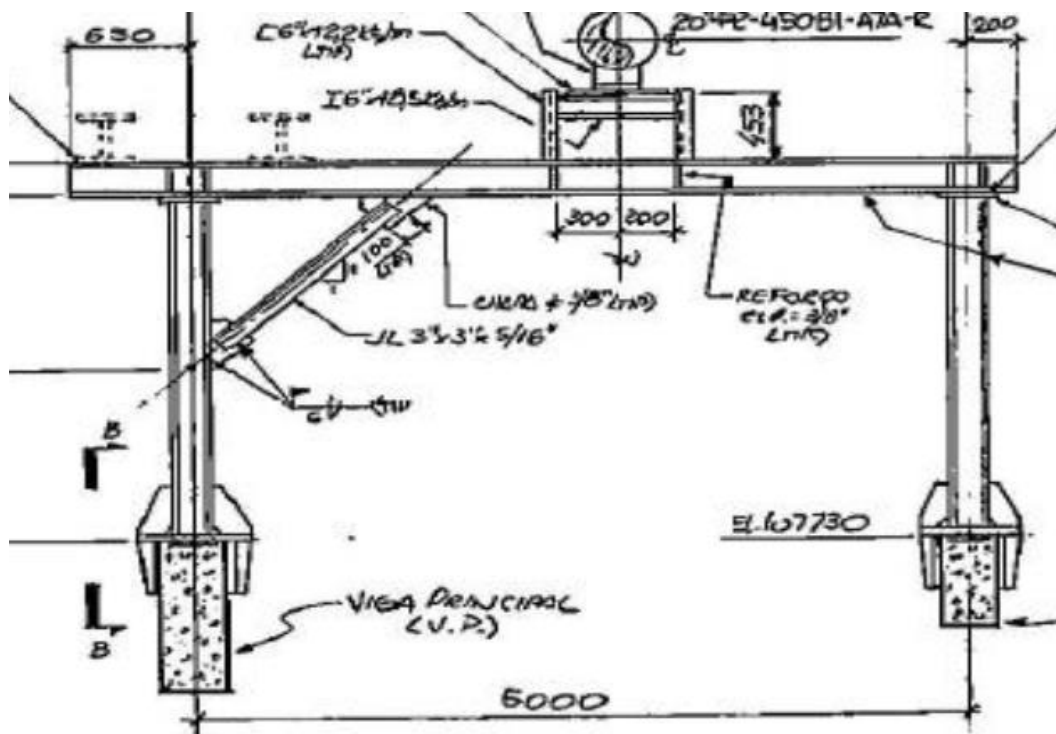


Figura 15 - Croqui de dimensionamento da estrutura analisada (fonte: empresa analisada)

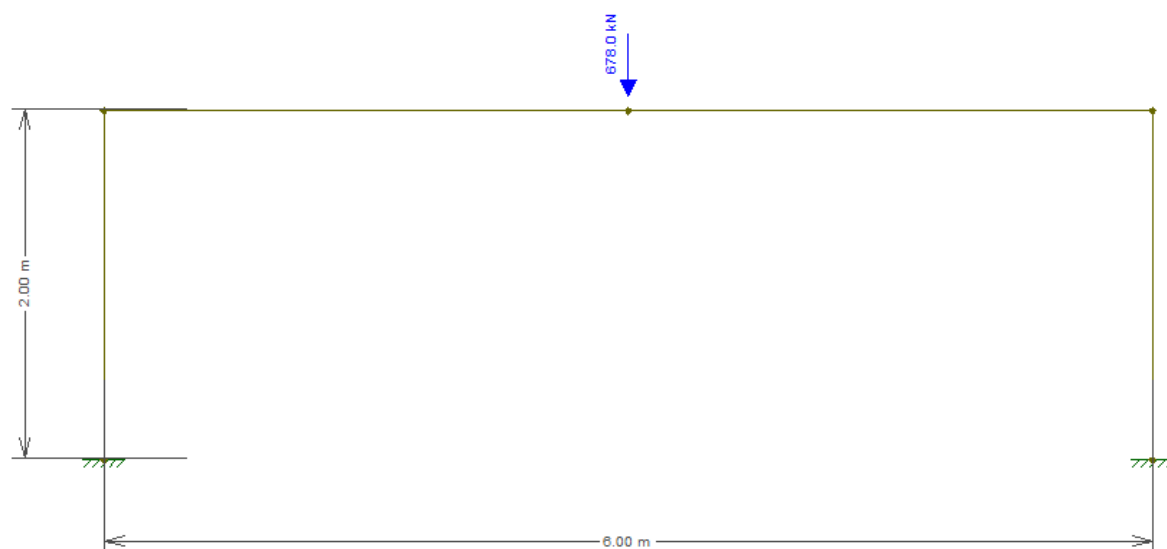


Figura 16 – Representação da estrutura no FTOOL

Dados do Perfil CVS 200x26

$A=$	156 cm ²
$F_y=$	250 MPa
$\gamma_{m0}=$	1
$\gamma_{m2}=$	1,25
$h=$	252 mm
$b=$	200 mm
$h_w=$	200 mm
$t_w=$	26 mm
$t_f=$	26 mm
$W_{pl}=$	cm ³
$W_{el}=$	3161,77 cm ³
$A \cdot y^2=$	38046,32 cm ⁴
$I=$	39838,24 cm ⁴

Figura 17 - Dados do perfil analisado

Resistência da estrutura sem danos

$L=$	6 m
$N_{rd}=$	3900,00 kN
$M_{rd}=$	790,44 kN.m

Figura 18 - Dados de resistências para a estrutura sem danos

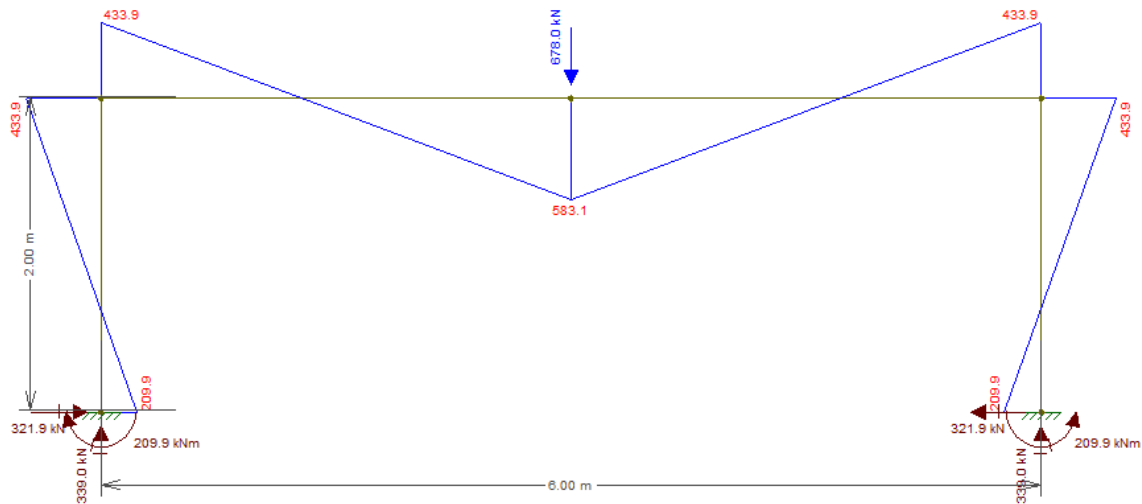


Figura 19 - Cargas atuantes, reações e diagrama de momentos fletores

3.4.1 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA – ELEMENTO ALMA DE VIGA

Considerando que a classificação da secção da viga como classe 3, foi utilizado o módulo de flexão elástico e desprezado o cálculo de esforço axial, sendo feita a verificação da resistência seccional a meio vão onde os esforços são mais críticos. Também foi considerado que a viga não sofre fenômeno de encurvadura local.

Para fins de verificação foi feita uma simplificação no modelo, considerando apenas o perfil simples sem os travamentos diagonais e reforços tornando o cálculo mais conservativo na verificação.

1.º Critério: Resistência da secção transversal quanto à flexão.

Amostra 1: O dano localiza-se no ponto médio de flexão onde o momento fletor é máximo, porém no centro da alma da viga, onde o centro geométrico mantém-se constante devido ao aumento proporcional da corrosão a partir desse centro, bastando calcular os esforços resistentes devido a redução de área no elemento.

$$M_{rd} = W_y \cdot f_y \quad (3)$$

Para verificação da segurança de projeto a equação abaixo deverá ser satisfeita:

$$M_{ed} \leq M_{rd} \quad (4)$$

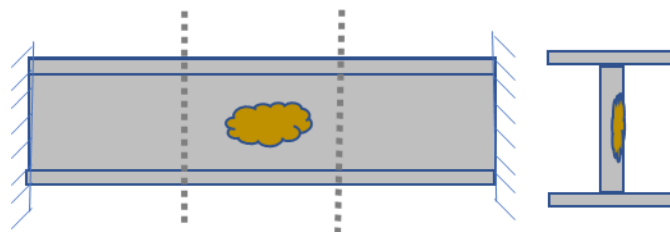


Figura 20 - Amostra 1 (Localização do dano no centro do elemento)

A Tabela 1 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional a partir do centro da peça para flexão pura.

Tabela 1 - Cálculo do momento resistente por % de perda de área na Amostra1

CP	%area alma	I _{eff}	W _y	Amostra1	
				M _{rd}	M _{rd} >M _{ed}
CP1	100%	39838,240	3.161,77	790,44	OK
CP2	90%	38839,355	3.082,49	770,62	OK
CP3	80%	37840,469	3.003,21	750,80	OK
CP4	70%	36841,584	2.923,94	730,98	OK
CP5	60%	35842,699	2.844,66	711,16	OK
CP6	50%	34843,813	2.765,38	691,35	OK
CP7	40%	33844,928	2.686,11	671,53	OK
CP8	30%	32846,043	2.606,83	651,71	OK
CP9	20%	31847,157	2.527,55	631,89	OK
CP10	10%	30848,272	2.448,28	612,07	OK

Amostra 2: O dano localiza-se no ponto médio de flexão onde o momento fletor é máximo, porém na parte superior da alma da viga, portanto devendo-se calcular um novo eixo geométrico.

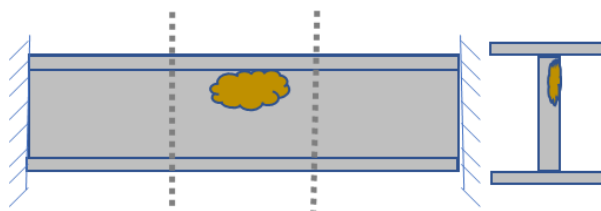


Figura 21 - Amostra2 (Localização do dano no centro do elemento na parte superior da alma)

A Tabela 2 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional ao dano da peça para flexão pura.

Tabela 2 - Cálculo do momento resistente por % de perda de área na Amostra2

	%area alma	I _{geff} (cm ⁴)	W _{eff} (cm ³)	Amostra2		
				M _{rd} (kN.m)	Med (kN.m)	M _{rd} >Med
CP1	100%	37774,4	2.997,97	749,49	583,10	OK
CP2	90%	37872,2	2.975,87	743,97		OK
CP3	80%	37911,8	2.942,15	735,54		OK
CP4	70%	37827,8	2.891,71	722,93		OK
CP5	60%	37555,0	2.819,88	704,97		OK
CP6	50%	37027,8	2.722,64	680,66		OK
CP7	40%	36180,7	2.596,70	649,18		OK
CP8	30%	34947,8	2.439,70	609,92		OK
CP9	20%	33263,0	2.250,27	562,57		NÃO OK
CP10	10%	31060,2	2.028,19	507,05		NÃO OK

Amostra 3: O dano localiza-se no ponto médio de flexão onde o momento fletor é máximo, porém na parte inferior da alma da viga, portanto devendo-se calcular um novo eixo geométrico.

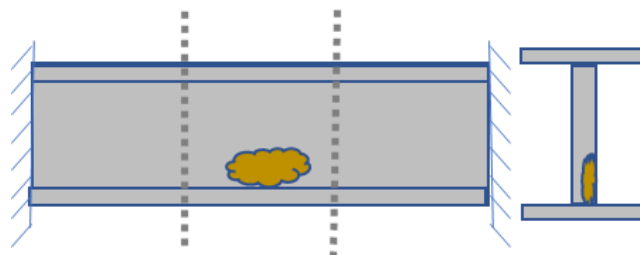


Figura 22 – Amostra3 (Localização do dano no centro do elemento na parte inferior da alma)

A Tabela 3 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional ao dano na peça para flexão pura.

Tabela 3 - Cálculo do momento resistente por % de perda de área na Amostra3

				Amostra3		
	%area alma	I _{geff} (cm ⁴)	W _{eff} (cm ³)	M _{rd} (kN.m)	Med (kN.m)	M _{rd} >Med
CP1	100%	37774,4	2.997,97	749,49	583,10	OK
CP2	90%	37751,1	2.970,52	742,63		OK
CP3	80%	37665,1	2.939,80	734,95		OK
CP4	70%	37451,5	2.900,89	725,22		OK
CP5	60%	37045,3	2.848,96	712,24		OK
CP6	50%	36381,7	2.779,31	694,83		OK
CP7	40%	35395,9	2.687,32	671,83		OK
CP8	30%	34022,8	2.568,42	642,11		OK
CP9	20%	32197,7	2.418,07	604,52		OK
CP10	10%	29855,7	2.231,73	557,93		NÃO OK

Amostra 4: O dano localiza-se no ponto médio de flexão onde o momento fletor é máximo, porém nas extremidades do banzo superior.

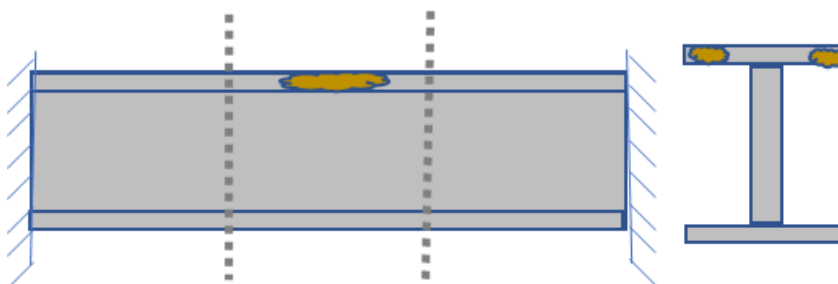


Figura 23 – Amostra4 (Localização do dano no centro do elemento no banzo superior)

A Tabela 4 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional ao dano na peça para flexão pura.

Tabela 4 - Cálculo do momento resistente por % de perda de área na Amostra4

	%area banzo	I _{Deff} (cm ⁴)	W _{eff} (cm ³)	Amostra4		
				M _{rd} (kN.m)	M _{ed} (kN.m)	M _{rd} >M _{ed}
CP1	100%	39838,2	3.161,77	790,44	583,10	OK
CP2	90%	36865,0	2.838,03	709,51		OK
CP3	80%	33891,8	2.527,89	631,97		OK
CP4	70%	30918,6	2.231,49	557,87		NÃO OK
CP5	60%	27945,4	1.948,98	487,24		NÃO OK
CP6	50%	24972,1	1.680,49	420,12		NÃO OK
CP7	40%	21998,9	1.426,19	356,55		NÃO OK
CP8	30%	19025,7	1.186,20	296,55		NÃO OK
CP9	20%	16052,5	960,70	240,18		NÃO OK
CP10	10%	13079,2	749,83	187,46		NÃO OK

Amostra 5: O dano localiza-se no ponto médio de flexão onde o momento fletor é máximo, porém nas extremidades do banzo inferior.

A figura a seguir mostra o dano instalado simetricamente no elemento que representa na realidade o desenho esquemático.



Figura 24 - Corrosão em mais de 50% do banzo inferior (Fonte: empresa analisada)

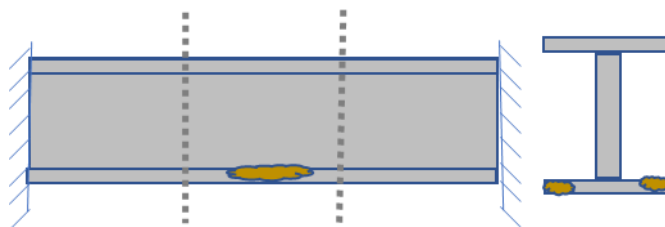


Figura 25 - Amostra5 (Localização do dano no centro do elemento inferior)

A Tabela 5 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional ao dano na peça para flexão pura.

Tabela 5 - Cálculo do momento resistente por % de perda de área na Amostra5

	%area banzo	I _{Deff} (cm ⁴)	W _{eff} (cm ³)	Amostra5		
				M _{rd} (kN.m)	Med (kN.m)	M _{rd} >Med
CP1	100%	39838,2	3.161,77	790,44	583,10	OK
CP2	90%	36865,0	3.019,16	754,79		OK
CP3	80%	33891,8	2.873,93	718,48		OK
CP4	70%	30918,6	2.725,44	681,36		OK
CP5	60%	27945,4	2.572,87	643,22		OK
CP6	50%	24972,1	2.415,10	603,77		OK
CP7	40%	21998,9	2.250,53	562,63		NÃO OK
CP8	30%	19025,7	2.076,84	519,21		NÃO OK
CP9	20%	16052,5	1.890,55	472,64		NÃO OK
CP10	10%	13079,2	1.686,09	421,52		NÃO OK

Para a amostra 6 foram considerados os mesmos valores de cálculo nas diferentes localizações do dano devido a ocorrência dos efeitos serem iguais.

2.º Critério: Resistência da secção transversal quanto ao esforço transversal.

O esforço transversal é igual em todas as localizações do dano no elemento, conforme equação abaixo:

$$V_{rd} = \frac{A \cdot f_y}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Para verificação da segurança estrutural a equação abaixo deverá ser satisfeita:

$$V_{ed} \leq V_{rd} \quad (6)$$

As tabelas a seguir mostram os resultados simples e da combinação de flexão com esforço transversal.

Amostra1: A Tabela 6 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional ao dano na peça para esforço transversal e sua combinação com flexão para a amostra 1.

Tabela 6 - Cálculo das resistências da amostra 1

Amostra1		Flexão			Esforço transversal			flexão com esforço transversal		
CP	% área sem dano	Resistência	Segurança	Mrd>Med	Resistência	Segurança	Vrd>Ved	Resistência	Segurança	Mrd>Med
CP1	100%	1,00	1,36	OK	1,00	2,21	OK	1,00	1,34	OK
CP2	90%	0,97	1,32	OK	0,90	1,99	OK	0,98	1,32	OK
CP3	80%	0,95	1,29	OK	0,80	1,77	OK	0,94	1,27	OK
CP4	70%	0,92	1,25	OK	0,70	1,55	OK	0,85	1,15	OK
CP5	60%	0,90	1,22	OK	0,60	1,33	OK	0,68	0,91	NÃO OK
CP6	50%	0,87	1,19	OK	0,50	1,11	OK	0,31	0,41	NÃO OK
CP7	40%	0,85	1,15	OK	0,40	0,89	NÃO OK	-	-	-
CP8	30%	0,82	1,12	OK	0,30	0,66	NÃO OK	-	-	-
CP9	20%	0,80	1,08	OK	0,20	0,44	NÃO OK	-	-	-
CP10	10%	0,77	1,05	OK	0,10	0,22	NÃO OK	-	-	-

Amostra2: A Tabela 7 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional ao dano na peça para esforço transversal e sua combinação com flexão para a amostra 2.

Tabela 7 – Cálculo das resistências da amostra 2

Amostra2		Flexão			Esforço transversal			Flexão com esforço transversal		
CP	% área sem dano	Resistência	Segurança	Mrd>Med	Resistência	Segurança	Vrd>Ved	Resistência	Segurança	Mrd>Med
CP1	100%	1,00	1,29	OK	1,00	2,21	OK	1,00	1,27	OK
CP2	90%	0,99	1,28	OK	0,90	1,99	OK	1,00	1,28	OK
CP3	80%	0,98	1,26	OK	0,80	1,77	OK	0,97	1,24	OK
CP4	70%	0,96	1,24	OK	0,70	1,55	OK	0,89	1,14	OK
CP5	60%	0,94	1,21	OK	0,60	1,33	OK	0,71	0,90	NÃO OK
CP6	50%	0,91	1,17	OK	0,50	1,11	OK	0,32	0,41	NÃO OK
CP7	40%	0,87	1,11	OK	0,40	0,89	NÃO OK	-	-	-
CP8	30%	0,81	1,05	OK	0,30	0,66	NÃO OK	-	-	-
CP9	20%	0,75	0,96	NÃO OK	0,20	0,44	NÃO OK	-	-	-
CP10	10%	0,68	0,87	NÃO OK	0,10	0,22	NÃO OK	-	-	-

Amostra3: A Tabela 8 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional ao dano na peça para esforço transversal e sua combinação com flexão para a amostra 3.

Tabela 8 – Cálculos das resistências da amostra 3

Amostra3		Flexão			Esforço transverso			Flexão com esforço transverso		
CP	% área alma sem dano	Resistência	Segurança	Mrd>Med	Resistência	Segurança	Vrd>Ved	Resistência	Segurança	Mrd>Med
CP1	100%	1,00	1,29	OK	1,00	2,21	OK	1,00	1,27	OK
CP2	90%	0,99	1,27	OK	0,90	1,99	OK	1,00	1,27	OK
CP3	80%	0,98	1,26	OK	0,80	1,77	OK	0,97	1,24	OK
CP4	70%	0,97	1,24	OK	0,70	1,55	OK	0,89	1,14	OK
CP5	60%	0,95	1,22	OK	0,60	1,33	OK	0,71	0,91	NÃO OK
CP6	50%	0,93	1,19	OK	0,50	1,11	OK	0,33	0,42	NÃO OK
CP7	40%	0,90	1,15	OK	0,40	0,89	NÃO OK	-	-	-
CP8	30%	0,86	1,10	OK	0,30	0,66	NÃO OK	-	-	-
CP9	20%	0,81	1,04	OK	0,20	0,44	NÃO OK	-	-	-
CP10	10%	0,74	0,96	NÃO OK	0,10	0,22	NÃO OK	-	-	-

Amostra4: A Tabela 9 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional ao dano na peça para esforço transverso e sua combinação com flexão para a amostra 4.

Tabela 9 – Cálculo das resistências da amostra 4

Amostra4		Flexão			Esforço transverso			Flexão com esforço transverso		
CP	% área banzo sem dano	Resistência	Segurança	Mrd>Med	Resistência	Segurança	Vrd>Ved	Resistência	Segurança	Mrd>Med
CP1	100%	1,00	1,36	OK	1,00	2,21	OK	1,00	1,34	OK
CP2	90%	0,90	1,22	OK	0,90	1,99	OK	0,91	1,22	OK
CP3	80%	0,80	1,08	OK	0,80	1,77	OK	0,79	1,07	OK
CP4	70%	0,71	0,96	NÃO OK	0,70	1,55	OK	0,65	0,88	NÃO OK
CP5	60%	0,62	0,84	NÃO OK	0,60	1,33	OK	0,46	0,62	NÃO OK
CP6	50%	0,53	0,72	NÃO OK	0,50	1,11	OK	0,19	0,25	NÃO OK
CP7	40%	0,45	0,61	NÃO OK	0,40	0,89	NÃO OK	-	-	-
CP8	30%	0,38	0,51	NÃO OK	0,30	0,66	NÃO OK	-	-	-
CP9	20%	0,30	0,41	NÃO OK	0,20	0,44	NÃO OK	-	-	-
CP10	10%	0,24	0,32	NÃO OK	0,10	0,22	NÃO OK	-	-	-

Amostra5: A Tabela 10 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional ao dano na peça para esforço transverso e sua combinação com flexão para a amostra 5.

Tabela 10 – Cálculo das resistências da amostra 5

Amostra5		Flexão			Esforço transverso			Flexão com esforço transverso		
CP	% área banzo sem dano	Resistência	Segurança	Mrd>Med	Resistência	Segurança	Vrd>Ved	Resistência	Segurança	Mrd>Med
CP1	100%	1,00	1,36	OK	1,00	2,21	OK	1,00	1,34	OK
CP2	90%	0,95	1,29	OK	0,90	1,99	OK	0,96	1,29	OK
CP3	80%	0,91	1,23	OK	0,80	1,77	OK	0,90	1,21	OK
CP4	70%	0,86	1,17	OK	0,70	1,55	OK	0,80	1,07	OK
CP5	60%	0,81	1,10	OK	0,60	1,33	OK	0,61	0,82	NÃO OK
CP6	50%	0,76	1,04	OK	0,50	1,11	OK	0,27	0,36	NÃO OK
CP7	40%	0,71	0,96	NÃO OK	0,40	0,89	NÃO OK	-	-	-
CP8	30%	0,66	0,89	NÃO OK	0,30	0,66	NÃO OK	-	-	-
CP9	20%	0,60	0,81	NÃO OK	0,20	0,44	NÃO OK	-	-	-
CP10	10%	0,53	0,72	NÃO OK	0,10	0,22	NÃO OK	-	-	-

Amostra6: A amostra 6 foi utilizada para representar o esforço cortante, porém foi esquematizado na extremidade da viga, onde a cortante é máxima como também no centro da viga devido a carga pontual, bastando calcular os esforços resistentes devido a redução de área no elemento.

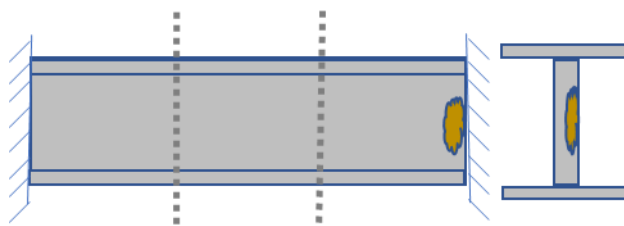


Figura 26 - Amostra6 (Localização do dano na extremidade da viga, apoios)

Tabela 11 - Cálculo do esforço cortante resistente por % de perda de área na Amostra6

Amostra6					
CP	% Av sem dano	Vrd	Vrd>Ved	Resistência	Segurança
CP1	100%	750,56	OK	1,00	2,21
CP2	90%	675,50	OK	0,90	1,99
CP3	80%	600,44	OK	0,80	1,77
CP4	70%	525,39	OK	0,70	1,55
CP5	60%	450,33	OK	0,60	1,33
CP6	50%	375,28	OK	0,50	1,11
CP7	40%	300,22	NÃO OK	0,40	0,89
CP8	30%	225,17	NÃO OK	0,30	0,66
CP9	20%	150,11	NÃO OK	0,20	0,44
CP10	10%	75,06	NÃO OK	0,10	0,22

3.4.2 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA – ELEMENTO PILAR

Para o pilar foi considerado por simplificação que está sujeito apenas a esforço axial e feita a verificação da resistência seccional e encurvadura.

1.º Critério: Resistência quanto a compressão

Considerando as premissas que os dois pilares que suportam a viga em questão estão encastrados na base e possuem o mesmo perfil e características mecânicas da viga, não sendo considerada carga lateral como vento ou fluxo de produto ou qualquer efeito que provoque deslocamento horizontal, nem carga cíclica na estrutura, o valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão uniforme $N_{c,rd}$ deverá ser determinado do seguinte modo:

$$N_{c,rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7)$$

O valor de cálculo do esforço de compressão atuante N_{ed} em cada secção transversal deve satisfazer a condição:

$$N_{ed} \leq N_{c,rd} \quad (8)$$

A figura abaixo mostra o dano localizado na base do elemento, em contato com o solo, ou em ligações soldadas ou aparafusadas, onde normalmente ocorre a corrosão num elemento sujeito a compressão.

Amostra7: O dano localiza-se no pilar estando sujeito a compressão uniforme, bastando calcular os esforços resistentes devido a redução de área no elemento.



Figura 27- Base do pilar com corrosão (Fonte: empresa analisada)

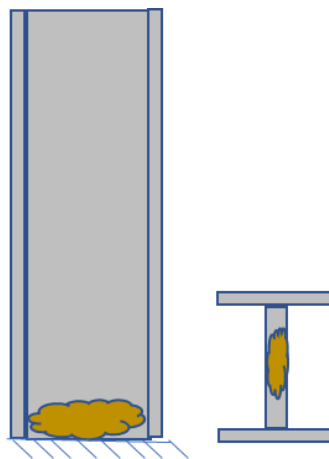


Figura 28 - Amostra7 (Localização do dano no pilar)

A Tabela 12 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional ao dano na peça para compressão simples na amostra 7.

Tabela 12 - Cálculo da resistência a compressão por % de perda de área no pilar na amostra 7

Amostra7					
	% área sem dano	Nrd (kN)	Nrd>Ned	Resistência	Segurança
CP1	100%	3900,00	OK	1,00	11,50
CP2	90%	3510,00	OK	0,90	10,35
CP3	80%	3120,00	OK	0,80	9,20
CP4	70%	2730,00	OK	0,70	8,05
CP5	60%	2340,00	OK	0,60	6,90
CP6	50%	1950,00	OK	0,50	5,75
CP7	40%	1560,00	OK	0,40	4,60
CP8	30%	1170,00	OK	0,30	3,45
CP9	20%	780,00	OK	0,20	2,30
CP10	10%	390,00	OK	0,10	1,15

2.º Critério: Resistência quanto a encurvadura à compressão

Na verificação da resistência à encurvadura do pilar assumiu-se um comprimento de encurvadura igual ao comprimento real do elemento estrutural:

$$L_{cr} = L \quad (9)$$

A carga crítica de encurvadura deve ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{L_{cr}^2} \quad (10)$$

A equação utilizada para cálculo da encurvadura é:

$$N_{b,rd} = \frac{X \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (11)$$

A verificação de segurança para encurvadura deverá obedecer a seguinte equação:

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,rd}} \leq 1 \quad (12)$$

A Tabela 13 apresenta os valores resistentes para diversas combinações de extensões de corrosão proporcional ao dano na peça para encurvadura à compressão na amostra 7.

Tabela 13 - Cálculo da resistência a encurvadura por % de perda de área no pilar na amostra 7

Amostra7					
	% área sem dano	Nb,rd	Ned<Nb,rd	Resistência	Segurança
CP1	100%	3072,47	OK	1,00	9,06
CP2	90%	2765,22	OK	0,90	8,16
CP3	80%	2457,97	OK	0,80	7,25
CP4	70%	2150,73	OK	0,70	6,34
CP5	60%	1843,48	OK	0,60	5,44
CP6	50%	1536,23	OK	0,50	4,53
CP7	40%	1228,99	OK	0,40	3,63
CP8	30%	921,74	OK	0,30	2,72
CP9	20%	614,49	OK	0,20	1,81
CP10	10%	307,25	NÃO OK	0,10	0,91

4

ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS AMOSTRAS

O exemplo de estrutura apresentado foi retirado de uma indústria petroquímica com ambiente de exposição atmosférica de nível C4 e possui critérios de avaliação que determinem o limite aceitável de perda de material para a estrutura em questão.

Por meio das inspeções visuais são feitas as avaliações do estado da corrosão em que é avaliado a extensão e a severidade da mesma na estrutura e determinada a perda de material.

Considerando que foram usados os fatores de segurança do material de 1,15 e de cargas em estado limite último 1,35, temos um coeficiente de segurança aplicado de 1,5 e foi estabelecido que qualquer resultado abaixo de 1,3 seja considerado grau de dano inadmissível para a indústria, sendo recomendada a manutenção imediata, com isso foram avaliadas as sete amostras utilizando os resultados dos cálculos para comparar com os critérios definidos pela indústria.

O quadro abaixo apresenta os limites aceitáveis por essa indústria para os níveis de corrosão conforme os locais de ocorrência.

A classificação de maior grau de risco representado no quadro requer uma atuação imediata, não sendo aceitável o nível de dano acima de 50% localizados a meio vão de vigas em qualquer elemento e posição no mesmo e também nas ligações de extremidade.

GRAU DE RISCO		GRAU DO DANO						Início de Corrosão; falta de acessórios	Perda de pintura
		Perda de material, parafusos ou solda (P>50%); Corrosão Severa generalizada.	Perda de material, parafusos ou solda (50%>P>=40%); Corrosão Severa Localizada.	Perda de material, parafusos ou solda (40%>P>=30%); Corrosão Moderada generalizada;	Perda de material, parafusos ou solda (30%>P>=20%); Corrosão Moderada Localizada.	Perda de material, parafusos ou solda (20%>P>=10%); Corrosão Leve generalizada.	Perda de material, parafusos ou solda (10%>P); Corrosão Leve Localizada.		
ELEMENTO E POSIÇÃO DANO	Vigas meio vão e ligação de extremidade	100 1 dia	80 7 dias	60 2 meses	30 4 meses	10 6 meses			
	Vigas terço médio Pilar meio vão	80 7 dias	64 7 dias	48 2 meses	24 4 meses	8 9 meses			
	Pilares no terço médio	60 2 meses	48 2 meses	36 4 meses	18 6 meses	6 1 ano			
	Pilares na base	30 4 meses	24 4 meses	18 6 meses	9 9 meses	3 2 anos			

Figura 29 - Classificação probabilidade x severidade na indústria avaliada

Para a estrutura avaliada foi feito um comparativo entre as resistência e segurança de projeto perdidas por área de dano ocorrido conforme tabelas apresentadas a seguir. Em seguida foi realizado um comparativo com a forma atual da manutenção na indústria estudada definir o grau de dano para tomada de decisão quanto ao tipo de serviço realizar e sua prioridade baseado na tabela acima.

4.1.1 LIMITES DE RESISTÊNCIA E SEGURANÇA QUANTO A FLEXÃO

Na amostra 1 onde o dano ocorre na alma da viga a meio vão na parte central do elemento, pode-se perceber que para dano superior a 50% de atuação sobre a área do elemento a resistência seccional é de 0,87, porém apresenta uma segurança instalada relativa a resistência considerada de 1,19, estando com o coeficiente abaixo do fator considerado como crítico pela indústria, porém dentro do limite de segurança definido por norma e na zona de manutenção imediata.

Tabela 14 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 1

CP	%area alma	I _{eff}	W _y	Mrd	Mrd>Med	Resistência	Segurança
CP1	100%	39838,240	3.161,77	790,44	OK	1,00	1,36
CP2	90%	38839,355	3.082,49	770,62	OK	0,97	1,32
CP3	80%	37840,469	3.003,21	750,80	OK	0,95	1,29
CP4	70%	36841,584	2.923,94	730,98	OK	0,92	1,25
CP5	60%	35842,699	2.844,66	711,16	OK	0,90	1,22
CP6	50%	34843,813	2.765,38	691,35	OK	0,87	1,19
CP7	40%	33844,928	2.686,11	671,53	OK	0,85	1,15
CP8	30%	32846,043	2.606,83	651,71	OK	0,82	1,12
CP9	20%	31847,157	2.527,55	631,89	OK	0,80	1,08
CP10	10%	30848,272	2.448,28	612,07	OK	0,77	1,05

As amostras 1, 2, 3, 4, 5 e 6 foram classificadas pela empresa em uma única categoria, possuindo os mesmos resultados e portanto enquadradas com o maior grau de risco, porém verifica-se pelos cálculos apresentados que a localização do dano no elemento a meio vão com perdas maiores que 50% possuem diferentes resultados, influenciando no coeficiente de segurança e alterando o grau de risco, sendo necessário criar outras categorias de avaliação para se obter uma maior fiabilidade na definição de qual serviço executar.

GRAU DE RISCO	
	Perda de material, parafusos ou solda ($P > 50\%$); Corrosão Severa generalizada.
Vigas meio vão e ligação de extremidade	100 1 dia

Figura 30 - Grau de risco definido pela indústria para dano nas amostras 1, 2, 3, 4, 5 e 6

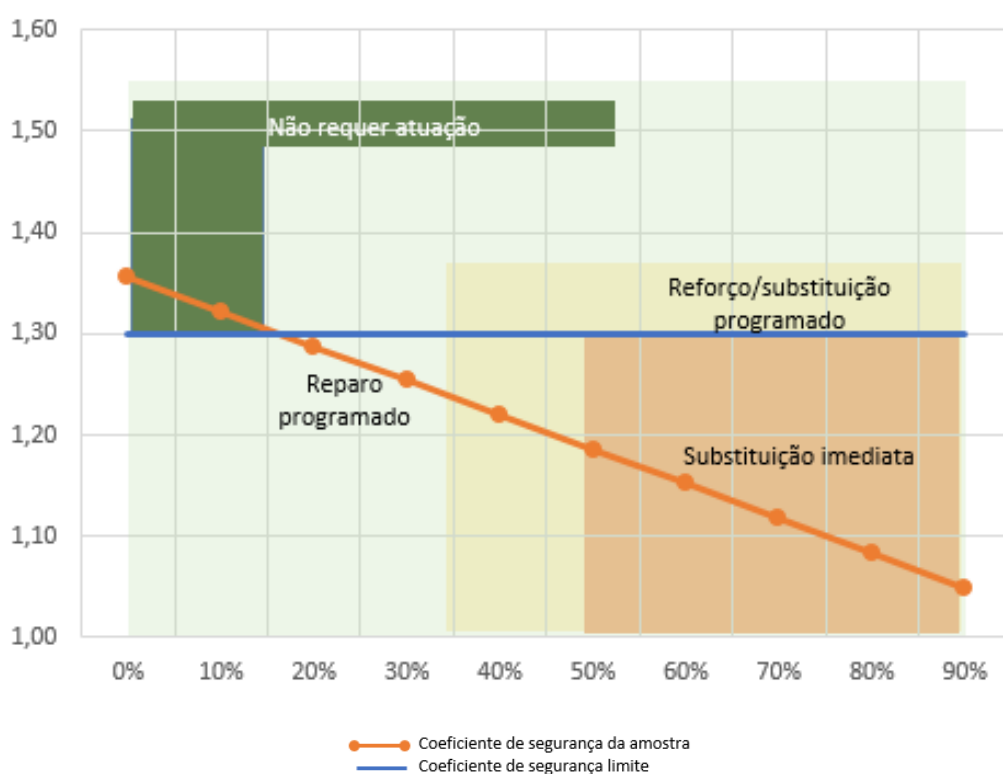


Figura 31 - Grau de risco avaliado na amostra 1

Na amostra 2 onde o dano ocorre na alma da viga a meio vão na parte superior do elemento, pode-se perceber que para dano superior a 50% de atuação sobre a área do elemento a resistência seccional é de 0,91, porém apresenta uma segurança instalada relativa a resistência considerada de 1,17, estando portanto ainda acima do nível considerado como crítico por norma, mas estando dentro da faixa de manutenção imediata.

Tabela 15 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 2

Amostra2		Flexão		
CP	% área alma sem dano	Resistência	Segurança	Mrd>Med
CP1	100%	1,00	1,29	OK
CP2	90%	0,99	1,28	OK
CP3	80%	0,98	1,26	OK
CP4	70%	0,96	1,24	OK
CP5	60%	0,94	1,21	OK
CP6	50%	0,91	1,17	OK
CP7	40%	0,87	1,11	OK
CP8	30%	0,81	1,05	OK
CP9	20%	0,75	0,96	NÃO OK
CP10	10%	0,68	0,87	NÃO OK

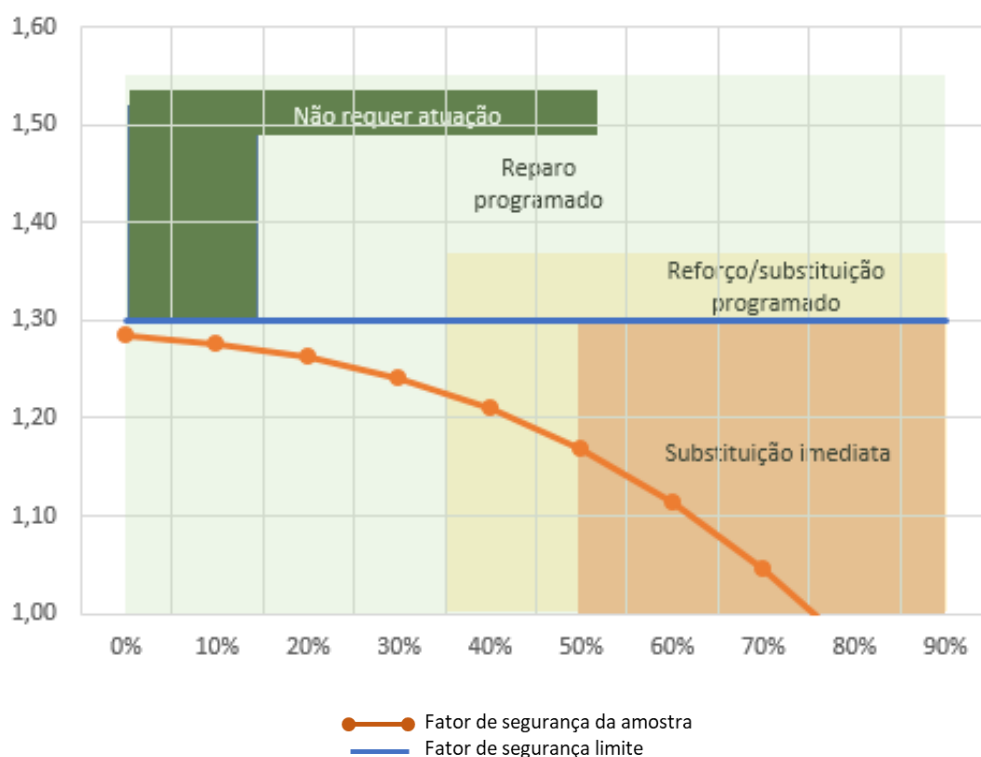


Figura 32 - Grau de risco avaliado na amostra 2

Na amostra 3 onde o dano ocorre na alma da viga a meio vão na parte inferior do elemento, pode-se perceber que para dano superior a 50% de atuação sobre a área do elemento a resistência seccional é de 0,93, porém apresenta uma segurança instalada relativa a resistência considerada de 1,19, estando com

o coeficiente abaixo do fator considerado como crítico pela indústria, porém dentro do limite de segurança definido por norma e na zona de manutenção imediata.

Tabela 16 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 3

Amostra3		Flexão		
CP	% área alma sem dano	Resistência	Segurança	Mrd>Med
CP1	100%	1,00	1,29	OK
CP2	90%	0,99	1,27	OK
CP3	80%	0,98	1,26	OK
CP4	70%	0,97	1,24	OK
CP5	60%	0,95	1,22	OK
CP6	50%	0,93	1,19	OK
CP7	40%	0,90	1,15	OK
CP8	30%	0,86	1,10	OK
CP9	20%	0,81	1,04	OK
CP10	10%	0,74	0,96	NÃO OK

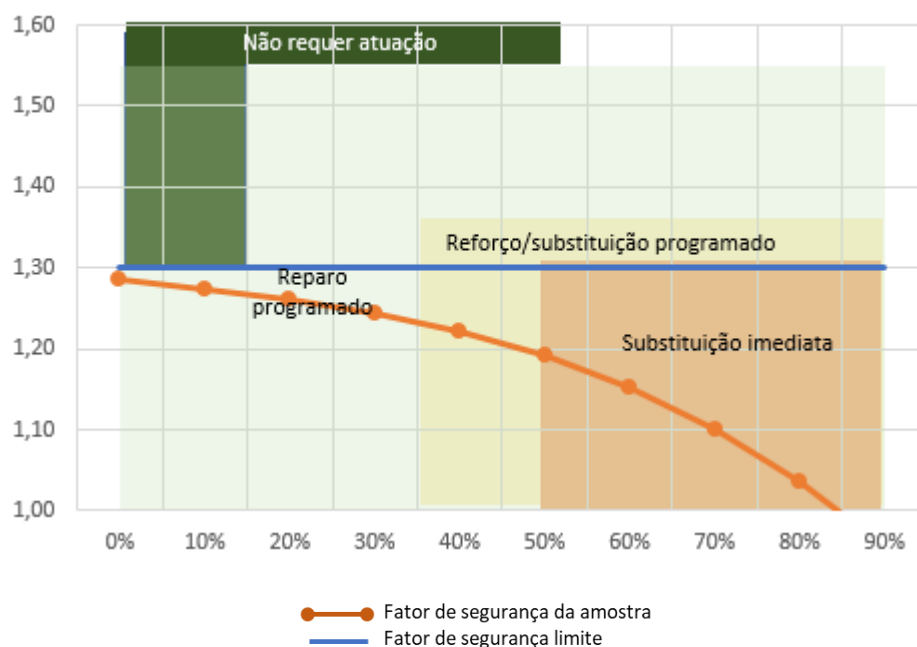


Figura 33 - Grau de risco avaliado na amostra 3

Na amostra 4 onde o dano ocorre no banzo superior ainda no meio vão da viga, pode-se perceber que para dano superior a 50% de atuação sobre a área do elemento a resistência seccional é de 0,53 e apresenta uma segurança instalada relativa a resistência considerada de 0,72 estando portanto abaixo do limite aceitável por norma e considerado crítico no critério de avaliação adotado, assim como a amostra 5 onde o dano ocorre no banzo inferior ainda no meio vão da viga, a resistência seccional é de 0,76 e

apresenta uma segurança instalada relativa a resistência considerada de 1,04, próximo ao limite estabelecido em norma e estando também abaixo do fator considerado como crítico.

A localização do dano nessas amostras poderiam fazer parte de uma nova classificação, pois pelos critérios definidos, essas amostras apresentam risco imediato para atuação superior aos definidos como sendo críticos, pois o nível de segurança é alcançado mais cedo com menor grau de corrosão.

Tabela 17 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 4

Amostra4		Flexão		
CP	% área banzo sem dano	Resistência	Segurança	Mrd>Med
CP1	100%	1,00	1,36	OK
CP2	90%	0,90	1,22	OK
CP3	80%	0,80	1,08	OK
CP4	70%	0,71	0,96	NÃO OK
CP5	60%	0,62	0,84	NÃO OK
CP6	50%	0,53	0,72	NÃO OK
CP7	40%	0,45	0,61	NÃO OK
CP8	30%	0,38	0,51	NÃO OK
CP9	20%	0,30	0,41	NÃO OK
CP10	10%	0,24	0,32	NÃO OK

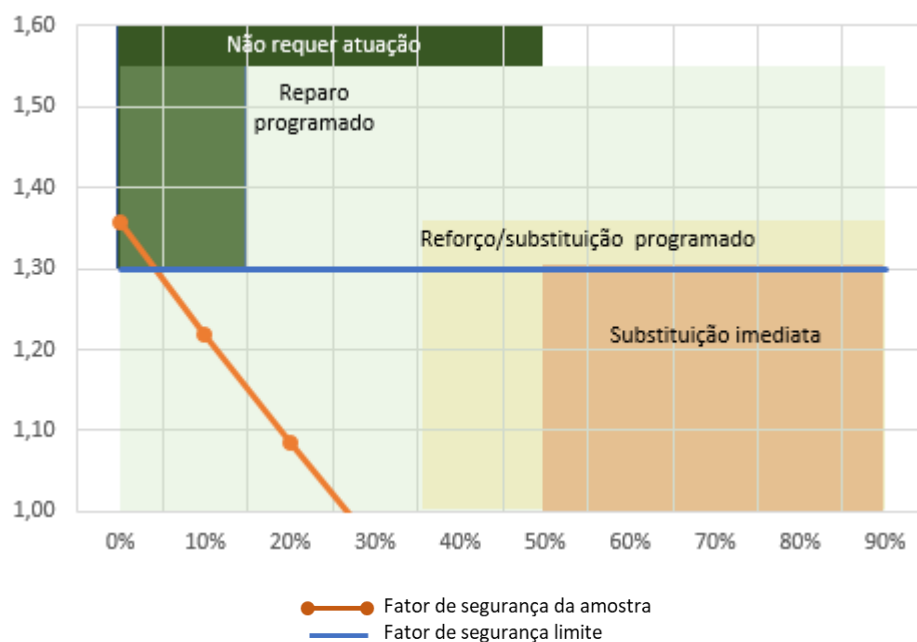


Figura 34 - Grau de risco avaliado na amostra 4

Tabela 18 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 5

Amostra5		Flexão		
CP	% área banzo sem dano	Resistência	Segurança	Mrd>Med
CP1	100%	1,00	1,36	OK
CP2	90%	0,95	1,29	OK
CP3	80%	0,91	1,23	OK
CP4	70%	0,86	1,17	OK
CP5	60%	0,81	1,10	OK
CP6	50%	0,76	1,04	OK
CP7	40%	0,71	0,96	NÃO OK
CP8	30%	0,66	0,89	NÃO OK
CP9	20%	0,60	0,81	NÃO OK
CP10	10%	0,53	0,72	NÃO OK

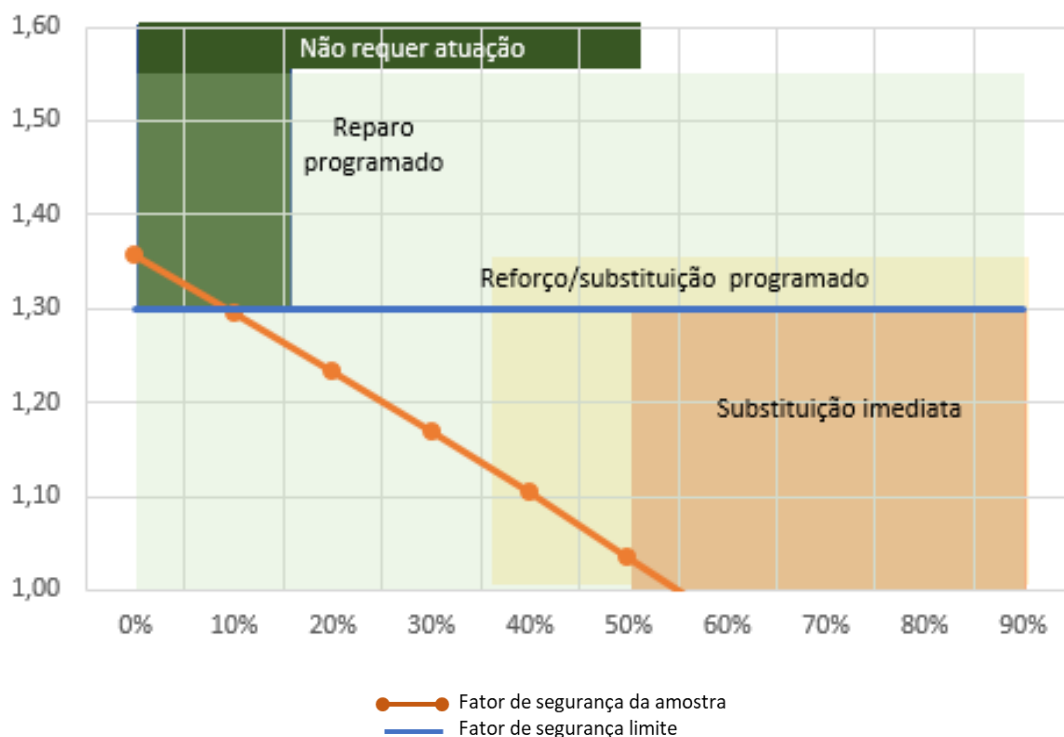


Figura 35 - Grau de risco avaliado na amostra 5

Através do gráfico unificado de todas as amostras é possível visualizar os resultados para flexão simples e seus diferentes níveis de segurança em cada elemento.

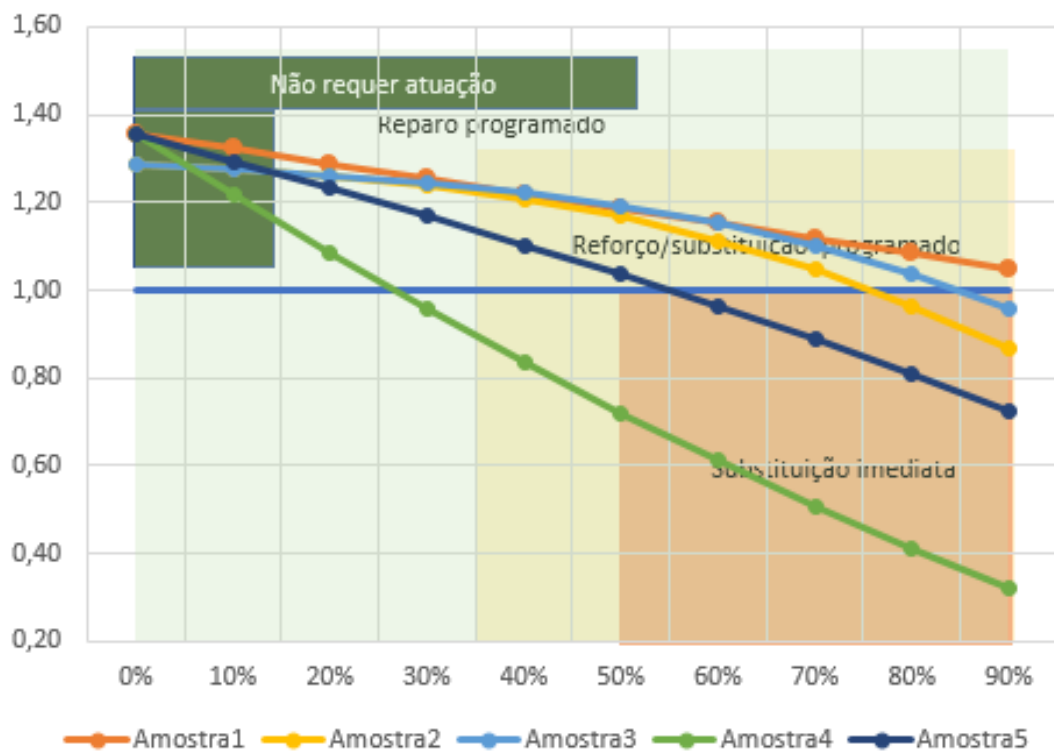


Figura 36 – Comparativo da verificação de segurança por amostra

4.1.2 LIMITES DE RESISTÊNCIA E SEGURANÇA QUANTO AO ESFORÇO TRANSVERSO

Na amostra 6 onde o dano ocorre nas extremidades dos elementos, ou seja, nas ligações de extremidade da viga, utilizada para verificação quanto ao esforço transversal, pode-se observar que a peça possui uma resistência seccional a partir dos 50% de área corroída de 0,5 e coeficiente de segurança instalada relativa a resistência considerada de 1,11 estando também abaixo do fator considerado como crítico.

A verificação de segurança quanto ao esforço transversal foi aplicado à amostra 6 porém para esse modelo de estrutura é o mesmo resultado para as amostras a meio vão.

Tabela 19 - Perda de resistência e segurança por % de área corroída na amostra 6

Amostra6					
CP	% Av sem dano	Vrd	Vrd>Ved	Resistência	Segurança
CP1	100%	750,56	OK	1,00	2,21
CP2	90%	675,50	OK	0,90	1,99
CP3	80%	600,44	OK	0,80	1,77
CP4	70%	525,39	OK	0,70	1,55
CP5	60%	450,33	OK	0,60	1,33
CP6	50%	375,28	OK	0,50	1,11
CP7	40%	300,22	NÃO OK	0,40	0,89
CP8	30%	225,17	NÃO OK	0,30	0,66
CP9	20%	150,11	NÃO OK	0,20	0,44
CP10	10%	75,06	NÃO OK	0,10	0,22

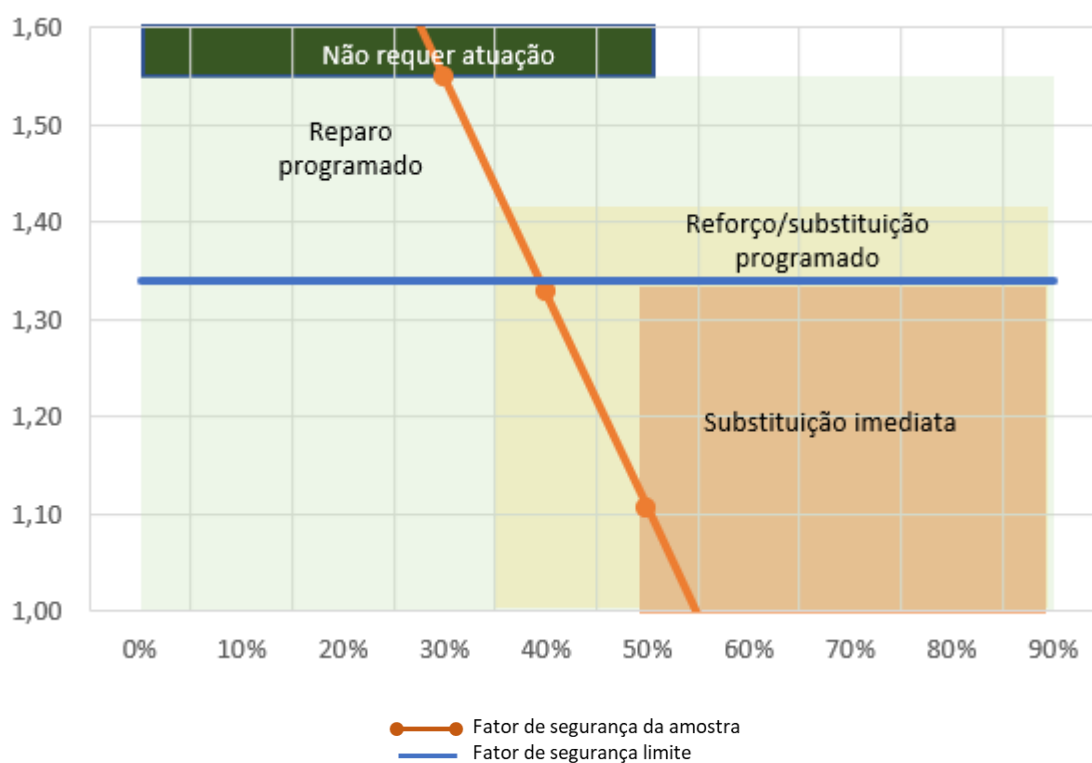


Figura 37 - Grau de risco avaliado na amostra 6

Quando levamos em consideração a flexão com esforço transversal o que se obtém são resultados que requerem atuação, para os danos nas suas localizações, mais cedo devido a ultrapassarem o coeficiente de segurança estabelecido em norma, conforme o gráfico apresenta.

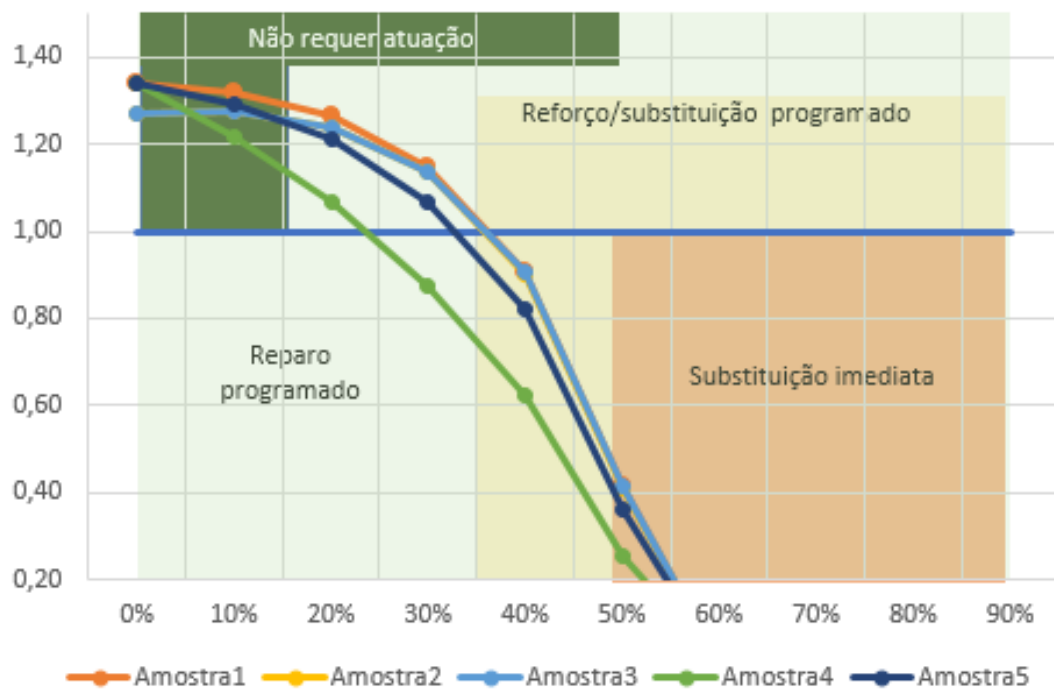


Figura 38 – Comparativo da verificação da segurança para flexão com esforço transversal

4.1.3 LIMITES DE RESISTÊNCIA E SEGURANÇA QUANTO A COMPRESSÃO

Na amostra 7 o dano ocorre na base do pilar, sujeito ao esforço de compressão uniforme, e por se tratar de um elemento totalmente comprimido foi verificado também em relação à encurvadura.

A resistência seccional, para compressão apenas, a partir dos 50% de área corroída é de 0,5 e coeficiente de segurança instalada relativa a resistência considerada é de 5,75 e para encurvadura apresenta 0,5 de resistencia seccional e coeficiente de segurança instalada relativa a resistência considerada de 5,11.

Tabela 20 - Resistência e segurança quanto à compressão por % de área corroída na amostra 7

Amostra7					
	% área sem dano	Nrd (kN)	Nrd>Ned	Resistência	Segurança
CP1	100%	3900,00	OK	1,00	11,50
CP2	90%	3510,00	OK	0,90	10,35
CP3	80%	3120,00	OK	0,80	9,20
CP4	70%	2730,00	OK	0,70	8,05
CP5	60%	2340,00	OK	0,60	6,90
CP6	50%	1950,00	OK	0,50	5,75
CP7	40%	1560,00	OK	0,40	4,60
CP8	30%	1170,00	OK	0,30	3,45
CP9	20%	780,00	OK	0,20	2,30
CP10	10%	390,00	OK	0,10	1,15

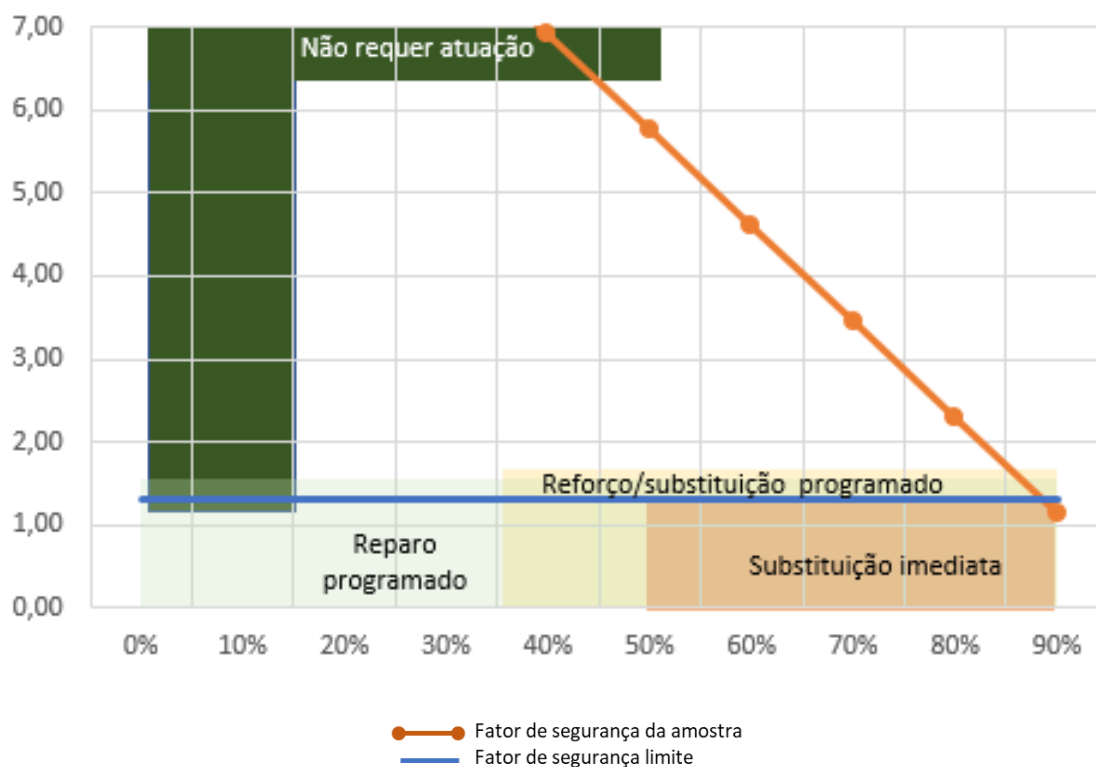


Figura 39 - Grau de risco avaliado na amostra 7 para compressão apenas

Tabela 21 - Resistência e segurança quanto à encurvadura por % de área corroída na amostra 7

Amostra7					
	% área sem dano	Nb,rd	Ned<Nb,rd	Resistência	Segurança
CP1	100%	3072,47	OK	1,00	9,06
CP2	90%	2765,22	OK	0,90	8,16
CP3	80%	2457,97	OK	0,80	7,25
CP4	70%	2150,73	OK	0,70	6,34
CP5	60%	1843,48	OK	0,60	5,44
CP6	50%	1536,23	OK	0,50	4,53
CP7	40%	1228,99	OK	0,40	3,63
CP8	30%	921,74	OK	0,30	2,72
CP9	20%	614,49	OK	0,20	1,81
CP10	10%	307,25	NÃO OK	0,10	0,91

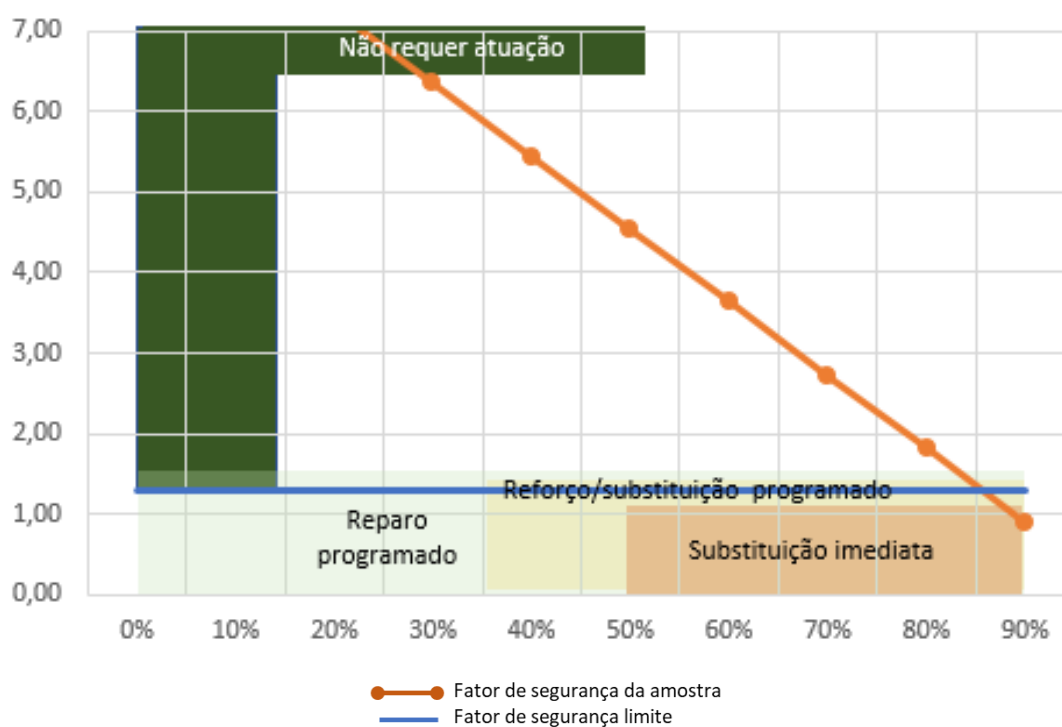


Figura 40 - Grau de risco avaliado na amostra 7 para encurvadura

4.2 RELATÓRIO DA AVALIAÇÃO DE INSPEÇÃO REAL

Os relatórios de inspeção da indústria utilizam a Figura 29 para indicar os prazos para execução de reparo, reforço, substituição ou novas inspeções, porém foi verificado que existe uma oportunidade de melhoria na identificação dos elementos e posição dos danos nos mesmos bem como uma oportunidade para desenvolvimento de trabalho do estudo da velocidade de corrosão nas estruturas para definição dos prazos ligados aos graus de dano para definição de vida útil, sendo os prazos contidos no quadro, e que estão sendo usados atualmente, definidos aleatoriamente.

4.3 OUTRAS UTILIZAÇÕES DOS RESULTADOS NA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS

O Nível 1 da metodologia FFS que foi adaptado para as estruturas metálicas é uma abordagem com cálculos simples como os que foram realizados, que podem ser representados através de planilhas e gráficos e basicamente será utilizada a média de área medida localmente onde há o dano no elemento sendo possível construir uma ferramenta que permitirá auxiliar o trabalho dos inspetores na definição do que deverá ser feito após a inspeção utilizando a partir deste ponto os gráficos gerados com os resultados obtidos.

Para isso será necessário criar uma planilha com todas as famílias, elementos e posição dos danos com foco em corrosão e valores de intensidade de danos que permitirá identificar os elementos com maior gravidade e/ou urgência, facilitando a gestão da manutenção corretiva levando em consideração o lado técnico e financeiro. (Trojan 2013) (IBRACON 2018) (CASTRO 1994)

O fluxograma abaixo mostra as etapas a construir para que seja possível utilizar os resultados dos cálculos de resistência e verificação de segurança nas estruturas para extrapolação em outras estruturas na área industrial com diferentes aplicações.

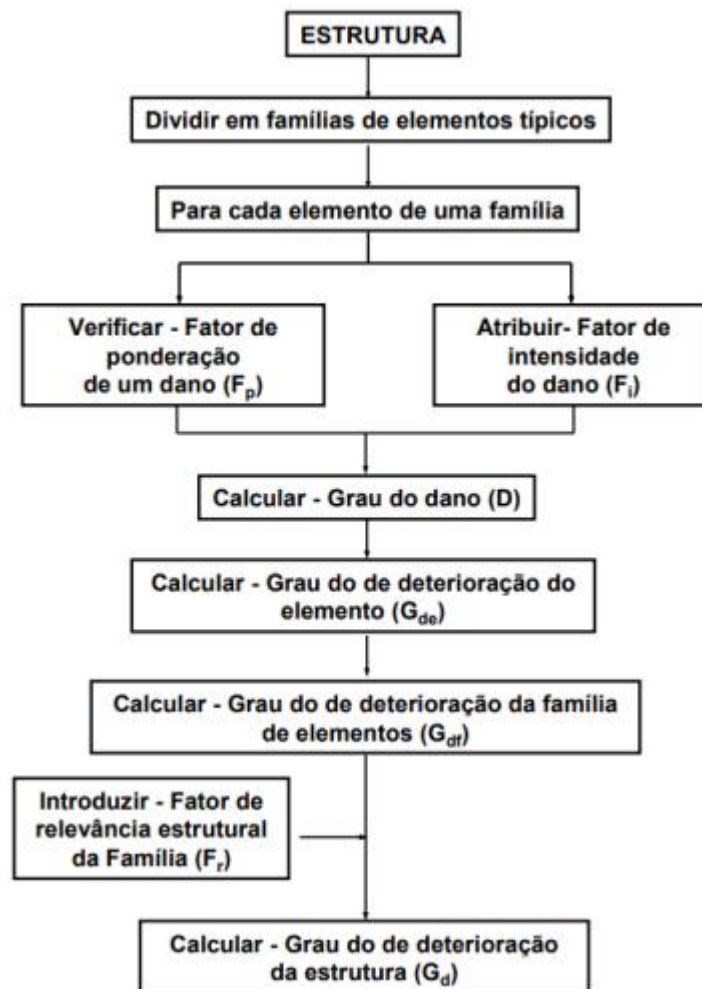


Figura 41 - Fluxograma da metodologia para o cálculo do Grau de Deterioração da Estrutura (GDE)

4.3.1 DIVISÃO EM FAMÍLIA DE ELEMENTOS

Primeiramente será necessário dividir a estrutura em família de elementos para possibilitar posteriormente definir um fator para cada família e elementos, visto que nas amostras os fatores de segurança são diferentes quando se altera o elemento mesmo que mantendo as mesmas posições.

- Vigas (Retas ou inclinadas)
- Pilares
- Travamentos e Contraventamento
- Ligações Soldadas
- Ligações Aparafusadas
- Chapas de piso e degraus
- Guarda Corpo

4.3.2 FATOR DE PONDERAÇÃO

O fator de ponderação é utilizado para dar valores aos danos causados pelas patologias em relação à estética, funcionalidade e estabilidade. Esse fator refere-se basicamente a localização do dano no elemento, dando-se maior ponderação ao elemento mais solicitado.

Tabela 22 - Fator de ponderação do elemento

Familia	Elemento	Fp
Vigas	Alma (inferior)	3
Pilares	Alma (centro)	3
	Alma (superior)	3
	Banzo inferior	3
	Banzo superior	4
	Ligação de extremidade	5

4.3.3 FATOR DE INTENSIDADE

Esse fator classifica o grau das lesões no elemento, então utilizaremos o grau de corrosão encontrado durante a inspeção.

Tabela 23 - Fator de intensidade do dano

Classificação	Fator de Intensidade (Fi)
Perda de pintura	1
Início de corrosão/Falta de acessório	2
Corrosão leve localizada $P < 10\%$	3
Corrosão leve generalizada $20\% > P \geq 10\%$	4
Corrosão moderada localizada $30\% > P \geq 20\%$	5
Corrosão moderada generalizada $40\% > P \geq 30\%$	6
Corrosão severa localizada $50\% > P \geq 40\%$	7
Corrosão severa generalizada $P \geq 50\%$	8

4.3.4 GRAU DE DANO (D)

O grau do dano é obtido através dos fatores de ponderação e intensidade levando em consideração a evolução da corrosão relativa a perda de área de material no elemento analisado. Ele indica a situação atual do elemento e as medidas de intervenção que deverão ser tomadas, a médio e curto prazo, objetivando uma manutenção adequada.

$$D = F_p \cdot F_i \quad (13)$$

4.3.5 GRAU DE DETERIORAÇÃO DE UM ELEMENTO (GDE)

Após obter-se o grau de dano (D) é possível calcular o grau de deterioração através da equação:

$$G_{de} = D_{max} \cdot \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m D_i - D_{max}}{\sum_{i=1}^m D_i} \right] \quad (14)$$

Onde:

Gde: Grau de deterioração de um elemento estrutural;

Dmáx: Maior grau de dano no elemento;

m: Número de danos detectados no elemento; e

D(i): O grau de dano de ordem (i)

Conforme demonstrado na tabela de fatores de ponderação, um elemento pode ter vários danos em localidades diferentes, tendo portando que ser calculado o dano máximo no elemento para possibilitar a obtenção do grau de dano nesse elemento.

Tabela 24 – Nível de deterioração conforme grau de dano

Família	Fator de relevância estrutural (Fr)	Elemento	Fp	Lesão	Fi	Grau de dano (ΣD)	Grau de dano máximo	Grau de deterioração de um elemento (Gde)	Nível de deterioração	Ação
Vigas	1	Alma (inferior)	3	Perda de pintura	1	108	3	5,92	Baixo	Não requer atuação
				Início de corrosão/Falta de acessório	2	108	6	11,67	Baixo	Não requer atuação
				Corrosão leve localizada P<10%	3	108	9	17,25	Médio	Reparo programado
				Corrosão leve generalizada 20%>P>=10%	4	108	12	22,67	Médio	Reparo programado
				Corrosão moderada localizada 30%>P>=20%	5	108	15	27,92	Médio	Reparo programado
				Corrosão moderada generalizada 40%>P>=30%	6	108	18	33,00	Médio	Reparo programado
				Corrosão severa localizada 50%>P>=40%	7	108	21	37,92	Médio-Alto	Reforço/substituição progra
				Corrosão severa generalizada P>=50%	8	108	24	42,67	Alto	Reforço/substituição progra

Após a aplicação da equação 15 é possível classificar o nível de deterioração do elemento e propor as ações necessárias para prolongar a vida útil e segurança da mesma sem olhar para a estrutura como um todo, mantendo o foco apenas no elemento danificado.

Tabela 25 - Classificação do nível de deterioração

Gde	Nível de deterioração	Ações a serem tomadas
<15	Baixo	Não requer atuação
15-35	Médio	Reparo programado
35-40	Médio-Alto	Reforço/substituição programado
40-50	Alto	Reforço/substituição programado
>50	Crítico	Substituição imediata

4.3.6 GRAU DE DETERIORAÇÃO DE UMA FAMÍLIA DE ELEMENTOS (GDF)

Para este fator levamos em consideração que podem existir diversas posições da corrosão nos diferentes elementos e vamos considerar apenas os elementos com grau de deterioração mais significativos, ou seja, necessita de alguma atenção especial. Nesta etapa também é possível definir o nível de deterioração e propor ações para a família de elementos da mesma forma que apenas no elemento.

Nesta etapa é necessário conhecer qual o grau de dano máximo dentro dos elementos da família analisada.

$$G_{df} = G_{dmax} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{\sum_{i=1}^m G_{de(i)} - G_{dmax}}{\sum_{i=1}^m G_{de(i)}}} \right] \quad (15)$$

Onde:

Gdf: Grau de deterioração de uma família de elementos;

Gdemáx: Grau de deterioração máxima do elemento;

Gde(i): Grau de deterioração do elemento de ordem (i)

4.3.7 FATOR DE RELEVÂNCIA ESTRUTURAL

O Fator de relevância estrutural (Fr) considera a importância das famílias que compõe a estrutura quanto ao comportamento e desempenho da mesma.

Como foi visto na verificação de resistência e segurança para famílias diferentes, possuem diferentes níveis de deterioração possíveis de atingir sem afetar os limites estipulados em norma.

Neste trabalho foram definidos os fatores de relevância para viga e pilar, sendo os fatores das demais famílias apresentadas apenas simbólico para serem testados e comprovados em outros estudos.

Tabela 26 - Fator de relevância da família de elementos

Família de Elementos	Fator de relevância (Fr)
Guarda Corpo	1,5
Chapas de piso e degraus	2
Ligações Aparafusadas	2,5
Ligações Soldadas	3
Travamentos e Contraventamento	3,5
Pilares	0,3
Vigas	1

4.3.8 GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA (GD)

O “grau de deterioração da estrutura” (Gd), tem uma função diferenciada dos graus de deterioração dos elementos e das famílias de elementos. Para calcular esse termo, deve-se levar em consideração o fator de relevância de cada família e o grau de deterioração da família.

$$G_d = \frac{\sum_{i=1}^k F_{r(i)} \cdot G_{df(i)}}{\sum_{i=1}^k F_{r(i)}} \quad (16)$$

Onde:

Gd: Grau de deterioração global da estrutura

k: Número de famílias de elementos presentes na edificação;

Fr: Fatores de Relevância Estrutural; e

Gdf: Grau de deterioração de uma família de elementos

Da mesma forma que os graus de deterioração anteriores, nesta etapa é possível determinar os níveis de deterioração da estrutura e propor ações.

Após a definição desses fatores e graus de deterioração, foi desenvolvida uma planilha de análise rápida em campo para obtenção dos graus de dano na estrutura inspecionada para que o resultado da inspeção possa ser obtido de imediato.

Tabela 27 – Planilha para análise rápida

Família	Fator de relevância estrutural (Fr)	Elemento	Fp	Lesão	Fi	Grau de dano (ΣD)	Grau de dano máximo	Grau de deterioração de um elemento (Gde)	Nível de deterioração	Ação
Pilares	0,3	Alma (inferior)	3	Corrosão severa generalizada	8	108	24	42,67	Alto	Reforço/substituição programado
							Gde máximo	Grau de deterioração de uma família de elementos (Gdf)	Nível de deterioração	Ação
							192,00	56,89	Crítico	Substituição imediata
								Grau de deterioração da estrutura (Gd)	Nível de deterioração	Ação
								56,89	Crítico	Substituição imediata

5

CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste estudo foi a verificação das resistências e segurança de estruturas de acordo com os critérios estipulados no EC3, a partir dos geométricos da estrutura, criando e organizando um conjunto de dados e informações, com os principais parâmetros e requisitos verificados durante o dimensionamento de estruturas de suporte de tubulações industriais baseando-se em projetos reais. De forma que através dos resultados se possa ampliar os conhecimentos sobre o assunto proposto, a fim de embasar decisões de manutenção e servir de base para desenvolver uma visão mais clara e objetiva do uso da metodologia na manutenção de estruturas metálicas.

Com base na análise crítica e exploratória realizada por meios de casos de estudo nessa dissertação, onde foram trabalhadas análises de rácio de perda de área de elementos, por meio de diferenças percentuais dos valores limites dos critérios de norma, com os valores obtidos da análise de resistências de cada elemento, foi possível perceber que além dos fatores de segurança estabelecidos nas normas, os projetos são dimensionados com fatores ainda superiores.

Os relatórios de inspeção da indústria utilizam a Figura 29 para indicar os prazos para execução de reparo, reforço, substituição ou novas inspeções, porém foi verificado que existe uma oportunidade de melhoria na identificação dos elementos e posição dos danos nos mesmos bem como uma oportunidade para desenvolvimento de trabalho do estudo da velocidade de corrosão nas estruturas para definição dos prazos ligados aos graus de dano para definição de vida útil, sendo os prazos contidos no quadro, e que estão sendo usados atualmente, definidos aleatoriamente.

Fazendo-se a comparação dos resultados obtidos nos cálculos com os dados do quadro utilizado pelos inspetores em área, verificou-se que a localização do dano necessita ser identificada separadamente nos elementos que possuem diferentes fatores de segurança.

A utilização dos gráficos mostra-se mais eficiente numa inspeção em campo, pois o grau de corrosão do elemento é a informação visual possível de se obter durante a inspeção.

Para se conseguir uma extrapolação de aplicação da metodologia adaptada acerca dos percentuais de perda por dano com corrosão para outros tipos de elementos e estruturas foi necessário criar fatores que abrangessem os demais elementos em suas aplicações e com isso adaptando os cálculos e criando novos critérios de inspeção de fácil aplicação em campo.



Imagens cedidas pela empresa avaliada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA

- Anderson, Ted L. “API 579: a comprehensive fitness-for-service guide.” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2000: 953-963.
- Cui, Xiaofei. “A framework for corrosion assessment in metallic structures, from data analysis to risk based inspection.” *Eksploatacja i Niezawodność*, 2021: 11-20.
- Hemker, Andreas. “Building Maintenance Management for Steel Structures in Industrial Facilities.” *ce/papers*, 2019.
- IBRACON. “APLICAÇÃO DE METODOLOGIA GDE/UnB EM UMA EDIFICAÇÃO .” *60CBC2018*. Foz do Iguaçu, 2018.
- Lemes1, L. C. “Maintenance Costs in the Process Industry: A Literature Review.” s.d.
- Maggard, Bill N. “Total productive maintenance: a timely integration of production and maintenance.” *Production and Inventory Management Journal*, 1992: 6.
- Pannoni, Fábio Domingos. “Coletânea do uso do aço.” *GERDAU, 4ª Edição*, 2007.
- R.a, Vishnu C. “Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants: .” *Global Colloquium in Recent Advancement and Effectual Researches in Engineering, Science* , 2016: Elsevier Ltd.
- Trojan, Flavio. “Classificação dos tipos de manutenção pelo método de Análise Multicritério ELECTRE TRI.” *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2013: 343-357.
- ui X, Liang X, Bharadwaj U. “A framework for corrosion assessment in metallic structures, from data analysis to risk based inspection. .” *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2021: 11-20.
- Xie, Li Quan. *Applied Mechanics and Civil Engineering II*. Zurich, SWITZERLAND: Trans Tech Publications, 2012.
- Xie, Li Quan. “Calculation of corrosion losses on weathering steel structures.” Em *Applied Mechanics and Materials*, 177-182. Trans Tech Publications, 2012.