

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS– UFSCAR
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA – CCET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEMEC

PAULO ALMIR BORGES DE SOUSA FILHO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS AÇOS
GALVANIZADO S235 E INOX 304 APLICADOS NA
CONSTRUÇÃO DE TORRE DE RESFRIAMENTO
SUBMETIDA A AÇÃO DINÂMICA E
COMPORTAMENTO NÃO LINEAR**



São Carlos-SP
2023

PAULO ALMIR BORGES DE SOUSA FILHO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS AÇOS GALVANIZADO S235 E INOX 304
APLICADOS NA CONSTRUÇÃO DE TORRE DE RESFRIAMENTO SUBMETIDA A AÇÃO
DINÂMICA E COMPORTAMENTO NÃO LINEAR**

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
São Carlos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: José Benaque Rubert



São Carlos-SP
2023



Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Paulo Almir Borges de Sousa Filho, realizada em 28/02/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Jose Benaque Rubert (UFSCar)

Prof. Dr. Mariano Eduardo Moreno (UFSCar)

Prof. Dr. Jorge Munaiar Neto (EESC/USP)

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela manutenção da estrutura capaz de manter a pesquisa científica no Brasil.

A esta Universidade, por proporcionar condições de realização do curso de pós-graduação.

Ao meu orientador, pelo suporte, correções e incentivo.

Aos demais professores que contribuíram para minha formação.

Aos meus pais pelo apoio e incentivo.

RESUMO

A presente investigação está focada na avaliação de dois tipos de aço, o inox 304 e o galvanizado S235, aplicados na construção de estruturas de aço utilizadas em torres de resfriamento. Estes equipamentos são amplamente encontrados em indústrias, como por exemplo a sucroalcooleira, e podem ser expostos à corrosão de acordo com as propriedades dos fluidos inerentes ao processo. Isto associado com vibrações do sistema podem torná-los mais susceptíveis à falha. É necessária a análise da integridade estrutural, verificando pontos críticos e os deslocamentos, carregamentos e tensões de toda a estrutura. A análise é baseada no método da rigidez direta, utilizando elementos do tipo barra em um sistema de referência tridimensional, com módulos estático e dinâmico. Para a análise dependente do tempo, o algoritmo de Newmark é aplicado considerando o sistema incondicionalmente estável com relação ao incremento de tempo adotado. Um modelo constitutivo bilinear com endurecimento linear é utilizado para descrever o comportamento elasto-plástico dos materiais, enquanto a corrosão é considerada como uma redução homogênea na área de seção transversal das barras. Para resolução do problema de elementos finitos não-linear, foram escritas rotinas em Fortran e exemplos da literatura foram analisados de modo a conferir a acurácia dos resultados. No estudo de caso, os carregamentos de entrada foram baseados em dados coletados através de software em análise de campo. Análises estática e dinâmica são executadas para ambos os materiais, sob corrosão ou não, estabelecendo uma comparação entre os efeitos das não linearidades e a resposta da estrutura de acordo com os materiais empregados. Os resultados comprovam a superioridade do aço Inox 304 comparado ao aço estrutural galvanizado S235 W, quando induzida uma corrosão em 50% em parte da estrutura, em especial quando analisada a resposta em fase plástica dos elementos. Elementos críticos são identificados de modo a propor uma intervenção em caráter corretivo para prevenção do colapso da estrutura.

Palavras-chave: Dinâmica não-linear; Não-linearidade física; Simulação Computacional; Corrosão; Estrutura de aço.

ABSTRACT

The present investigation is focused on the evaluation of two types of steel, stainless 304 and galvanized S235, applied in steel structures builds commonly present in cooling towers. This equipment is widely found in industries, such as sugar and alcohol, and can be exposed to corrosion according to the properties of the fluids inherent to the process. This coupled with vibrations can make them more susceptible to failure. It is necessary to analyze the structural integrity, checking critical points and the displacements, loads and tensions of the entire structure. The analysis is based on the direct stiffness method, using bar and truss elements in a three-dimensional reference system, with static and dynamic modules. For the time-dependent analysis, Newmark's algorithm is applied considering the system unconditionally stable with respect to the adopted time increment. A bilinear constitutive model with linear hardening is used to describe the elastic-plastic behavior of the materials, while corrosion is considered as a homogeneous reduction in the cross-sectional area of the bars. To solve the non-linear finite element problem, routines were written in Fortran and examples from the literature were analyzed in order to check the accuracy of the results. In the case study, the input loads were based on data collected through software in field analysis. Static and dynamic analyzes are performed for both materials, with and without corrosion, establishing a comparison between the effects of nonlinearities and the structure response according to the materials used. The results prove the better behavior of stainless steel 304 compared to galvanized structural steel S235 W, when 50% corrosion is induced in part of the structure, especially when analyzing the response in the plastic phase of the elements. Critical elements are identified in order to propose a corrective intervention to prevent the collapse of the structure.

Keywords: Non-linear dynamics; Physical nonlinearities; Numerical simulation; Corrosion; Steel Structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático de funcionamento – Torre de resfriamento	16
Figura 2 – Exemplo 1 – forma construtiva FAP	16
Figura 3 – Exemplo 2 – forma construtiva FAP	17
Figura 4 – Exemplo 1 – forma construtiva FEP	17
Figura 5 – Tipos de arraste: natural e mecânico	18
Figura 6 – Torre de resfriamento: fluxo cruzado.....	19
Figura 7 – Torre de resfriamento: contrafluxo.....	19
Figura 8 – Situação anterior ao colapso – Torre de resfriamento	20
Figura 9 – Situação posterior ao colapso – Torre de resfriamento	20
Figura 10 – Modelo esquemático do sistema de vibração unilateral do veículo	22
Figura 11 – Modelo da estrutura treliçada que constitui o telhado.....	22
Figura 12 – Modelo da estrutura tipo arco que constitui o telhado.....	22
Figura 13 – Força x deslocamento – Comparação entre resposta dos dispositivos e barra regular	23
Figura 14 – Sistema acoplado viga-arco	24
Figura 15 – Modelo de elemento tipo barra tridimensional – 3 DOF por nó.....	29
Figura 16 – Curva tensão x deformação para material elasto-plástico com endurecimento bilinear.....	38
Figura 17 – Curva de tensão x deformação – Deformações elástica e plástica combinadas.....	40
Figura 18 - Fluxograma de gerenciamento de arquivos para rotina executável .sh...	43
Figura 19 – Fluxograma para implementação do algoritmo – Análise estática não-linear	44
Figura 20 – Fluxograma da rotina de geração da equação para evolução das forças no tempo	45
Figura 21 – Fluxograma da rotina em função do carregamento dinâmico (parte A) ..	46
Figura 22 – Fluxograma da rotina em função do carregamento dinâmico (parte B) ..	47
Figura 23 – Fluxograma para aplicação do método de Newmark	48
Figura 24 – Fluxograma detalhando lógica na aplicação do método de Newmark	50
Figura 25 – Estrutura exemplo 3.41	51
Figura 26 – Estrutura exemplo 16.8	53
Figura 27 – Deslocamentos x tempo – GDLs 4 e 7 – Rotinas x literatura	55
Figura 28 – Velocidades x tempo – GDLs 4 e 7 – Rotinas x literatura	55
Figura 29 – Acelerações x tempo – GDLs 4 e 7 – Rotinas x literatura	55
Figura 30 – Domo treliçado: a) vista lateral b) vista frontal.....	56
Figura 31 – Carregamentos aplicados no domo treliçado	56
Figura 32 – Deslocamento do nó central na direção z para os carregamentos A e B: análise linear.....	57
Figura 33 – Configuração geométrica e vinculações da estrutura – Caso de estudo	58
Figura 34 – Evolução da aplicação de forças nos nós 13 e 16.....	61
Figura 35 – Comportamento da estrutura – Aço inox 304	63
Figura 36 – Ampliação Nó 16x (GDL 46) – Deslocamento, velocidade e aceleração x tempo - Aço inox 304	64
Figura 37 – Ampliação Nó 16x (GDL 46) – Deslocamento x tempo - Aço inox 304 ...	66
Figura 38 – Ampliação Nó 16x (GDL 46) – Velocidade x tempo - Aço inox 304	67
Figura 39 – Ampliação Nó 16x (GDL 46) – Aceleração x tempo - Aço inox 304	67
Figura 40 – Resposta elástica para o elemento 34 sem a presença de corrosão – Aço inox 304	68

Figura 41 – Resposta elástica para o elemento 36 sem a presença de corrosão – Aço inox 304	68
Figura 42 – Curvas de tensão x deformação para respostas linear e elasto-plástica – Elemento 34 – Aço inox 304 com presença de corrosão.....	69
Figura 43 – Curvas de tensão x deformação para respostas linear e elasto-plástica – Elemento 36 – Aço inox 304 com presença de corrosão.....	70
Figura 44 – Resposta elástica para elementos sem a presença de corrosão – Elemento 34 – Aço estrutural galvanizado S235 W sem presença de corrosão	71
Figura 45 – Resposta elástica para elementos sem a presença de corrosão – Elemento 36 – Aço estrutural galvanizado S235 W sem presença de corrosão	71
Figura 46 – Curvas de tensão x deformação para respostas linear e elasto-plástica – Elemento 34 – Aço estrutural galvanizado S235 W com presença de corrosão	72
Figura 47 – Curvas de tensão x deformação para respostas linear e elasto-plástica – Elemento 36 – Aço estrutural galvanizado S235 W com presença de corrosão	73
Figura 48 – Principais elementos em tração e compressão – estrutura de torre.....	74
Figura 49 – Curvas de deformação x tempo – Aço Inox 304 sem efeito de corrosão	75
Figura 50 – Curvas de deformação x tempo – Aço estrutural galvanizado S235 W com efeito de corrosão	76
Figura 51 – Deslocamento GDL 25 9 _x - Elemento 34 amort/ n. amort	77
Figura 52 – Velocidade GDL 25 9 _x - Elemento 34 amort./ n. amort.....	77
Figura 53 – Aceleração GDL 25 9 _x - Elemento 34 amort./ n. amort.....	78
Figura 54 – Tensão x deformação – Elemento 34 (Inox 304) – 50% corrosão	79
Figura 55 – Tensão x deformação – Elemento 34 (Inox 304) – 25% corrosão	80
Figura 56 – Evolução cíclica de aplicação de forças nos nós 13 e 16	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1–Resultados dos deslocamentos e tensões – 3.41 – Rotinas x Literatura...	52
Tabela 2–Resultados das forças de reação – 3.41 – Rotinas.....	52
Tabela 3–Resultados dos deslocamentos – 16.8 – Rotinas x Literatura	53
Tabela 4–Resultados das velocidades – 16.8 – Rotinas x Literatura	54
Tabela 5–Resultados das acelerações – 16.8 – Rotinas x Literatura.....	54
Tabela 6 - Propriedades dos materiais para aço estrutural galvanizado S235 W e aço Inox 304.....	60
Tabela 7–Resultados para tensão e deformação máximas nos elementos 34 e 36..	73
Tabela 8–Frequências naturais e períodos	76
Tabela 9–Resultados para tensão e deformação máximas no elemento 34, construído em Inox 304	81

LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

Variável	Descrição da variável	Unidade
$[M]$	Matriz de massa	kg
$[C]$	Matriz de amortecimento	Ns/m
$[K]$	Matriz de rigidez	N/m
$\{F\}$	Vetor de forças	N
$\{x\}, \{v\}$	Vetor de deslocamento	m
$\{\dot{x}\}, \{\dot{v}\}$	Vetor de velocidade	m/s
$\{\ddot{x}\}, \{\ddot{v}\}$	Vetor de aceleração	m/s ²
L_k	Comprimento elemento k	m
(x_j, y_j, z_j)	Coordenadas do nó (2) vinculado	m
(x_i, y_i, z_i)	Coordenadas do nó (1) vinculado	m
$C_{x,k}$	Cosseno diretor do elemento na direção do eixo x	rad
$C_{y,k}$	Cosseno diretor do elemento na direção do eixo y	rad
$C_{z,k}$	Cosseno diretor do elemento na direção do eixo z	rad
$[K]$	Matriz rotacionada	N/m
$[k]$	Matriz local	N/m
$[T]$	Matriz de rotação	rad
E, E_k	Módulo de elasticidade (Young)	GPa
E_t	Módulo tangente	GPa
A	Seção de área transversal	m ²
I	Momento de inércia	m ⁴
ρ	Densidade	kg/m ³
K_{st}	Constante de rigidez	N/m
$K_{st,barra_e}$	Constante de rigidez para elemento barra em regime elástico	N/m
$K_{st,barra_p}$	Constante de rigidez para elemento barra em regime plástico	N/m
$K_{st,mola}$	Constante de rigidez para elemento mola	N/m
m	Constante de massa	
m_{barra}	Constante de massa para elemento barra	kg
M_{lumped}	Matriz de massas concentradas	kg

$[m']$	Matriz local de massa	kg
$[c]$	Matriz de amortecimento viscoso	Ns/m
α_R, β_R	Fatores arbitrários para amortecimento de Rayleigh	
$\{d\}$	Vetor de deslocamentos	m
σ_k	Tensão elemento	MPa
ε	Deformação no elemento	
$\{u_i, u_j\}'$	Vetor de deslocamentos em GDL associados ao nó	m
t	Instante de tempo	s
Δ_t	Incremento de tempo	s
γ, β	Parâmetros para método de Newmark	
\bar{K}	Matriz de rigidez efetiva	N/m
A_{AUX}, B_{AUX}	Variáveis auxiliares para método de Newmark	
$\Delta \bar{F}_i$	Incremento de força	N
Δv_i	Incremento aditivo de deslocamento	m
$\Delta \dot{v}_i$	Incremento aditivo de velocidade	m/s
$\Delta \ddot{v}_i$	Incremento aditivo de aceleração	m/s ²
v_{i+1}	Deslocamento no instante de tempo subsequente	m
\dot{v}_{i+1}	Velocidade no instante de tempo subsequente	m/s
\ddot{v}_{i+1}	Aceleração no instante de tempo subsequente	m/s ²
ω	Frequência natural do sistema	rad/s
$[V]$	Matriz para cálculo dos autovalores	
λ_i	Autovalores associados aos modos de vibração	
T_i	Períodos associados aos modos de vibração	s
σ_y	Tensão de escoamento	MPa
H	Módulo de endurecimento linear	MPa
$\varepsilon_{elastic}, \Delta \varepsilon_e$	Deformação elástica	
$\varepsilon_{plastic}, \Delta \varepsilon_p$	Deformação plástica	
$\varepsilon_{yielding}, \varepsilon_y$	Deformação equivalente à tensão de escoamento	
δ	Tolerância para procedimento iterativo	
$\Delta \sigma$	Tensão residual	MPa
κ	Fator de redução de resistência à compressão	
λ_0	Coefficiente de esbeltez limite	
N_e	Força axial de compressão resistente	N

Q	Fator de redução de flambagem local	
k	Constante de comprimento efetivo	
σ_{cr}	Tensão crítica de flambagem	MPa

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA	15
1.1. TORRES DE RESFRIAMENTO: CONCEITO	15
1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2. OBJETIVOS.....	26
2.1. OBJETIVO GERAL	26
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
3. MODELAGEM MATEMÁTICA	27
3.1. EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICA	28
3.2. MATRIZ DE RIGIDEZ DO ELEMENTO DE TRELIÇA.....	28
3.3. MATRIZES DE MASSA	32
3.4. MATRIZES DE AMORTECIMENTO	33
3.5. VETOR-MATRIZ DE FORÇAS	34
3.6. SOLUÇÃO EM REGIME ESTÁTICO.....	34
3.7. SOLUÇÃO EM REGIME DINÂMICO.....	35
3.8. MODELO ELASTO-PLÁSTICO	38
3.9. CONSIDERAÇÃO DE FLAMBAGEM	40
4. METODOLOGIA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	42
4.1. ROTINA DE PREPARAÇÃO DE ARQUIVOS E GERENCIAMENTO DOS DIRETÓRIOS.....	42
4.2. FLUXOGRAMA PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA ESTÁTICO	43
4.3. FLUXOGRAMA PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DINÂMICO	44
4.4.1 Geração da equação para evolução das forças.....	45
4.4.2 Descrição do comportamento dinâmico.....	45
4.4.3 Definição das matrizes locais e globais	48
4.4.4 Aplicação do método de Newmark	49
5. RESULTADOS ESPERADOS	51
5.1. EXERCÍCIO 3-41	51
5.2. EXERCÍCIO 16-8	52
5.3. DOMO TRELIÇADO	56
5.4. APLICAÇÃO AO CASO DA TORRE DE RESFRIAMENTO.....	58
5.4.1 Materiais utilizados na construção da torre de resfriamento	59
5.4.2 Evolução das ações com o tempo	61
5.4.3 Resultados das simulações sem e com corrosão	62

5.5	CONSIDERAÇÃO DO AMORTECIMENTO	76
6	MODIFICAÇÕES NO ELEMENTO CRÍTICO	79
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	82
7.1	SUGESTÃO PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO.....	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	APÊNDICE A – PADRÃO DE ARQUIVO DE ENTRADA.....	88
	APÊNDICE B – RESPOSTA SOB EFEITO DE CORROSÃO (INOX 304).....	97

1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA

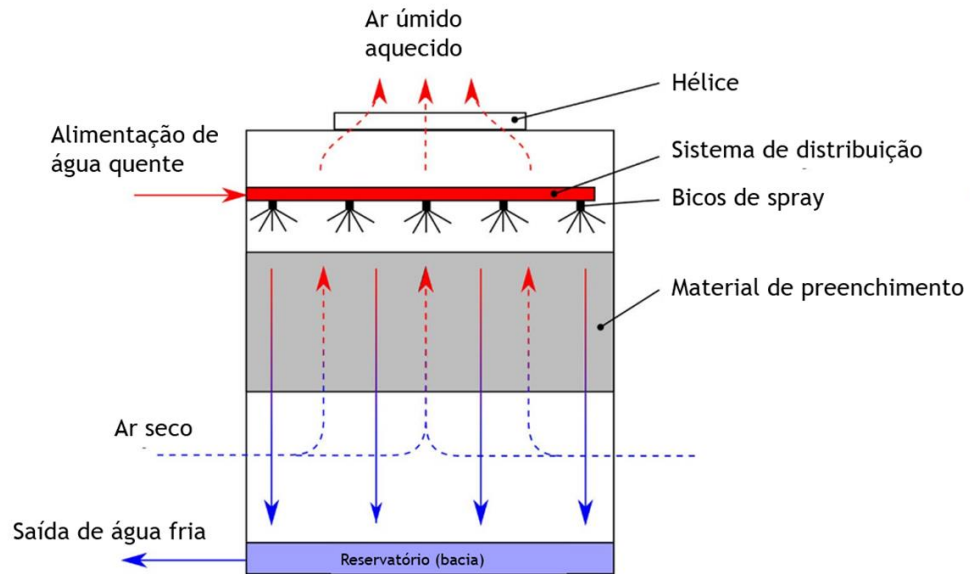
A compreensão do comportamento dinâmico não-linear de estruturas com respeito ao tipo de material utilizado em sua construção é parte importante e necessária no desenvolvimento de maquinários industriais e dimensionamento de equipamentos, incluindo torres de resfriamento que é o foco principal do presente estudo. Estes equipamentos são amplamente encontrados em indústrias, como as sucroalcooleiras, sob variadas configurações que podem ser dispostas em arranjos modulares de célula única ou multicelulares, de acordo com a capacidade de refrigeração requerida. São mais utilizadas para a manutenção de temperatura e controle de processos em aplicações como dornas de mosto, sistemas de lubrificação, entre outros. Devido às propriedades inerentes aos fluidos do processo, os componentes estruturais podem ser expostos à corrosão, que neste caso é extrapolada para conferir possíveis alterações na estrutura. Vibrações advindas do sistema motor ou do desbalanceamento da hélice podem ser transmitidos de uma estrutura modular a outra quando montadas em conjunto.

1.1. TORRES DE RESFRIAMENTO: CONCEITO

As torres de resfriamento se baseiam no princípio de resfriamento evaporativo. Um conjunto de pás rotativas é responsável por aspirar o ar seco, que passa pelo material de preenchimento. O material de preenchimento tem a função de diminuir a velocidade da água quente alimentada pelo sistema de distribuição e aspergida pelos bicos de spray, promovendo o aumento no tempo de retenção para a troca térmica entre o ar e o fluido. O ar quente e úmido é removido via arraste, sendo o fluido resfriado escoado por gravidade para o reservatório, também denominado de bacia ou cuba. A figura 1 apresenta de forma esquemática o funcionamento descrito.

O material de preenchimento serve para reduzir a velocidade de escoamento e distribuir a água alimentada pelos bicos de spray, aumentando a área para contato entre a água e o fluxo de ar do sistema. Podem ser utilizados PVC, polipropileno ou madeira, sendo o segundo mais utilizado. A utilização de material de preenchimento é essencial para o aumento do tempo de retenção da água na torre, promovendo uma melhor eficiência da refrigeração do fluido.

Figura 1 – Diagrama esquemático de funcionamento – Torre de resfriamento



Fonte: Jani, 2021 (Modificada pelo autor)

São amplamente utilizadas em sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC ou HVAC) e apresentam duas formas construtivas: FAP ou FEP. FAP é a sigla para “*factory assembled product*” (produto montado em fábrica) sendo uma estrutura pré-montada modular, a qual apresenta maior facilidade quanto à mobilização e flexibilidade na instalação, sem a necessidade de construções em alvenaria. As figuras 2 e 3 apresentam exemplos desta opção.

Figura 2 – Exemplo 1 – forma construtiva FAP



Fonte: SPX Cooling, 2021

Figura 3 – Exemplo 2 – forma construtiva FAP



Fonte: Alpina equipamentos, 2021

A sigla FEP significa “*field erected product*” (produto erguido em campo) e representa uma estrutura que admite a construção de elementos em alvenaria, e, portanto, não é móvel. Permitem alcançar maiores capacidades de vazão para um mesmo gradiente térmico, comparadas às torres do tipo FAP. A figura 4 apresenta um exemplo deste tipo de conjunto.

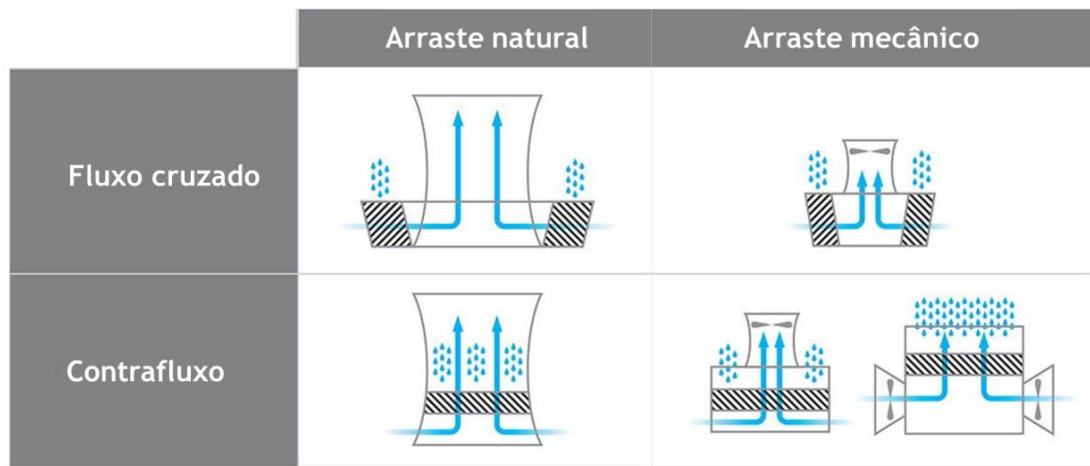
Figura 4 – Exemplo 1 – forma construtiva FEP



Fonte: SPX Cooling, 2021

Podem ser também classificadas em função do tipo de arraste do ar, natural ou mecânico. O arraste natural baseia-se no princípio de convecção onde o ar quente, de menor densidade, tende a permanecer acima do ar frio, de maior densidade. No arraste mecânico, a remoção do ar quente do sistema é facilitada pela utilização de um propulsor localizado no topo ou na lateral da torre. A figura 5 apresenta os esquemas de funcionamento apresentando as diferenças entre os sistemas.

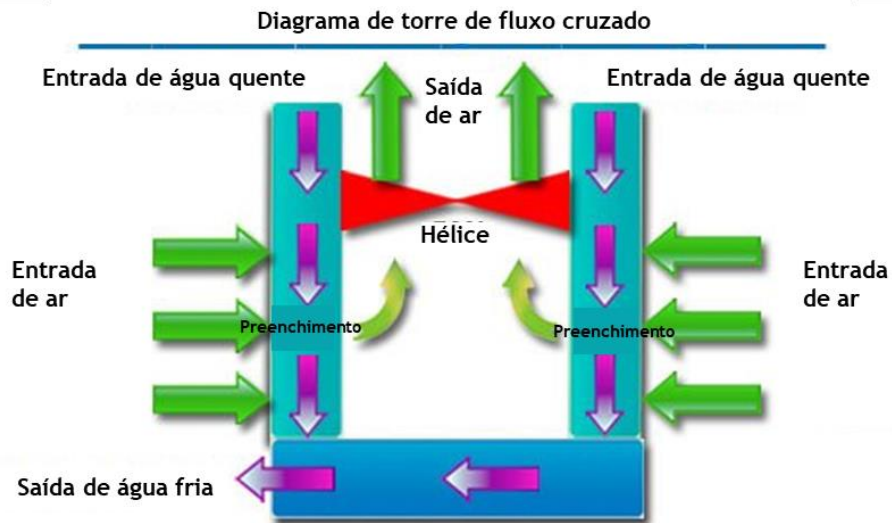
Figura 5 – Tipos de arraste: natural e mecânico



Fonte: Cooling Tower Products, 2018 (Modificada pelo autor)

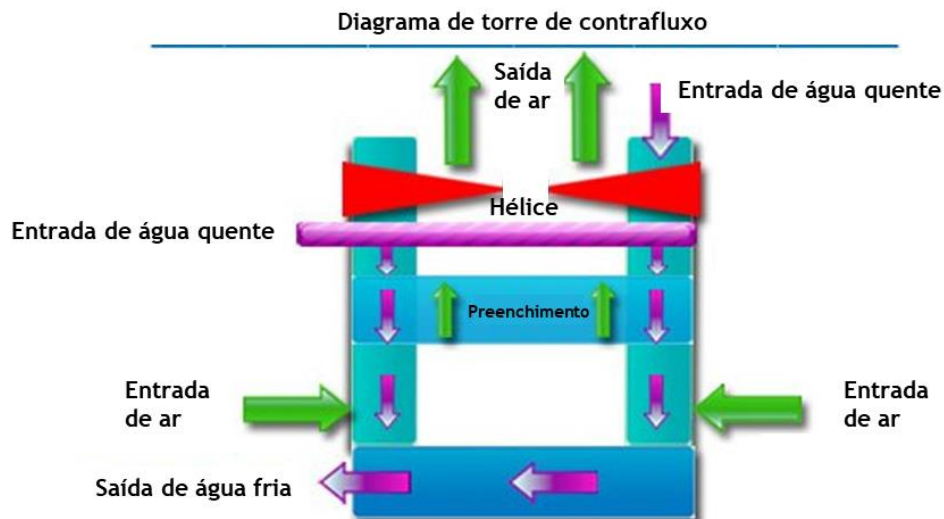
Conforme mostram as figuras 6 e 7, as torres de resfriamento podem ser classificadas em função da direção do fluxo de ar com relação ao fluxo de escoamento de água ao longo do material de preenchimento, sendo divididas entre contrafluxo e fluxo cruzado. No sistema de contrafluxo o fluxo de ar é paralelo ao fluxo de água, porém em sentido oposto. No sistema de fluxo cruzado o fluxo de ar é perpendicular ao de água.

Figura 6 – Torre de resfriamento: fluxo cruzado



Fonte: Jani, 2021 (Modificada pelo autor)

Figura 7 – Torre de resfriamento: contrafluxo



Fonte: Jani, 2021 (Modificada pelo autor)

O conjunto do equipamento e estrutura é submetido às ações dinâmicas resultantes do acionamento e parada do ventilador. Quando a estrutura das torres é construída em aço, frequentemente o processo de corrosão compromete parte da área das seções transversais dos elementos estruturais, essa situação pode levar ao colapso de vários conjuntos de estruturas desse tipo conforme se mostra nas figuras 8 e 9 (Mercury, 2013), sendo neste contexto em que o trabalho foi desenvolvido.

Figura 8 – Situação anterior ao colapso – Torre de resfriamento



Fonte: Walsh, 2013 (Modificada pelo autor)

Figura 9 – Situação posterior ao colapso – Torre de resfriamento



Fonte: Walsh, 2013 (Modificada pelo autor)

1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

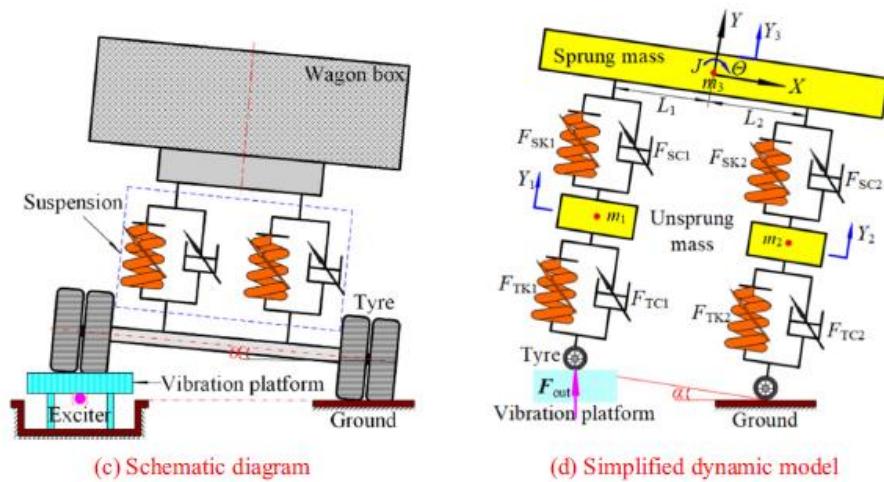
Em seguida se apresenta um conjunto de estudos desenvolvidos por diversos autores que serviram de base para este trabalho, neles se destacam os fatores que impactam no custo computacional envolvido na solução do problema. Sauoma (1999), menciona alguns destes fatores com relação às condições impostas às estruturas, sendo: modelo de excitação (estático ou dinâmico); geometria global (pequenas deformações ou grandes deformações); tipos de elemento constituintes e graus de liberdade associados; propriedades dos materiais dos elementos (linear ou não linear); tipos de seção geométrica (constante ou variável), vinculações entre os nós e reações de apoio.

Lee, Chung e Chang (2017) propõem um procedimento alternativo para análise de elementos finitos em estruturas considerando o efeito de amortecimento, utilizando a idealização de massas concentradas em uma variação do método de Newmark implícito com o objetivo de aproveitar as vantagens da integração explícita. O método proposto considera a matriz de amortecimento proporcional à rigidez da estrutura, com implantação de modelo para sua diagonalização. O modelo opera a partir das condições de parâmetros de Newmark para um sistema incondicionalmente estável, método da aceleração média constante, sendo o tamanho do incremento de tempo inerente à condição de estabilidade da estrutura. A acurácia e convergência é baseada em testes numéricos da solução com relação a uma tolerância definida a partir da literatura. Os resultados obtidos pela derivação deste método implícito se mostram similares aos encontrados pelo método explícito de Newmark, com a vantagem de lidar com descontinuidades e amortecimento desproporcional sem a implementação de estratégias específicas, tornando-o um modelo robusto para análise dinâmica de estruturas com efeito de amortecimento.

Zhou, Li, Ren, Song e Wen (2018) apresentam a análise dinâmica não linear de um sistema veicular com vibração unilateral, considerando não linearidades estruturais associadas. As equações não lineares de movimento do sistema incorporam os parâmetros não lineares com relação à suspensão e pneu. O modelo é apresentado na figura 10, assumindo variáveis baseadas em informações de fabricante e calculadas. O conjunto mostrado descreve o comportamento dinâmico de um sistema de descarga granular, com base excitada harmonicamente, visando evidenciar a não linearidade em especial do pneu com a estrutura de excitação.

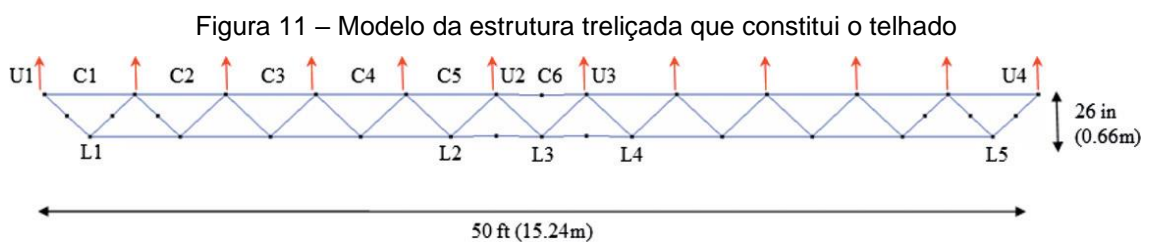
A equação não linear de movimento do sistema proposto apresentado na figura 10 considera os efeitos entre pneu e suspensão caracterizados como componentes quadráticos e cúbicos, deduzidos da formulação lagrangiana. A modelagem propõe a inclusão dos efeitos associados à não linearidade do comportamento elástico dos pneus, o ângulo de inclinação da estrutura e sua amplitude de excitação, correlacionando as vantagens e limitações do modelo proposto.

Figura 10 – Modelo esquemático do sistema de vibração unilateral do veículo

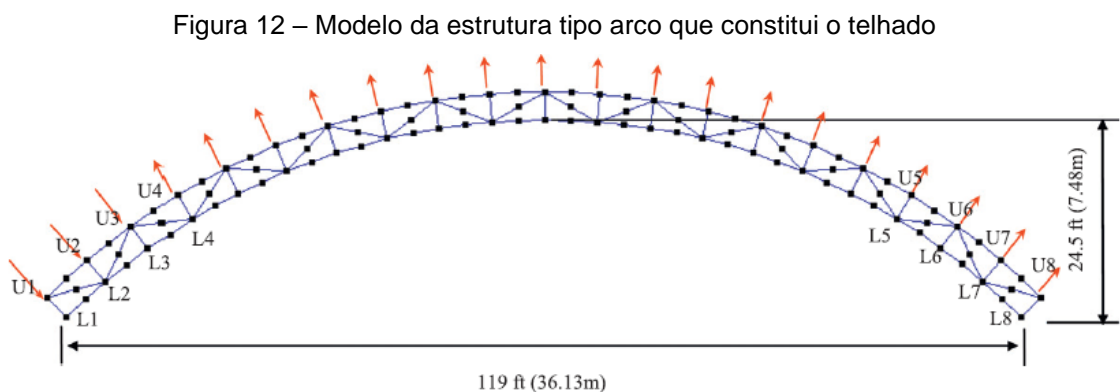


Fonte: Zhou et.al, 2018

Bai e Zhang (2013) estudam o comportamento dinâmico não linear para a estrutura metálica que compõe um telhado, quando submetida à condição de carregamento transiente derivado da ação do vento. Considera nas análises as não linearidades pertinentes à geometria e materiais constituintes das estruturas, efetuando simulação para uma estrutura treliçada e outra arqueada como mostra-se nas figuras 11 e 12.



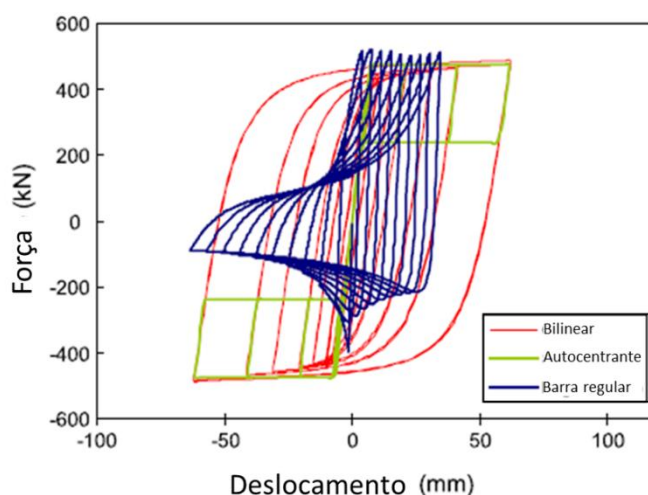
Fonte: Bai e Zhang, 2013



Fonte: Bai e Zhang, 2013

Propõe a utilização de mecanismos de limitação de esforços nas regiões que se mostram mais suscetíveis ao colapso derivado dos carregamentos impostos, seja pela associação de conjunto com comportamento bilinear ou autocentrante. Os dispositivos de limitação de esforços substituem membros que sofrem compressão significativa, e apresentam alto nível de ductilidade. A relação entre a força aplicada e a deformação nestes dispositivos podem ser descritos como um modelo de histerese com forma similar à uma bandeira (“*flag shaped*”). A figura 13 apresenta as diferenças na resposta de cada modelo. Estes dispositivos assumem a função de “fusíveis” da estrutura associada, sendo os danos concentrados nos dispositivos pré-selecionados e preservando a integridade geral da estrutura submetida aos carregamentos oriundos da ação do vento.

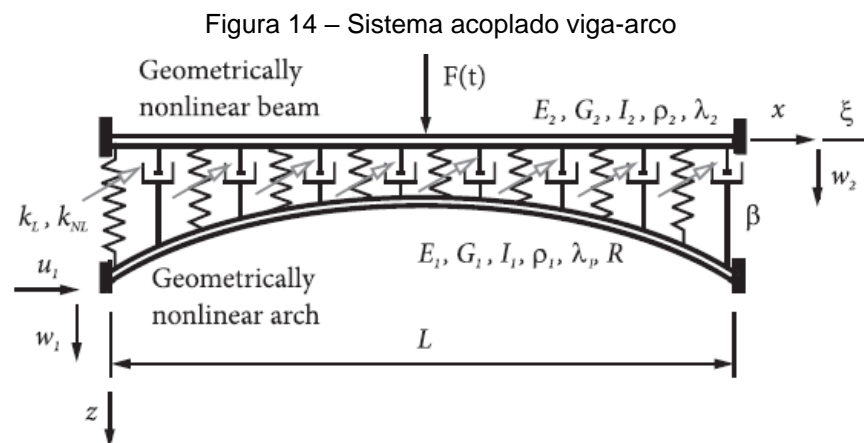
Figura 13 – Força x deslocamento – Comparação entre resposta dos dispositivos e barra regular



Fonte: Bai e Zhang, 2013 (Modificado pelo autor)

Law e Li (2009) propõem um procedimento para identificação de amortecimento estrutural, baseado em um modelo iterativo com técnica de atualização em função da resposta da aceleração obtida analiticamente. O amortecimento é tratado como do tipo viscoso, obtido a partir do inverso da transformação modal. A matriz sensível à variação de tempo é resolvida computacionalmente a partir da aplicação do método de Newmark. O modelo é validado para o caso de uma estrutura tridimensional sujeita a excitação, avaliando o comportamento dinâmico da estrutura para variados coeficientes de amortecimento.

Stojanovic, Petkovic e Milic (2018) avaliam o comportamento não linear das vibrações de um sistema viga-arco acoplado, avaliando o comportamento viscoelástico. Este modelo físico, apresentado na figura 14, que é similar ao que descreve a estrutura de uma ponte, possibilita correlacionar o efeito dos modos de vibração sob condições de excitação distintas, verificando a influência do acoplamento entre os elementos que compõem o sistema e sua relação com o regime de vibração. As simulações do modelo dinâmico valem-se do método de Newmark para solução e buscam evidenciar os benefícios da estabilização da estrutura via absorção dinâmica não linear, reduzindo a amplitude dos efeitos nos elementos excitados.



Fonte: Stojanovic et al, 2018

Li et al. desenvolvem um modelo constitutivo para descrever as propriedades mecânicas de barras sob efeito de corrosão. O modelo é baseado a partir da afirmação de que o efeito de corrosão em barras de aço apenas impacta na redução da área da seção transversal. Uma equação constitutiva elasto-plástica bilinear que correlaciona tensão-deformação com a natureza da corrosão por “*pitting*” é validada a partir de dados experimentais.

Xiong et al. (2019) buscam estudar as mudanças nas características da relação constitutiva de barras sob efeito de corrosão e os possíveis mecanismos associados. Descreve o fenômeno como uma combinação de três partes, uma sem corrosão, uma com área de seção transversal variável e outra com corrosão uniforme. A equação constitutiva é baseada em um modelo elasto-plástico trilinear que representa as fases elástica, de escoamento e de endurecimento. O modelo se

revela acurado quando utilizado na avaliação da influência da taxa de corrosão nas propriedades mecânicas de barras sob efeito de corrosão.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo é estimar os efeitos da mudança do tipo de aço estrutural utilizado na construção de estrutura metálica destinada à sustentação de hélices de uma torre de resfriamento. Usualmente se emprega o aço galvanizado estrutural recoberto em zinco por imersão a quente, como o S235 W que apresenta uma camada de proteção contra corrosão de maior espessura, e se estuda a possibilidade de utilizar aços com outras propriedades físicas e mecânicas, no caso o aço inox 304. Comparando-se os resultados obtidos via simulações numéricas, busca-se sugerir alternativas para construção desse tipo de estrutura de torre de resfriamento. A estrutura será descrita em função de elementos do tipo barra, com 3GDL por nó, sendo aplicado perfis de força em pontos estratégicos. O material constituinte será descrito em termos de modelo constitutivo elasto-plástico bilinear, de modo a incluir o efeito de deformação em regime plástico.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um conjunto de rotinas capaz de prever o comportamento por carregamentos estáticos e por carregamentos dinâmicos da estrutura;
- Simular para estruturas com comportamentos conhecidos, de modo a verificar e validar o funcionamento e resultados obtidos pelas rotinas;
- Avaliar o comportamento dinâmico da estrutura para condições geométricas e de imposição de carga definidas, relacionando as variáveis justificáveis para análise;
- Avaliar o comportamento dinâmico da mesma estrutura, mas desta vez valendo-se da alteração de material constituinte e verificando para as não-linearidades.
- Comparar os resultados obtidos, verificando as diferenças entre os modelos constitutivos e a presença de corrosão, bem como o efeito das não linearidades nas variáveis;

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Embora existam muitos programas de computador acadêmicos e comerciais destinados a análise não-linear de estruturas submetidas a ações dinâmicas, a opção feita aqui foi a de desenvolver um programa próprio de análise que incluísse o efeito da corrosão de forma mais elementar. As rotinas desenvolvidas e a inclusão da corrosão levam a uma melhor compreensão sobre como funcionam as equações da dinâmica estrutural combinadas com a não linearidade introduzida pelo processo de corrosão.

A análise é baseada no método da rigidez direta, utilizando elementos do tipo barra em um sistema de referência tridimensional, com módulos estático e dinâmico. Para a análise dependente do tempo, o algoritmo de Newmark é aplicado considerando o sistema incondicionalmente estável com relação ao incremento de tempo adotado. Matrizes de massa concentrada para elementos espaciais do tipo barra são utilizadas para descrever os efeitos de massa na análise dinâmica. Um modelo constitutivo elasto-plástico bilinear com endurecimento linear é utilizado para descrever o comportamento elasto-plástico dos materiais. A corrosão é considerada como uma redução homogênea na área da seção transversal, proporcional à área original do elemento. Para a análise numérica, rotinas para simulação não linear em elementos finitos foram escritas em Fortran em ambiente Linux-Ubuntu.

Simulações numéricas de estruturas com comportamento conhecido foram conduzidas de modo a verificar a acurácia dos resultados produzidos. Para o estudo de caso, os carregamentos de entrada foram estimados com base em dados coletados em campo, através de software de confiabilidade e manutenção preditiva. Ambas análises estática e dinâmica são executadas, primeiro sem considerar a presença de corrosão no aço inox e galvanizado. Uma comparação entre os valores obtidos com respeito às deformações é realizada de modo a explicitar as diferenças entre o comportamento elástico e elasto-plástico, assim como verificar se os incrementos de força contribuem para diferenças nas deformações obtidas. O mesmo procedimento é repetido, desta vez considerando corrosão uniforme ao longo dos elementos. Considerando as limitações do modelo proposto, os resultados principais são apresentados, estabelecendo uma comparação entre os efeitos das não linearidades e a resposta da estrutura para ambos os materiais.

3.1. EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICA

A análise do comportamento de uma estrutura começa com a forma matricial da equação geral da dinâmica do movimento para um sistema estrutural, expressa na equação 1. A solução dessa equação é conduzida através de métodos numéricos e os resultados em deslocamentos, velocidades e acelerações representará de maneira razoável o comportamento de sistemas massa-mola-amortecedor. A solução dessa equação será feita pelo método de Newmark implícito e de segunda ordem conforme mostrado em Naeim e Anderson (2012) e apresentado no item 3.7.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

Onde:

$[M]$ = Matriz de massa

$[C]$ = Matriz de amortecimento

$[K]$ = Matriz de rigidez

$\{F\}$ = Vetor de forças

$\{x\}$ = Vetor de deslocamento

$\{\dot{x}\}$ = Vetor de velocidade

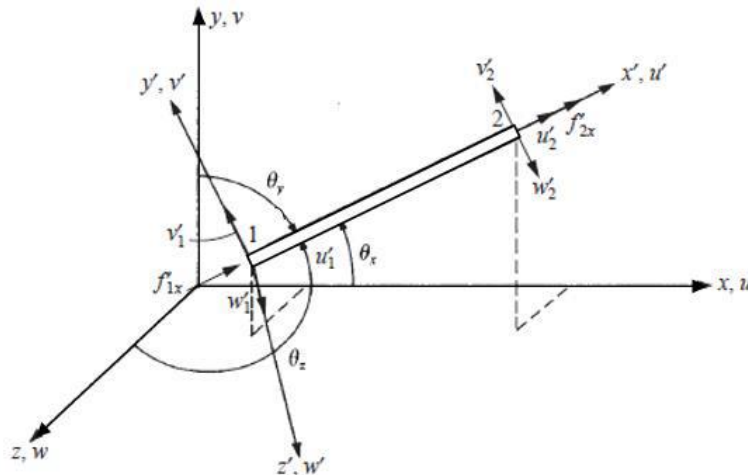
$\{\ddot{x}\}$ = Vetor de aceleração

3.2. MATRIZ DE RIGIDEZ DO ELEMENTO DE TRELIÇA

As estruturas podem ser descritas por elementos do tipo barra, mola ou amortecedor e podem apresentar modelagem como mostra a figura 15. A ilustração apresenta um elemento em um sistema de referência tridimensional, composto por um ponto nodal em cada extremidade, com três graus de liberdade (GDL) por nó, relacionados ao movimento de translação no eixo x , y e z . As variáveis mostradas são listadas como: (x', y', z') e (u', v', w') , sistema de referência local; (x, y, z) e (u, v, w) , sistema de referência global; (x_1', y_1', z_1') , coordenadas do nó 1; (x_2', y_2', z_2') , coordenadas do nó 2; f_1 , força aplicada ao longo da direção do elemento no nó 1; f_2 , força aplicada ao longo da direção do elemento no nó 2; $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$, cossenos diretores relacionados a x , y e z , respectivamente. A descrição construtiva da

estrutura por pontos nodais simplifica os cálculos geométricos para cada elemento, visto que um elemento é formado a partir da informação das coordenadas nodais e quais nós são associados nas extremidades. Isto também possibilita futuro desenvolvimento do código para resolução de sistemas de n-elementos.

Figura 15 – Modelo de elemento tipo barra tridimensional – 3 DOF por nó



Fonte: Logan, 2012

Equações de 2 a 5 apresentam os cálculos para comprimento (L) e dos cossenos diretores (C_x, C_y, C_z). Os coeficientes de índice (i, j) fazem referência a cada nó, sendo o elemento k derivado da associação dos nós i e j .

$$L_k = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (2)$$

Onde

L_k = Comprimento elemento k

x_j, y_j, z_j = coordenadas do nó (2) vinculado

x_i, y_i, z_i = coordenadas do nó (1) vinculado

Os cossenos diretores são definidos pelas equações 3, 4 e 5 (Logan, 2012).

$$C_{x,k} = \frac{x_j - x_i}{L_k} \quad (3)$$

$$C_{y,k} = \frac{y_j - y_i}{L_k} \quad (4)$$

$$C_{z,k} = \frac{z_j - z_i}{L_k} \quad (5)$$

Onde

$C_{x,k}$, $C_{y,k}$, $C_{z,k}$ = Cossenos diretores de cada elemento k em função do eixo x, y e z, respectivamente.

A matriz de rigidez pode ser definida pela equação 6, onde T é a matriz de rotação obtida a partir dos cossenos diretores, k' é a matriz de rigidez local e k é matriz rotacionada. A matriz de rigidez k se define ao multiplicar o coeficiente de rigidez, calculado com as propriedades geométricas e de material da barra, com a matriz composta pela relação entre os cossenos diretores, aplicada às n-barras resultando na parcela de contribuição de cada barra na matriz de rigidez global.

$$[k] = [T]^T [k'] [T] \quad (6)$$

Onde,

$[k]$ = Matriz rotacionada

$[k']$ = Matriz local

$[T]$ = Matriz de rotação

A matriz de cossenos diretores para o caso plano pode ser definida em 7 (Logan,2012)

$$[T] = \begin{bmatrix} C_x^2 & C_x C_y & C_x C_z \\ C_y C_z & C_y^2 & C_y C_z \\ C_z C_x & C_z C_y & C_z^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para o elemento barra em regime elástico, a matriz de rigidez pode ser expressa conforme forma apresentada em 8.

$$[k] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} [T] & -[T] \\ -[T] & [T] \end{bmatrix} \quad (8)$$

A forma matricial simplificada apresentada em 8 pode ser expandida na forma em 9 (Logan, 2012), onde K_{st} pode assumir diferentes valores de acordo com o tipo de elemento e solicitação utilizados, como mostra as equações de 10 a 12. Para o elemento mola trata-se de um caso particular do elemento barra e segue a mesma formulação, dependendo apenas de uma constante elástica k_e , como mostra a equação 12.

$$[K] = K_{st} \begin{bmatrix} C_x^2 & C_x C_y & C_x C_z & C_x^2 & C_x C_y & C_x C_z \\ & C_y^2 & C_y C_z & C_y C_z & C_y^2 & C_y C_z \\ & & C_z^2 & C_z C_x & C_z C_y & C_z^2 \\ & & & C_x^2 & C_x C_y & C_x C_z \\ & & & & C_y^2 & C_y C_z \\ & & & & & C_z^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$K_{st,barra_e} = \frac{EA}{L} \quad (10)$$

$$K_{st,barra_p} = \frac{E_t A}{L} \quad (11)$$

$$K_{st,mola} = k_e \quad (12)$$

Onde:

E =Módulo de Young

E_t =Módulo tangente

A =Área de seção transversal da barra

As equações 10 e 11 apresentam os coeficientes para elemento barra em regime elástico ($K_{st,barra_e}$) e elasto-plástico ($K_{st,barra_p}$) respectivamente, como pode ser visto em função dos termos do módulo de elasticidade. Elementos do tipo mola e barra são tratados como ideais, sem efeitos de amortecimento.

3.3. MATRIZES DE MASSA

Para a matriz de massa, a abordagem de massas concentradas (“*lumped-matrix*”) foi utilizada seguindo uma versão diagonalizada conforme exposto na forma matricial 13 (Logan, 2012). Esta aproximação inicial é válida quando tratamos de problemas de muitos graus de liberdade, e as contribuições de massa para cada elemento são atribuídas aos respectivos pontos nodais.

$$m' = M_{lumped} = m \begin{bmatrix} 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & 1 & 0 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & 0 & 0 & 0 & 1 & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Para elementos do tipo barra, é definido o parâmetro de massa m , em evidência na equação 13. Este parâmetro representa a massa nodal e é definido pela equação 14, resultando na matriz local de massa concentrada (m').

$$m = m_{barra} = \frac{\rho AL}{2} \quad (14)$$

Onde,

ρ =densidade

A matriz de massas concentradas rotacionada para o sistema de referência global pode ser obtida pela equação 15.

$$[M] = [T]^T [m'] [T] \quad (15)$$

Onde,

$[M]$ = Matriz global de massas concentradas

$[m']$ = Matriz local de massas concentradas

3.4. MATRIZES DE AMORTECIMENTO

As matrizes de amortecimento de elementos que apresentam apenas amortecimento viscoso podem ser descritas conforme as equações 16 e 17 (Naeim; Anderson, 2012). No atual conjunto de rotinas o cálculo de amortecimento estrutural, também denominado como amortecimento de Rayleigh expresso na equação 18 (Logan, 2012), não é utilizado. A combinação das matrizes de massa e rigidez via método da integração direta, em função das frequências naturais da estrutura representadas pelos fatores proporcionais arbitrários α e β , não é realizada nas simulações.

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\{F\} = [c]\{\dot{v}\} \quad (17)$$

Onde,

$\{\dot{v}\}$ = Vetor de velocidades

$[c]$ = Matriz de amortecimento viscoso

$\{F\}$ = Vetor de forças

$$[c] = \alpha_R[M] + \beta_R[K] \quad (18)$$

O efeito de amortecimento na estrutura é simplificado pela implementação de elementos amortecedores puros e ideais com a mesma vinculação do elemento barra associado. A implementação nas rotinas tem a intenção de permitir a possibilidade de avaliar o uso de elementos que admitem a função de amortecedores, como sapatas de borracha, nos apoios da estrutura. As simulações realizadas, apresentadas no tópico 5.3, compreendem estruturas treliçadas com apoios fixos na base e resposta no campo de vibrações livres e não amortecidas, sendo negligenciado o efeito de amortecimento oriundo das barras. O tópico 5.4 inclui a presença de amortecimento atribuindo um novo elemento do tipo amortecedor, puro e ideal, com a mesma vinculação do elemento 34.

3.5. VETOR-MATRIZ DE FORÇAS

Para o caso de carregamento estático, invariante no tempo temos um vetor de forças F associado ao número de graus de liberdade da estrutura. Para o caso de carregamento dinâmico, F assume a forma de uma matriz sendo o número de colunas equivalente à quantidade de incrementos temporais utilizados na simulação. As forças podem admitir perfis distintos de acordo com seu respectivo equacionamento. Nota-se que para o caso em que se avalia para a não-linearidade estática, F assume o formato de uma matriz, contendo os incrementos de carga associados aos graus de liberdade dos nós da estrutura. Com isso o procedimento de avaliação para não-linearidade estática pode ser tratado como um subsistema da análise dinâmica, sem as variáveis associadas com o tempo. (Naeim; Anderson, 2012)

3.6. SOLUÇÃO EM REGIME ESTÁTICO

Para o caso estático, a solução direta pode ser obtida através da equação 1, que pode ser reduzida na forma exposta na equação 19, visto que não há variáveis dependentes do tempo e, portanto, as contribuições relacionadas a velocidade e aceleração são nulas. Resolvendo o sistema de equações, obtém-se os valores dos deslocamentos do vetor d , que assume a forma expressa em 20, sendo i e j os coeficientes dos nós associados ao elemento k .

$$[K]\{d\} = \{F\} \quad (19)$$

$$\{d\} = [x_i y_i z_i x_j y_j z_j]' \quad (20)$$

As tensões resultantes em cada elemento são calculadas de acordo com o tipo de comportamento, elástico ou elasto-plástico. Para a análise apenas considerando a resposta em regime elástico, a tensão axial pode ser expressa pela equação 21, que pode ser reescrita como apresentado na equação 22.

$$\sigma_k = E_k \varepsilon = E_k \left[\frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} \right] \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} \quad (21)$$

$$\sigma_k = \frac{E_k}{L_k} [-C_{x,k} - C_{y,k} - C_{z,k} C_{x,k} C_{y,k} C_{z,k}] \{d\} \quad (22)$$

Onde:

$\{d\}$ = Vetor de deslocamentos

E_k = Módulo de elasticidade do elemento

σ_k = Tensão no elemento

ε = Deformação no elemento

$\{u_i, u_j\}'$ = Vetor de deslocamentos em GDL associados ao nó

3.7. SOLUÇÃO EM REGIME DINÂMICO

A solução da equação de equilíbrio dinâmica (Equação 1) é baseada no método de Newmark, implícito e de segunda ordem, como apresentado por Naeim e Anderson (2012) e nas Equações de 27 a 40. Consiste na integração numérica da equação 1 utilizando constantes definidas β e γ . Enquanto β influencia nas acelerações (\ddot{v}) com relação ao domínio dos deslocamentos, γ afeta as acelerações com respeito ao domínio de velocidades. Essas constantes são implementadas em expressões que estabelecem uma relação entre as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, sendo capazes de descrever a resposta da estrutura no domínio do tempo. Os valores para β e γ são definidos considerando o método da aceleração média constante, assumindo $\gamma = 0.5$ e $\beta = 0.25$ para que o sistema seja incondicionalmente estável, independente do incremento de tempo adotado. As equações 27 e 28 regem o método, correspondendo a velocidade (\dot{v}) e deslocamento (v), respectivamente.

$$\dot{v}(t + \Delta_t) = \dot{v}(t) + (1 - \gamma) \ddot{v}(t) \Delta_t + \gamma \ddot{v}(t + \Delta_t) \Delta_t \quad (27)$$

$$v(t + \Delta_t) = v(t) + \dot{v}(t) \Delta_t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \ddot{v}(t) \Delta_t^2 + \beta \ddot{v}(t + \Delta_t) \Delta_t^2 \quad (28)$$

Para o instante inicial $t = 0s$, a aceleração é obtida através da relação expressa pela equação 29. Nota-se que se a simulação partir do repouso, as condições iniciais de contorno $\dot{v}(0)$ e $v(0)$ são nulas, resumindo-se na expressão 30.

$$\ddot{v} = \frac{F(0) - C\dot{v}(0) - Kv(0)}{M} \quad (29)$$

$$\dot{v} = \frac{F(0)}{M} \quad (30)$$

Após, procede-se com o cálculo dos demais termos em função do incremento de tempo adotado. A matriz de rigidez efetiva, \bar{K} , exposta na equação 31 e as variáveis auxiliares de suporte, A_{AUX} e B_{AUX} , apresentadas nas equações 32 e 33.

$$\bar{K} = K + \frac{\gamma}{\beta\Delta t} C + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M \quad (31)$$

$$A_{AUX} = \frac{1}{\beta\Delta t} M + \frac{\gamma}{\beta} C \quad (32)$$

$$B_{AUX} = \frac{1}{2\beta} M + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) C \quad (33)$$

A partir disto, para cada incremento de tempo, as equações de 34 a 40 devem ser calculadas. As equações de 31 a 33 são utilizadas para o cálculo do incremento de força, $\Delta\bar{F}_i$, apresentado na equação 34. A partir do incremento de força e da matriz de rigidez efetiva obtém-se o termo aditivo relativo ao deslocamento, Δv_i , como mostra a equação 35. $\Delta\dot{v}_i$ e $\Delta\ddot{v}_i$ correspondem aos incrementos aditivos relativos à velocidade e à aceleração, apresentados nas equações 36 e 37, respectivamente.

$$\Delta\bar{F}_i = \Delta F_i + A_{AUX}\dot{v}_i + B_{AUX}\ddot{v}_i \quad (34)$$

$$\Delta v_i = \frac{\Delta\bar{F}_i}{\bar{K}} \quad (35)$$

$$\Delta\dot{v}_i = \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \Delta v_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{v}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{v}_i \quad (36)$$

$$\Delta\ddot{v}_i = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \Delta v_i - \frac{1}{\beta\Delta t} \dot{v}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{v}_i \quad (37)$$

As equações 38 a 40 correspondem ao cálculo do valor das variáveis correspondentes ao próximo instante de tempo ($i + 1$), sendo elas v_{i+1} , \dot{v}_{i+1} e \ddot{v}_{i+1} , que indicam deslocamento, velocidade e aceleração, obtidos a partir do valor da variável no instante i e do respectivo incremento. As variáveis v_{i+1} , \dot{v}_{i+1} e \ddot{v}_{i+1} correspondem às variáveis para o instante subsequente de tempo representando deslocamento, velocidade e aceleração, respectivamente.

$$v_{i+1} = v_i + \Delta v_i \quad (38)$$

$$\dot{v}_{i+1} = \dot{v}_i + \Delta \dot{v}_i \quad (39)$$

$$\ddot{v}_{i+1} = \ddot{v}_i + \Delta \ddot{v}_i \quad (40)$$

Com o intuito de evitar a utilização de incrementos temporais próximos aos períodos das respectivas frequências naturais da estrutura e desconsiderando os termos referentes ao amortecimento, a equação 41 é utilizada.

$$[K] - \omega^2[M] = 0 \quad (41)$$

Onde,

ω = Frequência natural do sistema

Considerando ω^2 como uma constante e a matriz de massas $[M]$ diagonalizada, as frequências naturais podem ser encontradas a partir dos autovalores para a resolução da igualdade apresentada em 42, reescrita em função dos autovetores $\{z\}$. Assim, basta prosseguir com o cálculo dos autovalores para a matriz $[V]$ expressa em 43, a partir da resolução do sistema de equações obtidos pela expressão 44, com $[I]$ representando a matriz identidade. Os autovalores são associados às frequências naturais que podem ser obtidas pela equação 45. O período pode ser relacionado com a frequência natural conforme expresso na equação 46.

$$[K]\{z\} = \omega^2[M]\{z\} \quad (42)$$

$$[V] = [M]^{-\frac{1}{2}}[K][M]^{-\frac{1}{2}} \quad (43)$$

$$\lambda_i = \det([V] - \lambda[I]) \quad (44)$$

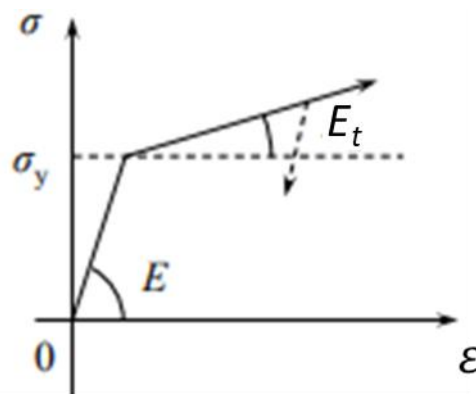
$$\omega_i = \sqrt{\lambda_i} \quad (45)$$

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (46)$$

3.8. MODELO ELASTO-PLÁSTICO

Independentemente de o problema ser estático ou dinâmico, a introdução do efeito de corrosão através da redução da área das seções transversais de elementos estruturais pode levar a situações que envolvem uma não-linearidade de natureza física o que requer a introdução de algum tipo de modelo que considere o comportamento elasto-plástico. Para a simulação em regime elasto-plástico, um modelo constitutivo bilinear com endurecimento linear é considerado para tratar a porção plástica, como proposto por Wierzbicki (2013) e Kim (2015). A representação é mostrada na figura 16, onde após o escoamento (σ_y) o material apresenta comportamento seguindo uma constante proporcional ao módulo de Young, usualmente $0,2E$ como recomendado por Kim (2015). Uma deformação associada na região de escoamento, quando $\sigma = \sigma_y$, corresponde a $\varepsilon_{yielding}(\varepsilon_y)$.

Figura 16 – Curva tensão x deformação para material elasto-plástico com endurecimento bilinear



Fonte: Wierzbicki, 2013 (Modificada pelo autor)

O termo H , módulo de endurecimento linear, é apresentado na equação 23, estabelecendo uma relação entre o módulo de elasticidade (E) e tangente (E_t). Nota-se que a alteração do valor da razão de E_t/E , impacta na alteração do módulo H .

$$H = \frac{EE_t}{E-E_t} \quad (23)$$

As equações 21 a 23 apresentam a modelagem proposta por Kim (2015) com respeito a plasticidade através do endurecimento linear. Quando o elemento apresenta resposta em regime plástico, o material se comporta como expresso na equação 24, com o efeito sendo composto por duas partes, uma com deformação elástica e outra com deformação plástica. Um valor inicial para $\varepsilon_{plastic}$ é encontrado via equação 25, onde ε_{total} é conhecido através dos deslocamentos nodais previamente calculados. A aproximação inicial é checada através da expressão para o critério de convergência (δ), apresentado na equação 26 com referência de $\delta < 2.10^{-6}$. O processo iterativo segue até que a condição seja satisfeita. A aproximação inicial torna o número de iterações menor, mesmo utilizando uma abordagem lagrangiana total. A figura 17 ilustra como o procedimento é conduzido.

$$\sigma_k = E\varepsilon_{elastic} + H\varepsilon_{plastic} \quad (24)$$

$$\varepsilon_{plastic} = \frac{\varepsilon_{total}}{1 + \frac{H}{E}} \quad (25)$$

$$\Delta\sigma = |\sigma_k^{n+1} - \sigma_k^n| < \delta \quad (26)$$

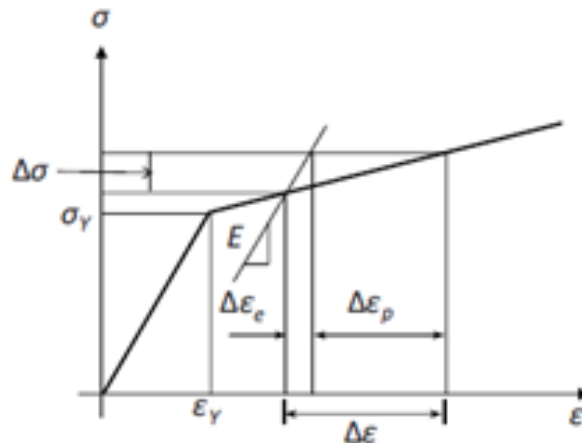
Onde:

$\varepsilon_{elastic} (\varepsilon_e)$ = deformação elástica

$\varepsilon_{plastic} (\varepsilon_p)$ = deformação plástica

E, H = Módulo de elasticidade e de endurecimento do material, respectivamente

Figura 17 – Curva de tensão x deformação – Deformações elástica e plástica combinadas



Fonte: Kim, 2015

3.9. CONSIDERAÇÃO DE FLAMBAGEM

É necessário verificar também a questão da esbeltez dos elementos das estruturas que serão estudadas, para isso utilizamos as expressões da norma NBR 8800:2008 mostradas abaixo. A verificação dos elementos estruturais comprimidos poderá então ser feita aplicando o fator de redução calculado (κ). As equações 47 e 48 compõem o coeficiente de esbeltez limite (λ_0), servindo para identificar o regime de flambagem que ocorre no elemento, sendo elástico ou inelástico. Para valores de $\lambda_0 > 1,5$ ocorre flambagem elástica, com fator de redução expresso pela equação 49, sendo válida a representação pela hipérbole de Euler. Para valores de $\lambda_0 \leq 1,5$ ocorre flambagem inelástica, com fator de redução expresso pela equação 50. Para o comprimento equivalente de flambagem considera-se uma abordagem conservadora, tratando a haste como birrotulada com comprimento equivalente igual ao da barra ($k = 1$) e considerando seções sem a presença de flambagem localizada ($Q = 1$).

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2} \quad (47)$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA\sigma_y}{N_e}} \quad (48)$$

$$\kappa = \frac{0,877}{\lambda_0^2}, \quad \lambda_0 > 1,5 \quad (49)$$

$$\kappa = 0,658\lambda_0^2, \lambda_0 \leq 1,5 \quad (50)$$

A análise da resistência à compressão dos elementos estruturais em função do índice de esbeltez é feita utilizando a curva de flambagem, sendo possível identificar regiões de comportamento distinto. Elementos mais esbeltos, quando comprimidos admitirão flambagem em regime elástico, com valores de tensão crítica (σ_{cr}) bem menores que a tensão de escoamento (σ_y), e elementos medianamente esbeltos ou curtos, quando comprimidos, admitirão flambagem inelástica com tensão crítica que poderá ser mais próxima à tensão de escoamento. Para o caso de estudo apresentado no tópico 5.3 são obtidos coeficientes $\lambda_{0_mín} = 0,9$ e $\lambda_{0_máx} = 3,0$, correspondendo a fatores de redução equivalentes a $\kappa_{mín} = 0,71$ e $\kappa_{máx} = 0,09$.

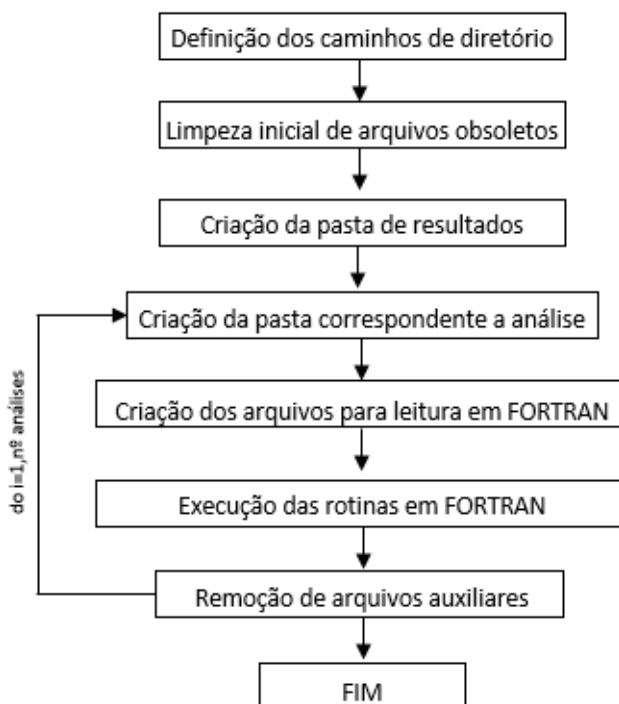
4. METODOLOGIA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Nesta seção é apresentado simplificada a lógica e organização das rotinas que compõem os módulos para análise das estruturas. Foram desenvolvidas uma rotina em Shell (Ubuntu 16.04 LTS), tipo de linguagem de programação que permite a edição de arquivos e gerenciamento dos diretórios, e o conjunto de rotinas em FORTRAN (GNU Fortran – G77 | Ubuntu), destinadas a efetuar os cálculos matemáticos e as demais operações numéricas que são executadas em segundo plano a partir da rotina em Shell. Para permitir futuras atualizações e implementações de novos métodos, as rotinas permitem: realizar análises com n-graus de liberdade com elementos do tipo barra, mola e amortecedor; a aplicação de massas pontuais e módulos separados para simulação estática e dinâmica.

4.1. ROTINA DE PREPARAÇÃO DE ARQUIVOS E GERENCIAMENTO DOS DIRETÓRIOS.

Para facilitar o gerenciamento de arquivos, o programa em Shell é estruturado na forma de diretórios. O diretório de *entrada* contém os arquivos para determinação dos caminhos dos demais diretórios para facilitar a portabilidade. O diretório de *análise* contém os arquivos de configuração de cada estrutura com os respectivos parâmetros de entrada necessários. O diretório de *códigos* contém os arquivos executáveis e rotinas em FORTRAN para realizar os procedimentos numéricos. O diretório *libs* armazena o arquivo de entrada das análises a serem efetuadas. Esta organização mantém salvos os demais arquivos e permite simular apenas as estruturas listadas no arquivo desta pasta e seus correspondentes diretórios de resultados. A cada análise corresponde um diretório gerado onde os arquivos e dados relevantes são armazenados. O tipo de carregamento adotado, se estático ou dinâmico, define o pacote de rotinas a utilizar. O fluxograma correspondente é apresentado na figura 18.

Figura 18 - Fluxograma de gerenciamento de arquivos para rotina executável .sh



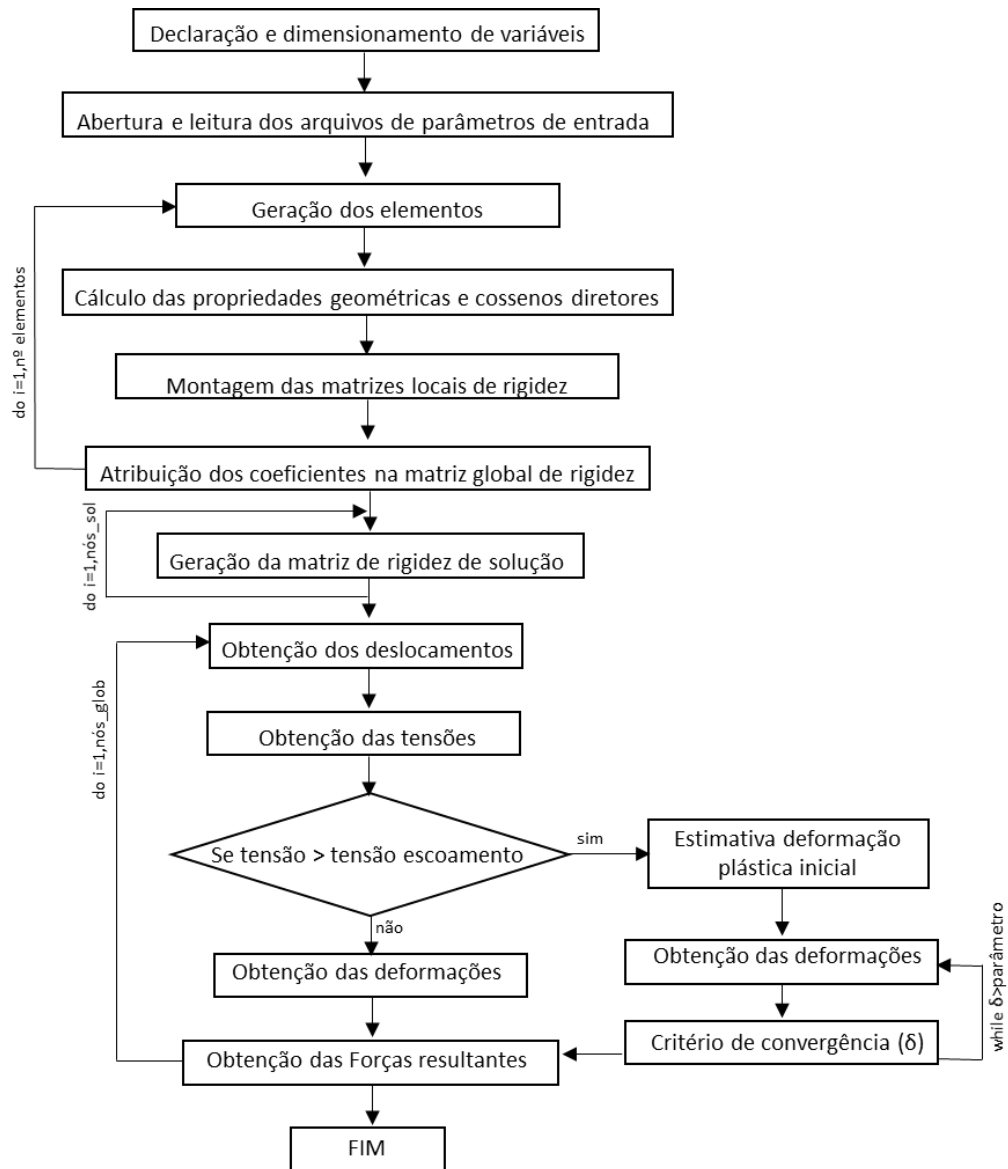
Fonte: Próprio autor

4.2. FLUXOGRAMA PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA ESTÁTICO

Este conjunto de rotinas foi desenvolvido para a simulação de aplicação de carga estática. Para este caso, informações pertinentes à estrutura devem ser atribuídas, sendo estas: atribuição das coordenadas dos nós; atribuição dos vínculos; propriedades das barras (Módulo de Young, diâmetro); condições de contorno da estrutura (restrição dos graus de liberdade, forças aplicadas). A execução desta rotina fornece os dados referentes aos deslocamentos dos nós da estrutura, tensões nos respectivos elementos e forças resultantes nos pontos nodais. Uma verificação condicional é realizada para identificar o regime de resposta do sistema, elástico ou plástico. O fluxograma é apresentado na figura 19.

O funcionamento das rotinas foi verificado através de simulações com estruturas de resultados conhecido. Estas simulações serão discutidas na próxima seção. Embora as simulações com carregamento estático permitam aplicações diversas, o comportamento dinâmico é o foco deste trabalho. Baseado no código desenvolvido para a solução estática, alterações foram realizadas para implementar o carregamento dinâmico.

Figura 19 – Fluxograma para implementação do algoritmo – Análise estática não-linear



Fonte: Próprio autor

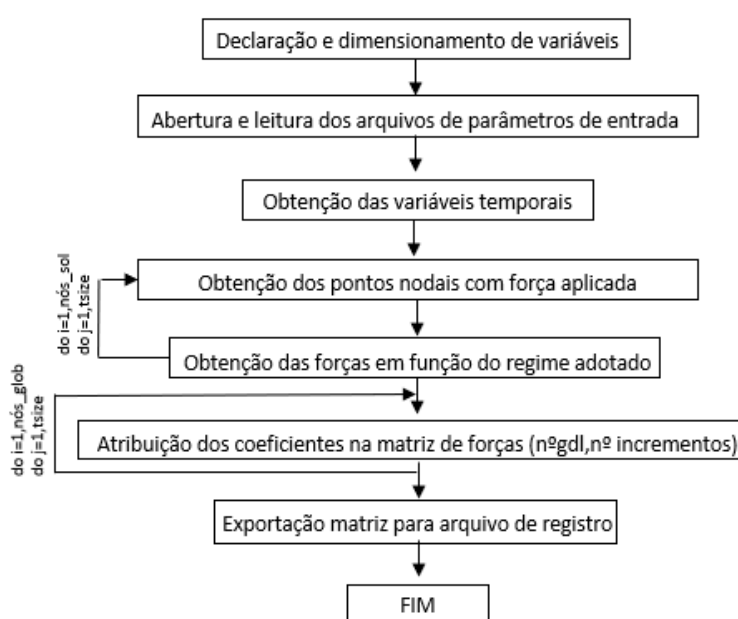
4.3. FLUXOGRAMA PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DINÂMICO

Para descrever o comportamento dinâmico de estruturas, de acordo com a equação 1, foram incluídas variáveis relacionadas às velocidades e acelerações e as respectivas matrizes de amortecimento e massa com os parâmetros a elas relacionadas, além das informações já definidas para o carregamento estático. Para os elementos do tipo barra foram consideradas as densidades correspondentes aos materiais empregados, valendo-se do princípio de massas acumuladas para a avaliação dos efeitos de massa correspondente aos elementos. Neste caso, as matrizes de amortecimento são nulas.

4.4.1 Geração da equação para evolução das forças

Uma rotina adicional para geração da equação da evolução das forças atuantes com o tempo foi desenvolvida, permitindo a implementação de novas equações de regime de carregamento. O fluxograma representado na figura 20 expõe como esta rotina opera, sendo definidas as forças atuantes para cada nó da estrutura a cada incremento de tempo.

Figura 20 – Fluxograma da rotina de geração da equação para evolução das forças no tempo

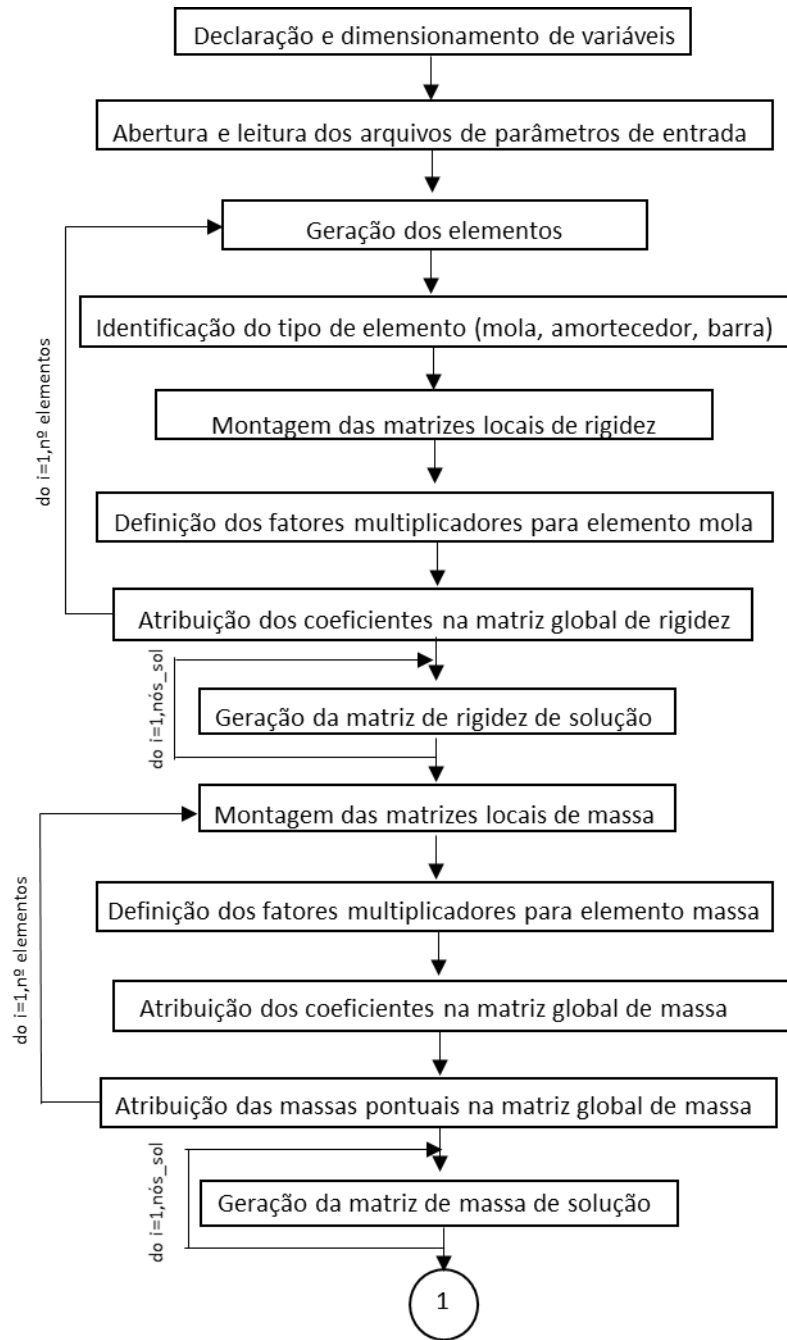


Fonte: Próprio autor

4.4.2 Descrição do comportamento dinâmico

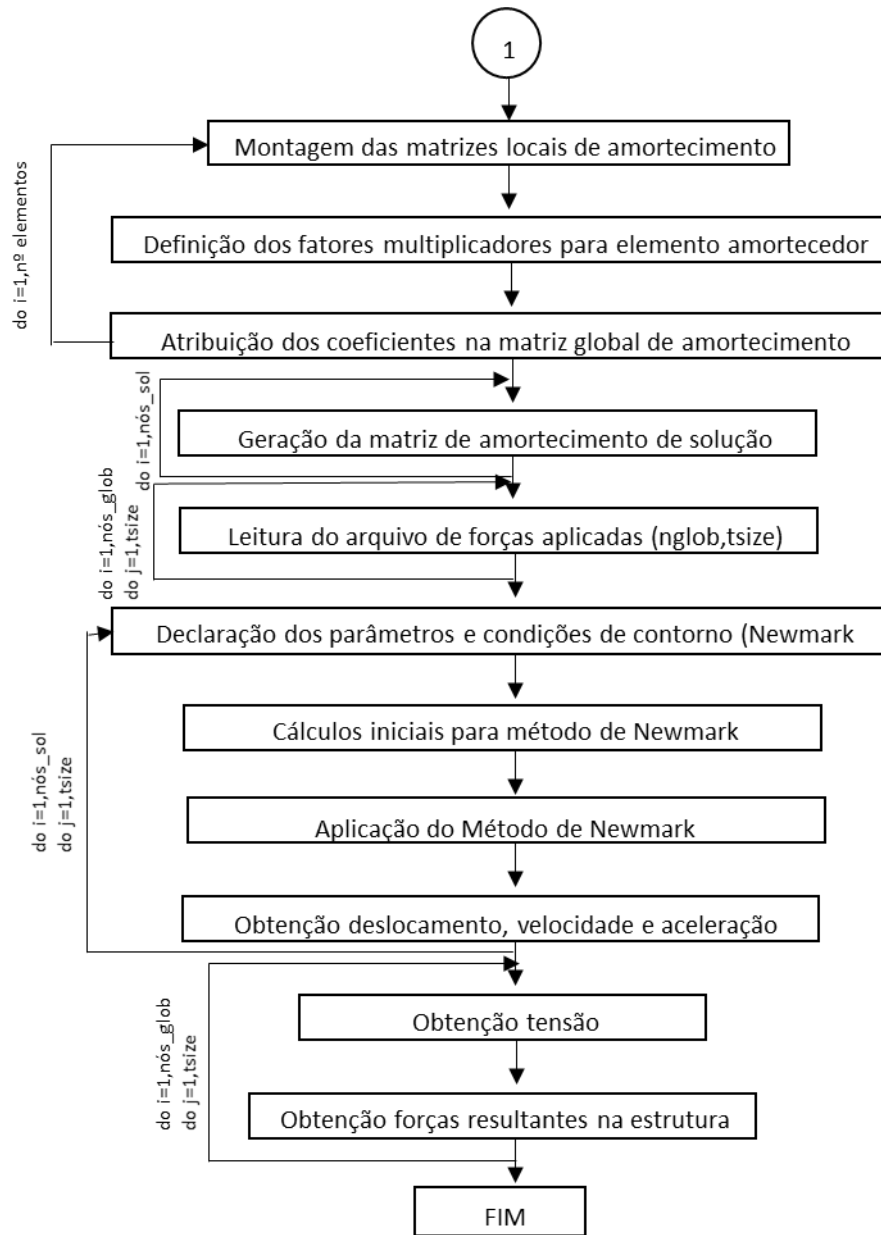
A partir da obtenção das forças aplicadas na estrutura, é possível prosseguir com a rotina de análise de comportamento dinâmico, sendo a estrutura modular da rotina representada de forma simplificada nas figuras 21 e 22. O fluxograma representado na figura 23 expõe de forma mais detalhada a lógica envolvida na execução das operações numéricas pela ordem: definições geométricas; definições das matrizes locais e global de rigidez, de massa e de amortecimento em seus respectivos laços; a integração no tempo pelo método de Newmark com os respectivos cálculos de posição, velocidade e aceleração e finalizando com os cálculos de tensão e forças resultantes.

Figura 21 – Fluxograma da rotina em função do carregamento dinâmico (parte A)



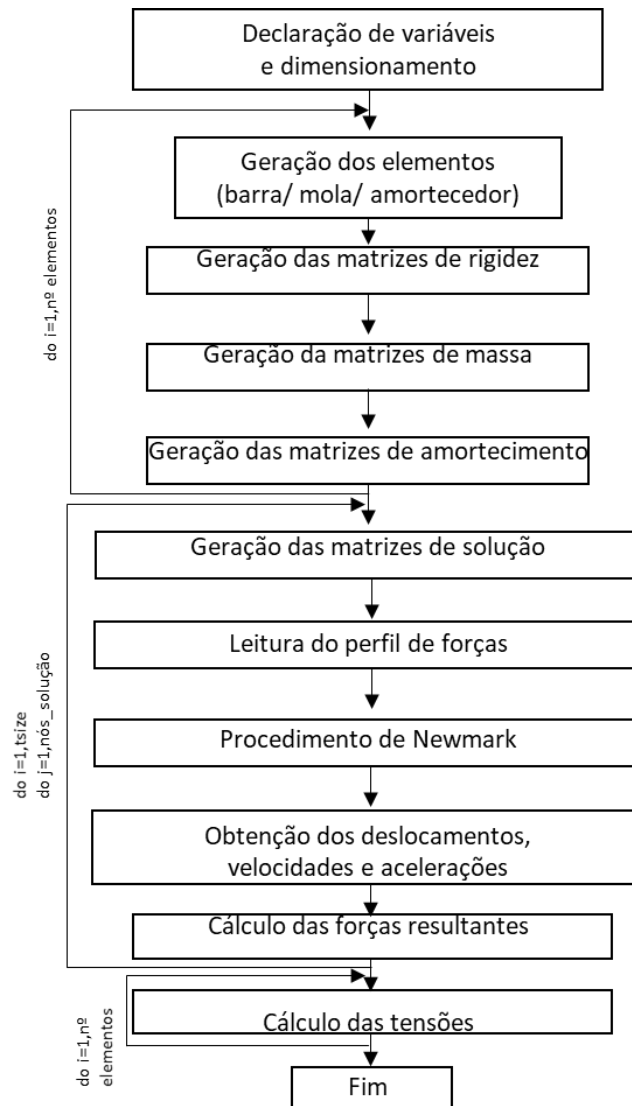
Fonte: Próprio autor

Figura 22 – Fluxograma da rotina em função do carregamento dinâmico (parte B)



Fonte: Próprio autor

Figura 23 – Fluxograma para aplicação do método de Newmark



Fonte: Próprio autor

4.4.3 Definição das matrizes locais e globais

Na montagem da matriz de rigidez, para cada elemento, a matriz local é rotacionada e atribuída sua parcela de contribuição à matriz global. A implementação no algoritmo foi efetuada de modo a permitir a descrição de elementos distintos na composição da matriz de rigidez global da estrutura. O elemento do tipo amortecedor não contribui para a construção da matriz de rigidez da estrutura, tratando-se de um amortecedor ideal.

Procedimento similar à construção das matrizes locais e global de rigidez foi utilizado para construção das matrizes locais e global de massa. Foi implantada possibilitando considerar a aplicação de massas pontuais atribuídas aos nós. A

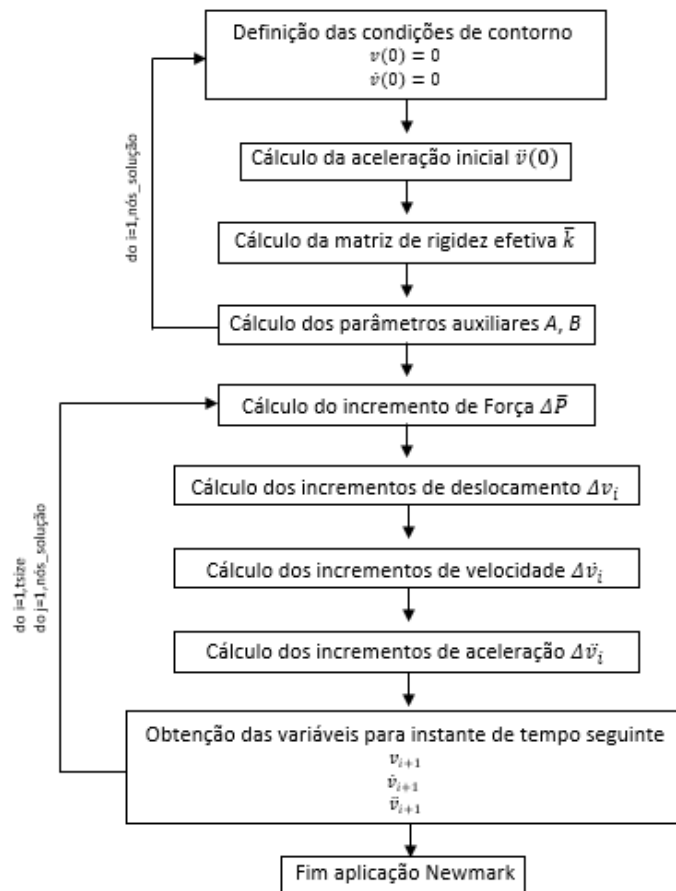
matriz local de massa é definida para cada elemento, sendo que apenas os elementos do tipo barra contribuem para a matriz de massa, além das massas pontuais nodais. Os elementos do tipo mola ou amortecedor são tratados como ideais, sem massa.

Seguindo procedimento análogo às matrizes de rigidez, mas valendo-se dos parâmetros associados ao elemento do tipo amortecedor, é efetuada a montagem das matrizes de amortecimento locais e global da estrutura. Os elementos do tipo mola e tipo barra tratados como ideais, com coeficientes de amortecimento nulos.

4.4.4 Aplicação do método de Newmark

A solução é obtida para os graus de liberdade não restritos. Para aplicação do método de Newmark, os cálculos iniciais são necessários, bem como a definição dos parâmetros e condições de contorno da análise. Observa-se que os parâmetros γ e β podem admitir outros valores, em função do tipo de proposta de análise. No caso, valendo-se dos valores expostos, estamos utilizando o método de aceleração constante, incondicionalmente estável para qualquer valor de incremento de tempo. No entanto na forma declarada, o modelo pode ser facilmente ajustado para o método de aceleração linear durante o incremento de tempo, bastando alterar os valores de γ e β . O fluxograma apresentado na figura 24 apresenta a lógica envolvida na execução do método.

Figura 24 – Fluxograma detalhando lógica na aplicação do método de Newmark



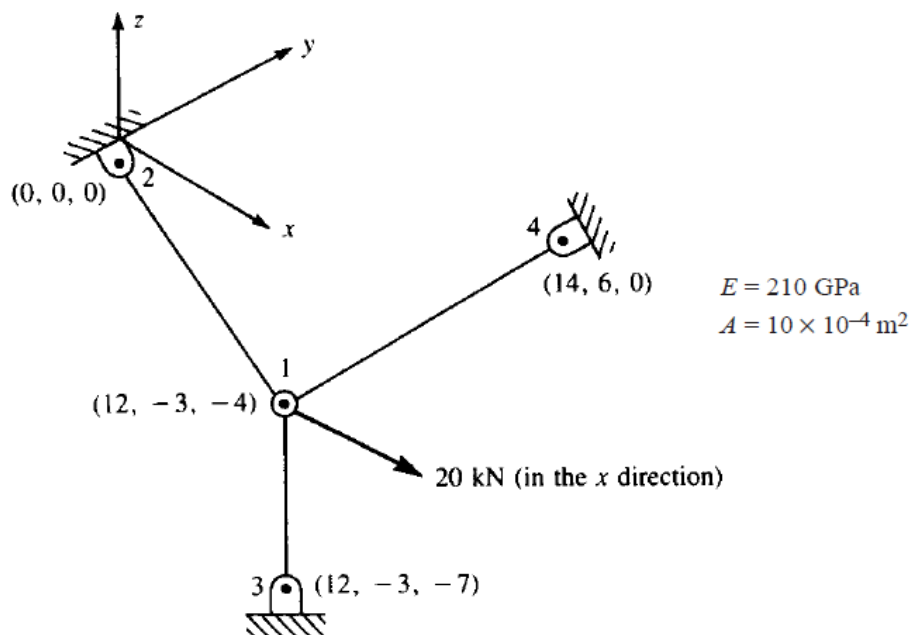
Fonte: Próprio autor

5. RESULTADOS ESPERADOS

5.1. EXERCÍCIO 3-41

Para validação das rotinas, estruturas com comportamento conhecido foram simuladas, comparando os resultados obtidos com os presentes na literatura. Na figura 25 é apresentada a estrutura do exercício 3-41 (Logan, 2012). Os elementos são tratados como barras, sendo os graus de liberdade associados aos nós 2, 3 e 4 restritos em movimento com relação aos eixos x , y e z , portanto com deslocamento nulo. As barras são todas do mesmo material com módulo de elasticidade (E) igual a 210GPa e área de seção transversal (A) igual a $10 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$. Uma força de magnitude de 20kN é aplicada ao longo da direção do eixo x .

Figura 25 – Estrutura exemplo 3.41



Fonte: Logan, 2012

A tabela 1 apresenta os resultados para os deslocamentos e tensões obtidos pela simulação das rotinas e contrastando com os valores da literatura. Observa-se valores próximos com diferenças percentuais máximas de 0,72% para os deslocamentos e 0,1% para as tensões, que podem ser explicadas pelo compilador

utilizado. O problema em questão considera apenas o comportamento linear do material, sob análise estática.

Tabela 1–Resultados dos deslocamentos e tensões – 3.41 – Rotinas x Literatura

	Deslocamentos [mm]			Tensões [MPa]			
	Rotinas	Logan	dif. [%]		Rotinas	Logan	dif. [%]
Nó 1 (x)	1,384	1,383	0,072%	Elemento 1-2	20,530	20,510	0,098%
Nó 1 (y)	-0,052	-0,051	0,723%	Elemento 1-3	4,210	4,210	0,000%
Nó 1 (z)	0,060	0,060	0,000%	Elemento 1-4	-5,289	-5,290	-0,019%

Fonte: Próprio autor

A tabela 2 apresenta os valores para as forças de reação obtidas em função dos deslocamentos determinados, sendo apresentadas para as direções x, y e z de cada nó da configuração apresentada na figura 10. Observa-se a força aplicada ao nó 1 na direção x (F_{1x}). Nota-se que a soma das forças calculadas apresenta uma diferença percentual de 0,25% do resultado ideal, onde a resultante é nula, demonstrando coerência nos resultados obtidos

Tabela 2–Resultados das forças de reação – 3.41 – Rotinas

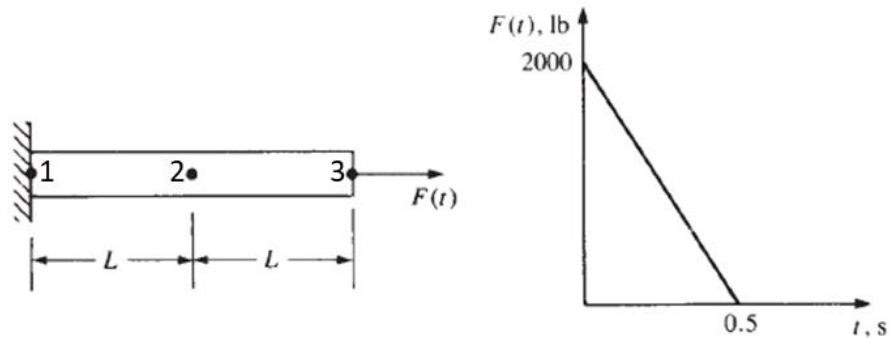
F_{1x}	F_{1y}	F_{1z}	F_{2x}	F_{2y}	F_{2z}	F_{3x}	F_{3y}	F_{3z}	F_{4x}	F_{4y}	F_{4z}
20,00	0,00	0,00	-18,90	4,74	6,32	0,00	0,00	-4,21	-1,05	-4,74	-2,11

Fonte: Próprio autor

5.2. EXERCÍCIO 16-8

Na figura 26 é apresentada a estrutura do exercício 16-8 (Logan, 2012). Os elementos são tratados como barras, sendo os graus de liberdade associados ao nó 1 restritos em movimento com relação aos eixos x, y e z, portanto com deslocamento nulo. As barras são todas do mesmo material com módulo de elasticidade (E) igual a 1.10^6 psi e área de seção transversal (A) igual a 1in^2 . Uma força linear decrescente ($F(t)$) variável com o tempo é aplicada ao longo da direção do eixo x no nó 3. O incremento de tempo (Δt) é de 0,05s e o tempo total decorrido é de 0,25s, o qual foi adotado visto a disponibilidade dos dados na literatura para comparação.

Figura 26 – Estrutura exemplo 16.8



Fonte: Logan, 2012

As tabelas 3, 4 e 5 apresentam os resultados para os deslocamentos, velocidades e acelerações obtidos pela simulação das rotinas e contrastando com os valores da literatura. Observa-se valores próximos com diferenças percentuais máximas inferiores a 0,75% para os deslocamentos, inferiores a 2,61% para as velocidades e menores que 4,11% para as acelerações. Isto pode ser explicado pelo compilador utilizado e pela tolerância escolhida, visto que são adotados os mesmos fatores β e γ para execução do método de Newmark pela rotina e na literatura. A tolerância na literatura não é especificada, enquanto nas rotinas valeu-se de uma constante de $2 \cdot 10^{-6}$ a cada iteração. Na rotina foram utilizados os parâmetros de acordo com o método da aceleração linear ($\beta = 1/6$ e $\gamma = 1/2$). O problema em questão considera apenas o comportamento linear do material, sob análise dinâmica.

Tabela 3–Resultados dos deslocamentos – 16.8 – Rotinas x Literatura

		Deslocamentos [in]					
		Nó 2 (x)			Nó 3 (x)		
t[s]	F[lb]	Rotinas	Logan	dif. [%]	Rotinas	Logan	dif. [%]
0	2000	0,000E+00	0,000E+00	0,00%	0,000E+00	0,000E+00	0,00%
0,05	1800	1,720E-03	1,720E-03	0,00%	4,470E-02	4,480E-02	-0,22%
0,1	1600	1,540E-02	1,544E-02	-0,26%	1,540E-01	1,536E-01	0,26%
0,15	1400	5,800E-02	5,790E-02	0,17%	2,750E-01	2,745E-01	0,18%
0,2	1200	1,360E-01	1,356E-01	0,29%	3,630E-01	3,616E-01	0,39%
0,25	1000	2,330E-01	2,323E-01	0,30%	4,040E-01	4,010E-01	0,75%

Fonte: Próprio autor

Tabela 4—Resultados das velocidades – 16.8 – Rotinas x Literatura

		Velocidades [in/s]					
		Nó 2 (x)			Nó 3 (x)		
t[s]	F[lb]	Rotinas	Logan	dif. [%]	Rotinas	Logan	dif. [%]
0	2000	0,000E+00	0,000E+00	0,00%	0,000E+00	0,000E+00	0,00%
0,05	1800	1,030E-01	1,030E-01	0,00%	1,680E+00	1,685E+00	-0,30%
0,1	1600	5,130E-01	5,130E-01	0,00%	2,480E+00	2,479E+00	0,04%
0,15	1400	1,220E+00	1,215E+00	0,41%	2,200E+00	2,187E+00	0,59%
0,2	1200	1,840E+00	1,836E+00	0,22%	1,280E+00	1,255E+00	1,99%
0,25	1000	1,920E+00	1,905E+00	0,79%	3,930E-01	3,830E-01	2,61%

Fonte: Próprio autor

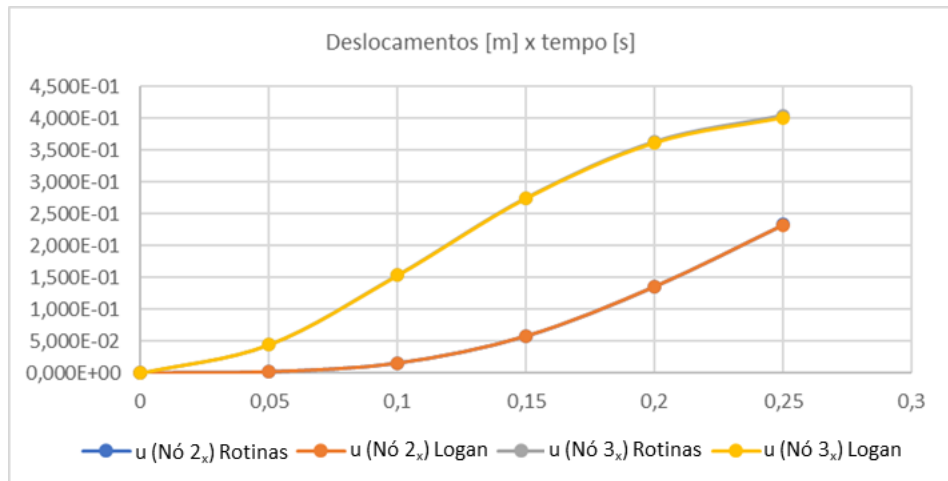
Tabela 5—Resultados das acelerações – 16.8 – Rotinas x Literatura

		Acelerações [in/s ²]					
		Nó 2 (x)			Nó 3 (x)		
t[s]	F[lb]	Rotinas	Logan	dif. [%]	Rotinas	Logan	dif. [%]
0	2000	0,000E+00	0,000E+00	0,00%	4,000E+01	4,000E+01	0,00%
0,05	1800	4,130E+00	4,131E+00	-0,02%	2,740E+01	2,739E+01	0,04%
0,1	1600	1,230E+01	1,227E+01	0,24%	4,360E+00	4,370E+00	-0,23%
0,15	1400	1,590E+01	1,580E+01	0,63%	-1,540E+01	-1,606E+01	-4,11%
0,2	1200	9,150E+00	9,042E+00	1,19%	-2,150E+01	-2,120E+01	1,42%
0,25	1000	-6,250E+00	-6,376E+00	-1,98%	-1,410E+01	-1,371E+01	2,84%

Fonte: Próprio autor

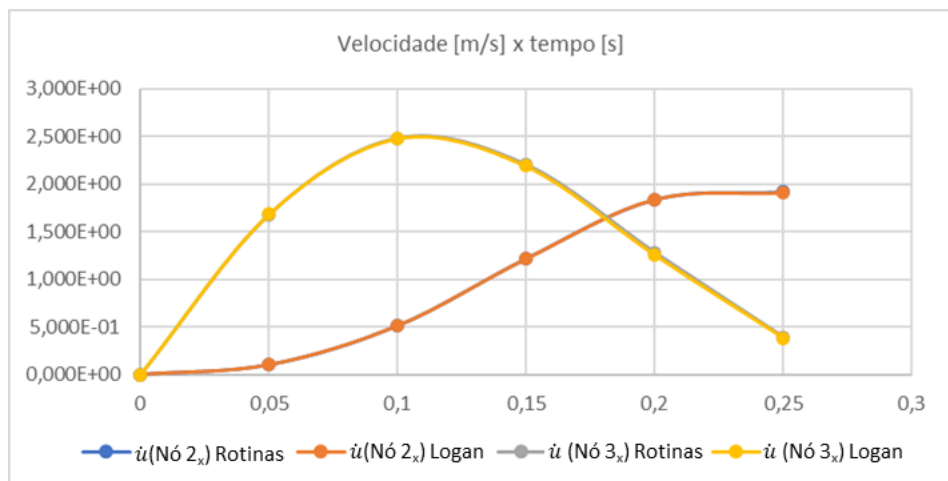
As figuras 27, 28 e 29 ilustram as curvas em função do tempo para deslocamentos, velocidades e acelerações, respectivamente, a partir dos dados exibidos nas tabelas 2, 3 e 4 para os GDL 4 (nó 2, direção x) e 7 (nó 3, direção x). Observa-se que as curvas plotadas pelas rotinas e as fornecidas pela literatura se sobrepõem por conta da proximidade dos resultados.

Figura 27 – Deslocamentos x tempo – GDLs 4 e 7 – Rotinas x literatura



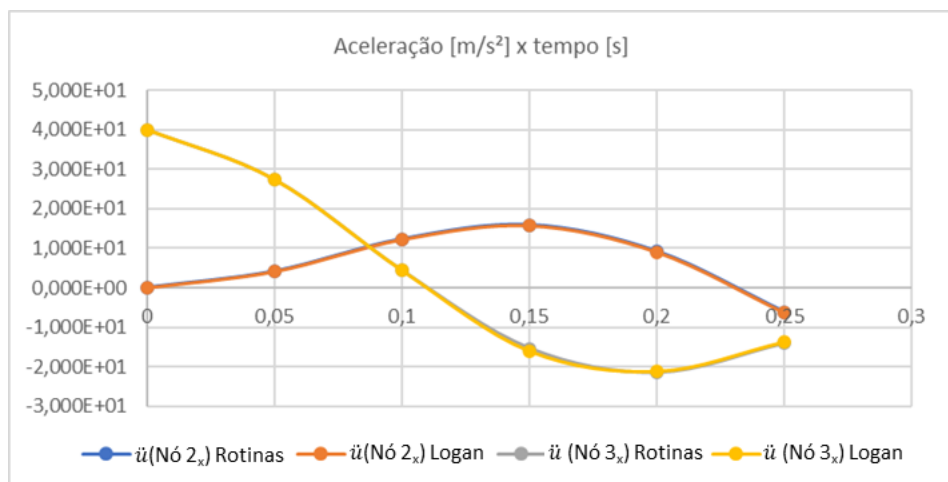
Fonte: Próprio autor

Figura 28 – Velocidades x tempo – GDLs 4 e 7 – Rotinas x literatura



Fonte: Próprio autor

Figura 29 – Acelerações x tempo – GDLs 4 e 7 – Rotinas x literatura

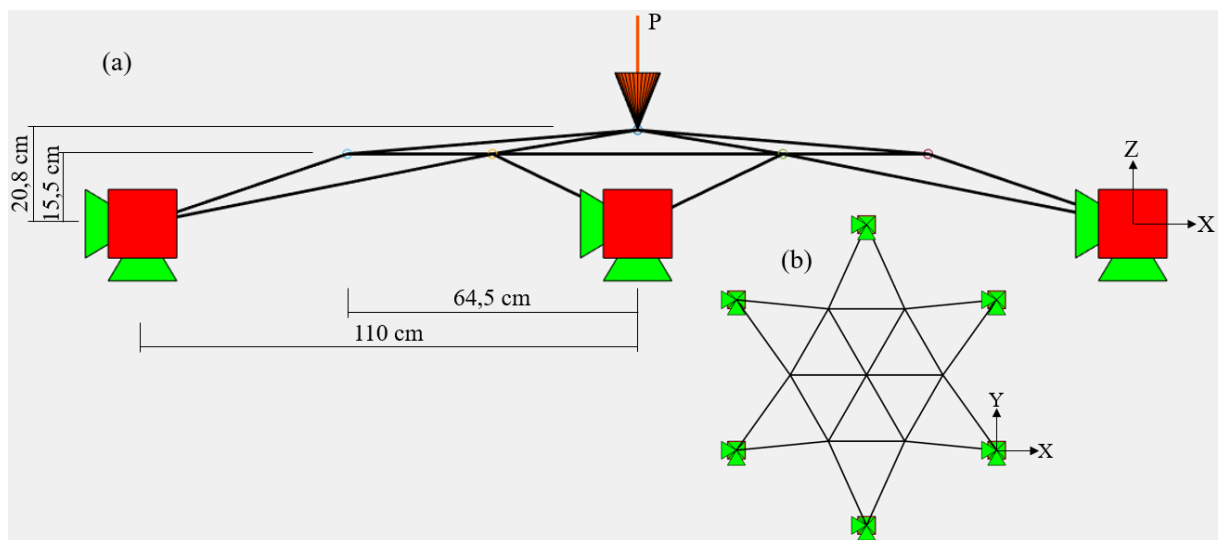


Fonte: Próprio autor

5.3. DOMO TRELIÇADO

Na figura 30 é apresentada a estrutura de um domo treliçado (Martinelli e Alves, 2018). É composta por 24 elementos que são tratados como barras, sendo os graus de liberdade associados aos nós com coordenadas $z = 0$ restritos em movimento com relação aos eixos x , y e z , portanto com deslocamento nulo. As barras são todas do mesmo material com módulo de elasticidade (E) igual a 68992MPa e área de seção transversal (A) igual a 0,000645m².

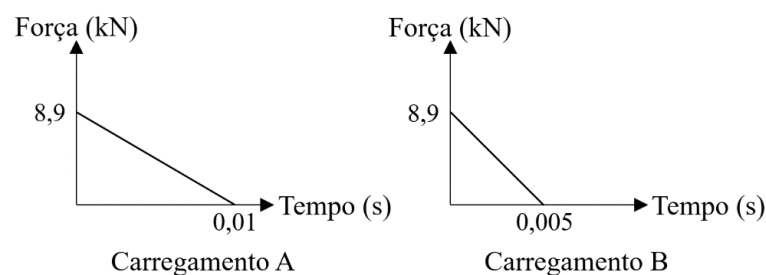
Figura 30 – Domo treliçado: a) vista lateral b) vista frontal



Fonte: Martinelli e Alves, 2018

A estrutura é submetida a dois carregamentos distintos, apresentados na figura 31. A força é linear e decrescente ($F(t)$), sendo variável com o tempo e aplicada ao longo da direção do eixo z no nó central, em sentido oposto (de cima para baixo). O incremento de tempo (Δt) é de 0,000156s e o tempo total decorrido é de 0,01s para o carregamento A, e de 0,005s para o carregamento B.

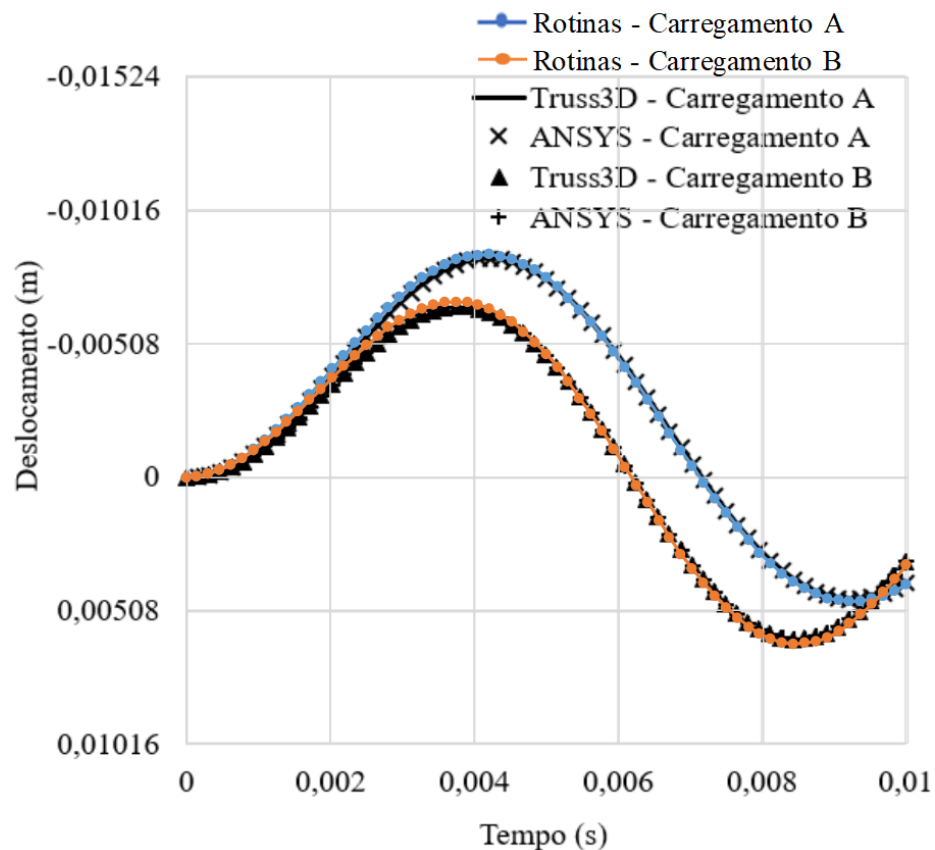
Figura 31 – Carregamentos aplicados no domo treliçado



Fonte: Martinelli e Alves, 2018

A figura 32 apresenta a resposta para o deslocamento do nó central do domo treliçado na direção do eixo z. As curvas são geradas a partir da análise linear, para os dois tipos de carregamento, e estabelecem uma comparação entre os resultados das simulações. São comparados os resultados obtidos pelos autores, via a utilização do Truss3D e ANSYS®, com aqueles produzidos pelo conjunto de rotinas desenvolvido neste trabalho. Observa-se que as curvas são coincidentes para ambos os carregamentos, sendo que para o carregamento B, embora o tempo de aplicado em carregamento seja de 0,005s, o intervalo total de simulação corresponde entre 0 a 0,01s.

Figura 32 – Deslocamento do nó central na direção z para os carregamentos A e B: análise linear



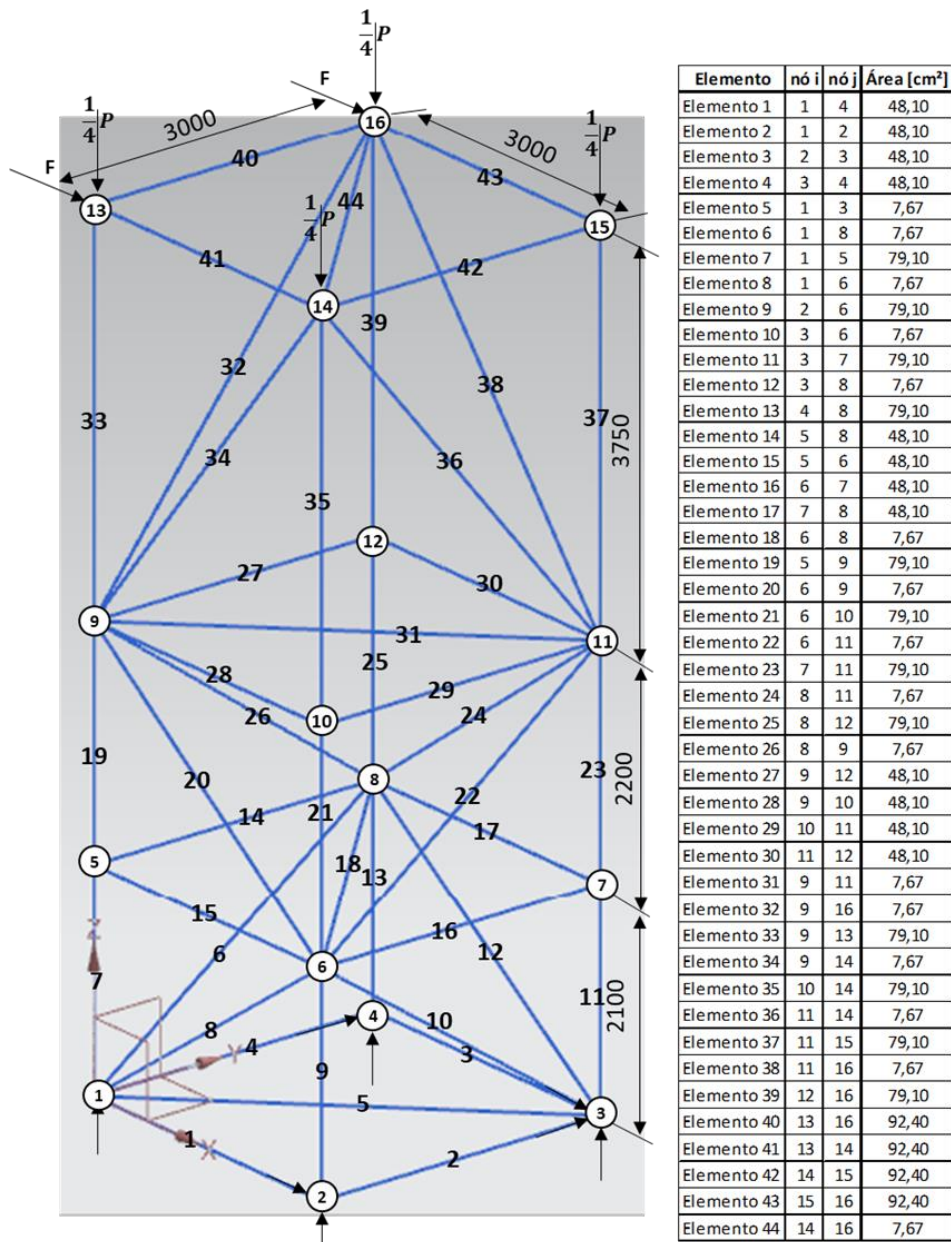
Fonte: Martinelli e Alves, 2018 (Modificada pelo autor)

A partir da coerência entre as simulações e os resultados apresentados na literatura, procedeu-se com a proposta da estrutura para representação do conjunto de torre de resfriamento, a ser apresentado na próxima seção.

5.4. APLICAÇÃO AO CASO DA TORRE DE RESFRIAMENTO

A torre de resfriamento considerada neste trabalho é normalmente construída em aço galvanizado S235 W (EN-10025-5) e formada por elementos estruturais considerados como barras de treliça. É utilizada no sistema de refrigeração de água de alimentação do condensador de um turbo-gerador. O modelo utilizado para simulação procura reproduzir a geometria e solicitações das estruturas desse tipo utilizadas na indústria sucroalcooleira. A figura 33 mostra a geometria, dimensões principais da estrutura e incidência das barras.

Figura 33 – Configuração geométrica e vinculações da estrutura – Caso de estudo



Fonte: Próprio autor

A tabela na Figura 33 fornece a incidência dos elementos pela associação de dois nós (i,j) e as áreas das seções transversais desses elementos. A estrutura pode ser fabricada toda com o mesmo tipo de aço, ou pode ser composta por uma combinação com mais de um tipo de aço. No caso das intervenções necessárias para estender a vida útil desse tipo de estrutura sob a ação da corrosão, elementos originalmente fabricados em aço galvanizado são substituídos por elementos feitos de aço inox.

A estrutura contém 16 nós, sendo que as condições de contorno que melhor correspondem ao comportamento dessas estruturas modulares e dispostas lado a lado são as restrições nodais aplicadas para os movimentos verticais na direção do eixo z dos nós 1, 2, 3 e 4, dos movimentos horizontais x e y do nó 3, na direção x para o nó 2 e finalmente na direção y para o nó 4. Os demais graus de liberdade são irrestritos.

É desejado verificar como a introdução de um aço mais resistente a corrosão, neste caso o aço Inox 304 (UNS S30400), afeta o comportamento global desse tipo de estrutura considerando a substituição de um ou mais elementos quando atacados pelo processo de corrosão.

5.4.1 Materiais utilizados na construção da torre de resfriamento

Diferentes tipos de materiais são utilizados nesse tipo de construção, por exemplo: aço carbono revestido com pintura epóxi; termoplásticos, na composição em fibras como PVDF; aço galvanizado e aço inox. Quanto ao manuseio, tanto o aço inox quanto o galvanizado demandam menor nível de qualificação de mão de obra e permitem redução no tempo gasto após a montagem do conjunto, visto que não demandam a aplicação de pintura como o aço carbono, nem tempo de cura como no caso dos elementos em fibra.

As estruturas metálicas com aplicação em torres de resfriamento são comumente construídas a partir dos materiais apresentados na tabela 6. Embora o aço inox apresente uma resistência à corrosão e desgaste abrasivo superior comparado ao estrutural S235 W, ambos são considerados sob mesmas condições de degradação nas simulações. Isto para verificar apenas o comportamento das ligas quanto às solicitações, avaliando as tensões, deformações nos elementos e as alterações geométricas da estrutura. O aço S235 W vale-se de uma camada de recobrimento em zinco por imersão a quente com espessura de 2,35oz/ft², o

equivalente a 305g/m², enquanto o aço inox é obtido a partir da inserção de um percentual de cromo na liga. Comercialmente, o aço inox 304 é cerca de três vezes o custo do aço estrutural S235 W. A comparação do comportamento da estrutura quanto a sua rigidez e a verificação da possível ocorrência de falhas em elementos é realizada para identificar os elementos mais afetados pelas solicitações e determinar posições para a utilização de materiais mais nobres.

Tabela 6 - Propriedades dos materiais para aço estrutural galvanizado S235 W e aço inox 304

	Densidade [kg/m ³]	Limite elástico [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Coefficiente de Poisson	Módulo de cisalhamento [GPa]	Módulo de Young [GPa]	Módulo de encruamento (0,2E) [GPa]
Aço estrutural com recobrimento em galvanizado S-235W (EN-10025-5)	7850,0	215,0	360,0	0,3	81,0	210,0	42,0
Aço inox 304 (UNS S30400)	7965,0	250,0	565,0	0,3	78,0	196,0	39,2

Fonte: Eurocode Applied; Austral Wright Metals

A corrosão em aço pode se apresentar de diversas formas, sendo elas: pites (*pitting*), fragilização por corrosão sob tensão (SCC), fissuras (*crevice*), uniforme, galvânica e intergranular. As duas primeiras citadas são comumente observadas em torres de resfriamento, sendo em parte associadas aos compostos químicos utilizados no tratamento de água para manutenção do pH. Um pH mais ácido reflete em uma solução mais corrosiva e um pH mais básico reflete em uma solução passiva de maior sedimentação. Um pH mais próximo ao neutro é procurado, o que torna necessária a adição em concentração de cloro e soda cáustica para obtenção do nível desejado. Embora o hidróxido de sódio não represente impacto significativo quanto à taxa de corrosão, o cloro é transformado em cloreto que pode induzir corrosão localizada (pites). Uma região com uma concentração elevada de cloretos em conjunto com aplicação de carregamentos ou a existência de tensões residuais promove o mecanismo de fragilização sob tensão.

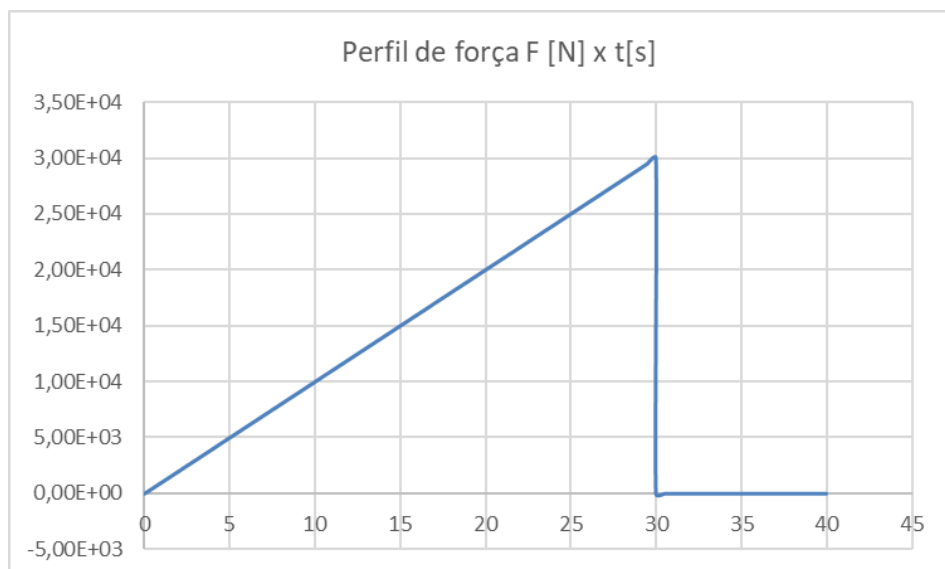
Embora com mecanismos similares, a propagação da corrosão no aço inox 304 é dificultada pela formação de um filme protetivo de natureza passiva resultante da reação dos hidróxidos de ferro e cromo, elementos constituintes da liga, com o oxigênio do ambiente, atribuindo ao material uma característica auto reparadora. O aço galvanizado em comparação, embora admita camadas de maior espessura, por tratar-se apenas do recobrimento da superfície de aço carbono, não reage com o

ambiente e pode sofrer destacamentos decorrentes do nível de aderência à superfície. Isto reflete na taxa de corrosão, que pode ser até dez vezes maior comparado ao aço inox 304. O efeito atribuído aos cloretos pode ser minimizado com a adição de molibdênio à liga, como encontrado no aço inox 316.

5.4.2 Evolução das ações com o tempo

Uma evolução da aplicação de forças (F) que aumenta linearmente com o tempo é aplicado na estrutura por um período de 30 segundos nos nós 13 e 16, sendo que após este intervalo nenhuma força é aplicada, como mostra a figura 34. O tempo total de simulação corresponde a 40 segundos, com incrementos de tempo de 0,15 segundos. O tempo adotado de 30s representa o acionamento do conjunto moto redutor com o eventual desarme visto a imposição de alguma anomalia ao sistema, como por exemplo o excesso de desbalanceamento, que é incorporado pela aplicação das forças nos respectivos nós. A massa do sistema de acionamento posicionado no topo da estrutura é da ordem de 1543,6kg, sendo tratado como massas pontuais nos nós 13, 14, 15 e 16 com $\frac{1}{4}$ do valor total da massa ($\frac{1}{4} P$) do sistema em cada nó. O incremento de tempo adotado é selecionado para evitar a perda de informações nas respostas obtidas, mas sem assumir valores próximos aos períodos correspondentes às frequências naturais, de modo a evitar a resposta em ressonância do sistema.

Figura 34 – Evolução da aplicação de forças nos nós 13 e 16



Fonte: Próprio autor

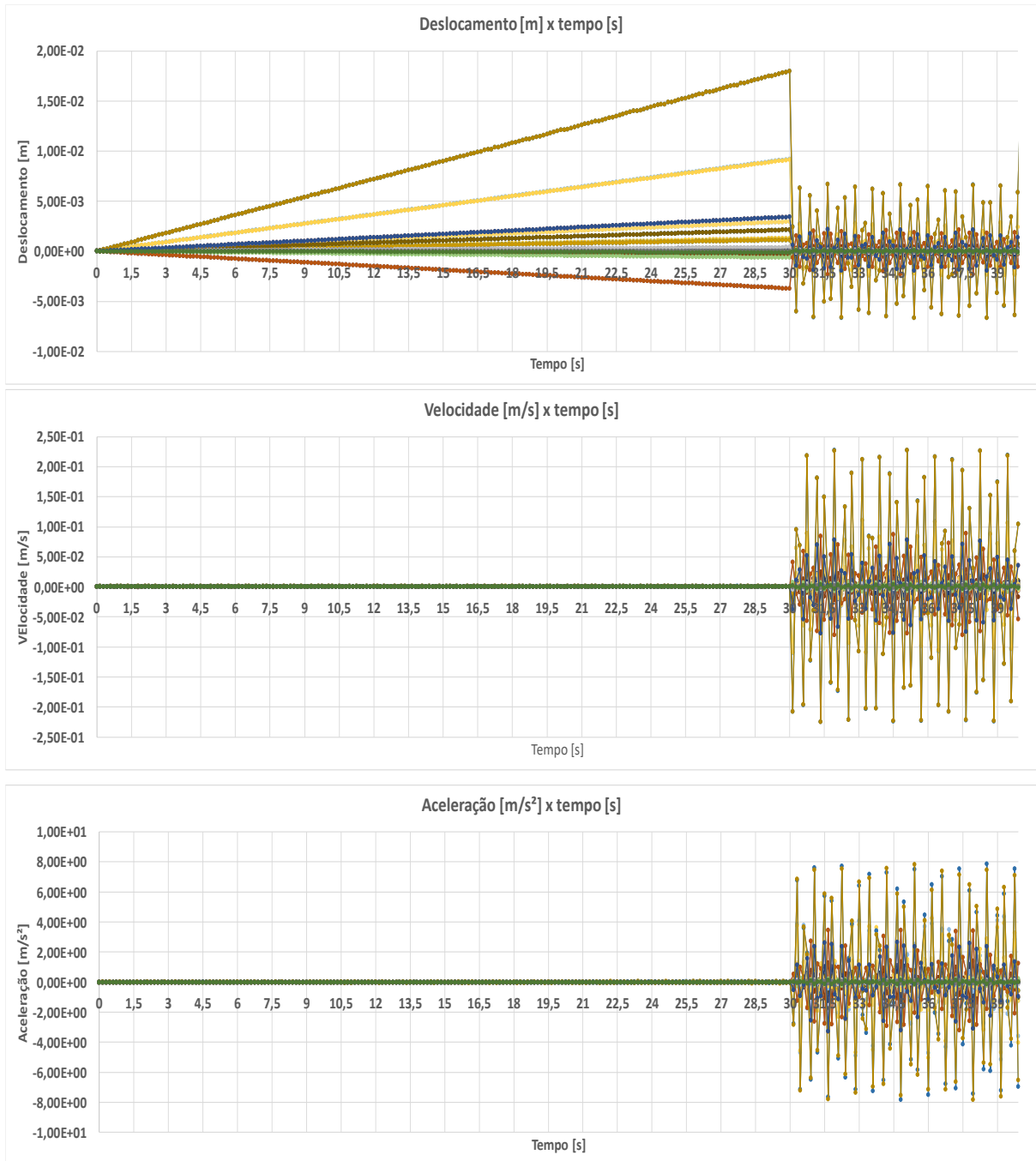
5.4.3 Resultados das simulações sem e com corrosão

Nas simulações são consideradas duas situações, sem corrosão e com corrosão homogênea de 50% nos elementos com área de seção transversal de 48,1cm² e 7,67cm². Estes elementos foram selecionados visto sofrerem maior exposição ao fluido em um período de tempo maior, comparado aos demais. Para conferir as diferenças no comportamento da estrutura, gráficos de deslocamento, velocidades e acelerações foram gerados, como apresentado na figura 35 com as curvas dependentes no tempo para cada grau de liberdade da estrutura sem corrosão para o aço inox 304. A figura 36 apresenta as variáveis de deslocamento, velocidade e aceleração para intervalo e grau de liberdade específicos considerando o mesmo material, na ausência de corrosão.

Após a retirada abrupta das forças (F) da estrutura observa-se que o arranjo busca alcançar o equilíbrio novamente, ocorrendo uma resposta no campo de velocidades e acelerações. A figura 36 apresenta uma ampliação da figura 35 para o GDL 46, o qual corresponde às variáveis do nó 16 na direção do eixo x. O intervalo é selecionado entre 37,95 a 39 segundos.

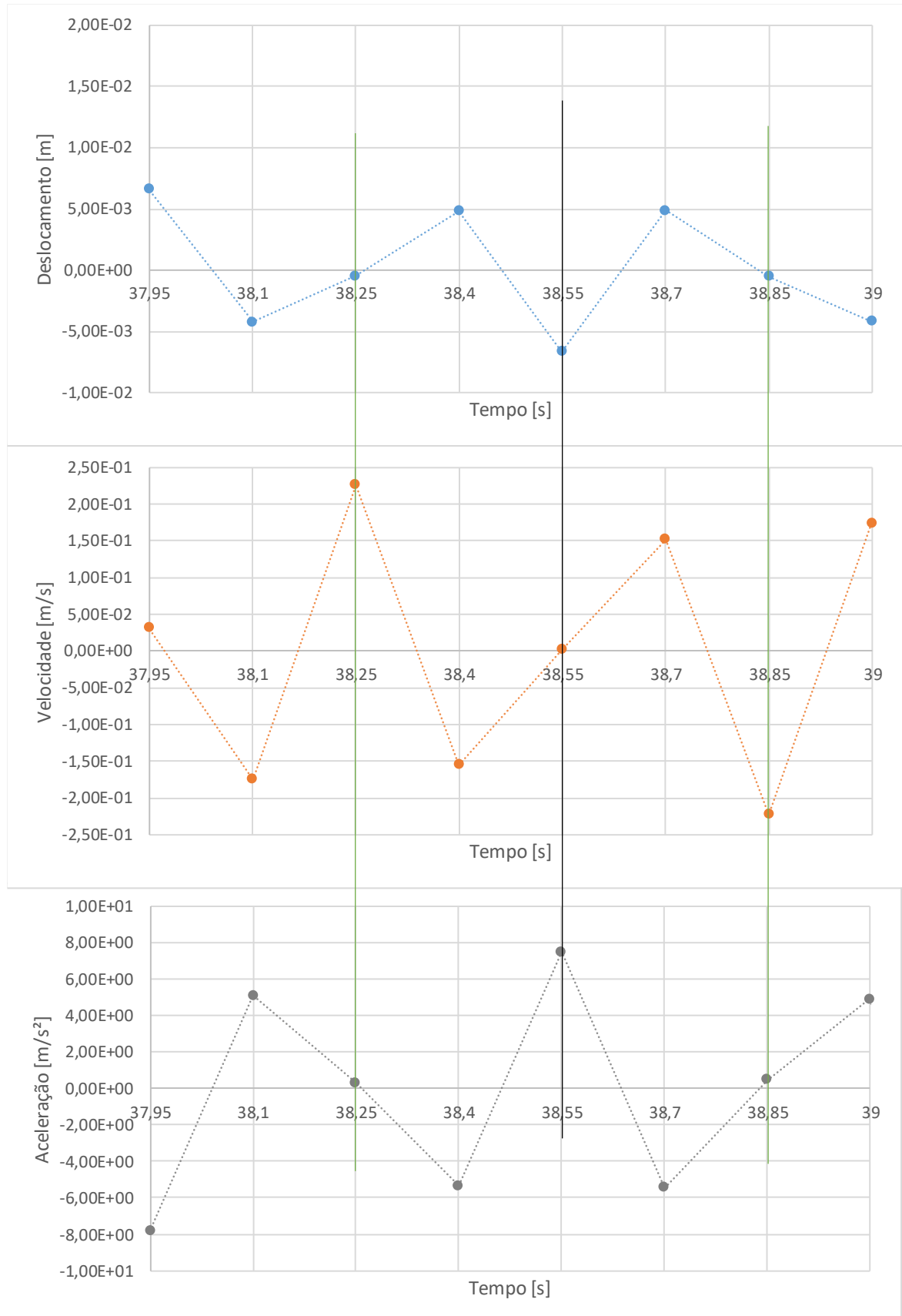
Também é verificado que o tempo de 10s sem a aplicação de forças à estrutura não é suficiente para sua estabilização. Como o amortecimento estrutural não é considerado, a atenuação da resposta e diminuição do tempo para estabilização depende da utilização de elementos mola-amortecedor em pontos estratégicos. Por exemplo, considerando que maiores deslocamentos ocorrem no GDL 46, a implementação de um elemento mola-amortecedor na direção do eixo x no nó 16 poderia reduzir o tempo de atenuação da resposta da estrutura. Gráficos da figura 35 são similares para a estrutura sob efeito de corrosão, mas com maior amplitude, conforme apresentado no apêndice B para o inox 304.

Figura 35 – Comportamento da estrutura – Aço inox 304



Fonte: Próprio autor

Figura 36 – Ampliação Nó 16x (GDL 46) – Deslocamento, velocidade e aceleração x tempo - Aço inox 304



Fonte: Próprio autor

No intervalo de tempo indicado na figura 36, a força aplicada aos nós 13 e 16 é nula. As linhas tracejadas servem apenas para facilitar a visualização através da ligação entre os pontos, visto que os resultados são obtidos ponto a ponto e a resposta não é propriamente construída via retas. Observa-se que quando o deslocamento é ascendente, como nos intervalos [38,1;38,4] e [38,55;38,7], a velocidade tende em resposta na região positiva. Quando o deslocamento é descendente, como nos intervalos [37,95;38,1], [38,4;38,55] e [38,7;39] a velocidade tende a apresentar resposta na região negativa.

Nota-se para os instantes de tempo 38,25s e 38,85s que as acelerações assumem valores próximos de zero, o que reflete em picos máximos no campo das velocidades, indicadas na figura 36 pelas retas verdes e que assume valores 22,6cm/s e -22,3cm/s, respectivamente. Observa-se também que no intervalo anterior a cruzar o eixo horizontal [38,1;38,25], como as acelerações apresentam-se na região positiva, a resposta em velocidade é ascendente. Enquanto no intervalo [38,25;38,4], as acelerações apresentam-se na região negativa, resultando em uma resposta descendente no campo de velocidades.

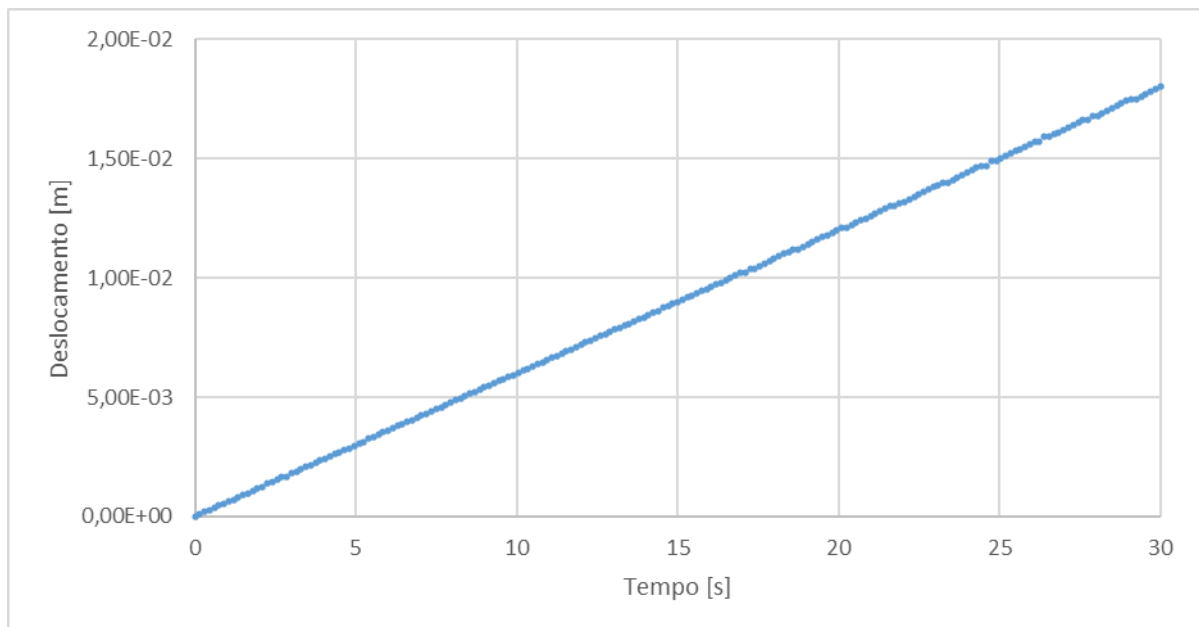
Avaliando para o instante de tempo 38,85s as respostas seguem o mesmo princípio. Desta vez, para o intervalo anterior a cruzar o eixo horizontal [38,7;38,85], as acelerações negativas refletem em uma resposta descendente na velocidade, enquanto para o intervalo posterior [38,85;39] as acelerações positivas refletem na resposta ascendente no campo de velocidade.

Para o instante de tempo de 38,55s observa-se um pico de máximo no deslocamento com valor de -6,65mm, também indicando a inversão no sentido de deslocamento no intervalo [38,4;38,7]. Isto reflete em uma resposta na velocidade que cruza o eixo horizontal no instante de tempo citado, assumindo valor zero. A aceleração, por sua vez, admite um pico máximo no valor de 7,46m/s². A reta preta indica na figura 36 os pontos citados.

Pela análise das respostas apresentadas na figura 36, verifica-se coerência entre os resultados. Caso fosse desejada a aproximação da resposta por uma curva, um formato senoidal seria mais indicado para representar a resposta no campo dos deslocamentos, sendo as derivadas primeira e segunda representando velocidade e aceleração, respectivamente.

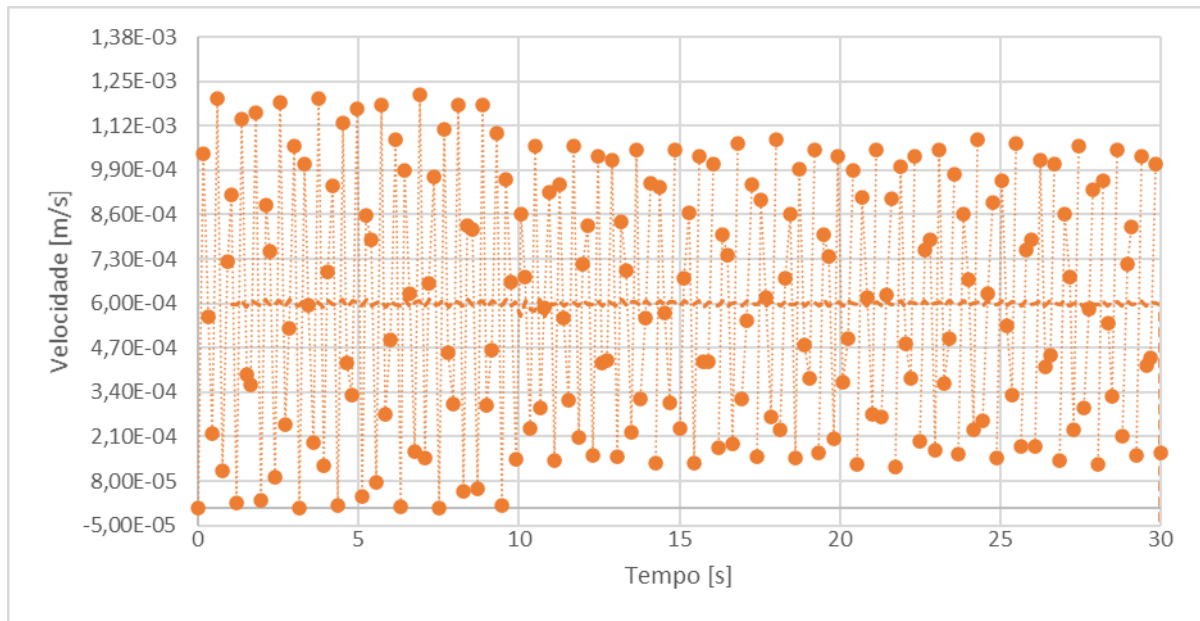
As figuras 37, 38 e 39 apresentam a resposta em deslocamento, velocidade e aceleração em função do intervalo de 0 a 30 segundos, na fase de carregamento onde a força é aplicada partindo do repouso. Nota-se que a resposta no campo dos deslocamentos apresenta formato que se aproxima de uma reta, atingindo valores máximos próximos de 18mm. Embora a resposta no campo de velocidades apresente oscilações, estas são em torno de uma constante, que se aproxima de 0,6mm/s, o que é coerente com a derivada da reta da figura 37. Do mesmo modo, a resposta no campo das acelerações também apresenta oscilações, desta vez em torno de zero. Isto também é coerente com a derivada da constante identificada pela figura 38, que assume valor zero como mostra a figura 39.

Figura 37 – Ampliação Nó 16x (GDL 46) – Deslocamento x tempo - Aço inox 304



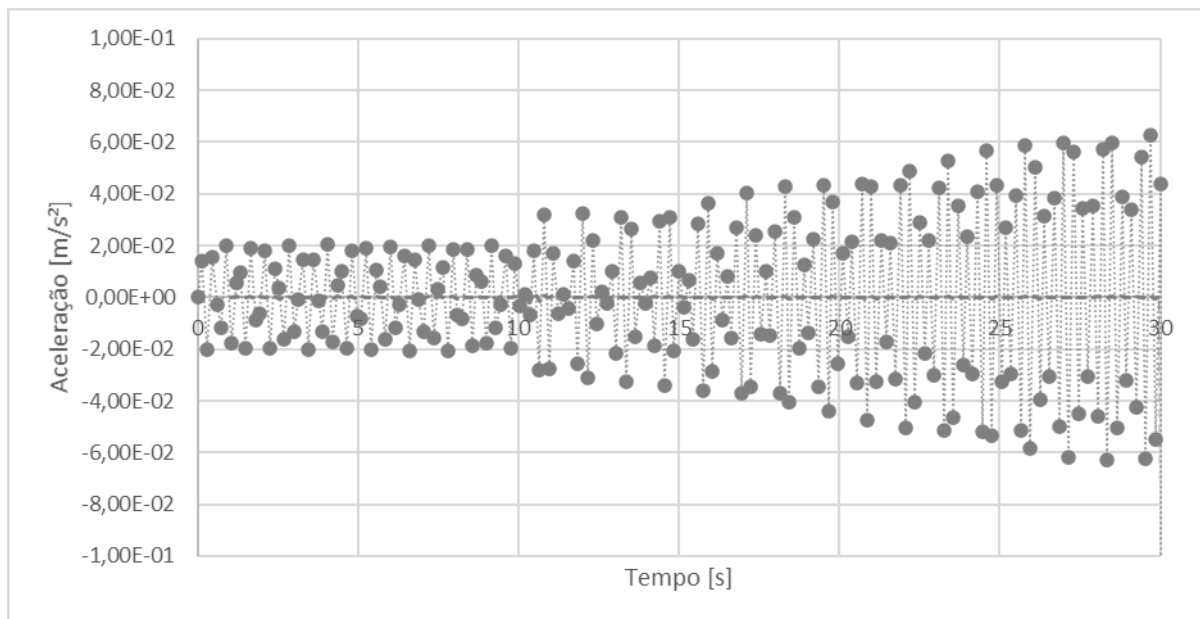
Fonte: Próprio autor

Figura 38 – Ampliação Nó 16x (GDL 46) – Velocidade x tempo - Aço inox 304



Fonte: Próprio autor

Figura 39 – Ampliação Nó 16x (GDL 46) – Aceleração x tempo - Aço inox 304

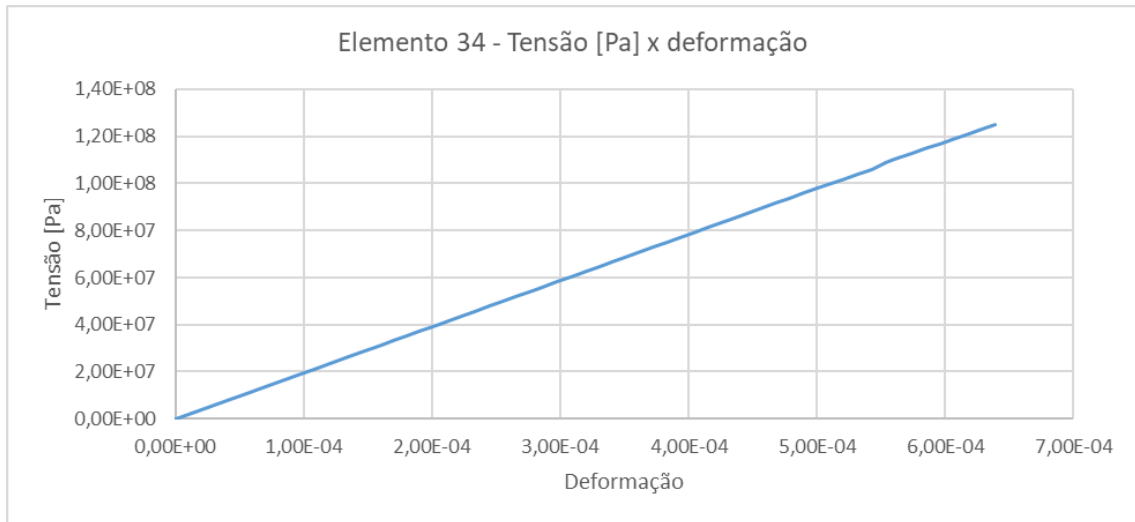


Fonte: Próprio autor

À continuação, elementos foram selecionados baseados no nível de tensão de modo a apresentar as diferenças no comportamento quando considerando resposta em regime plástico. Com isso, gráficos de tensão x deformação foram gerados para cada elemento pré-selecionado, no caso 34 e 36. As figuras 40 a 43 apresentam as curvas obtidas para a estrutura constituída por aço inox 304. As figuras 40 e 41

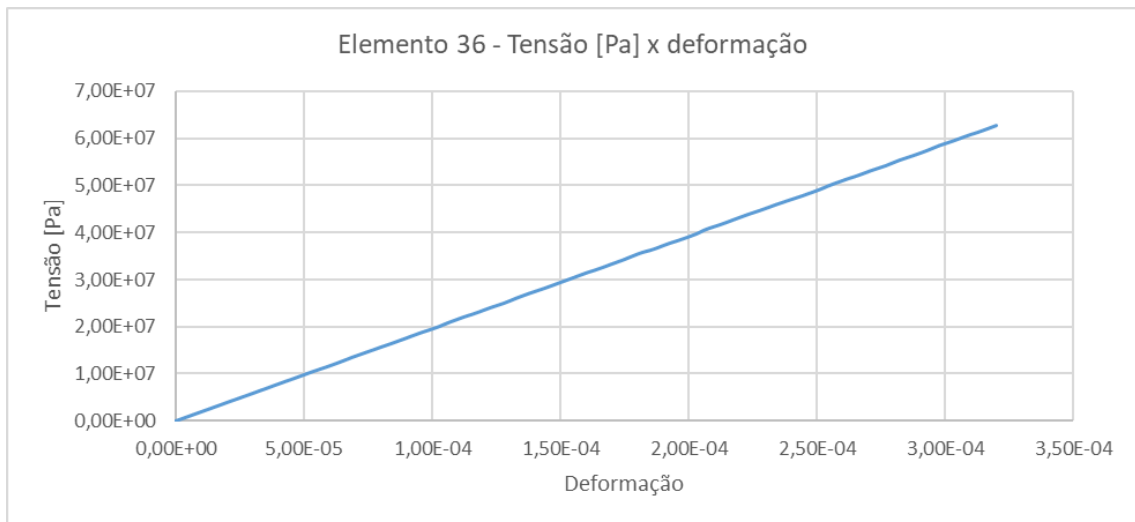
mostram o comportamento em regime elástico dos elementos 34 e 36 sem a presença de corrosão, assumindo uma resposta linear com valores máximos de tensão na ordem de 125MPa e 62,7MPa e deformações de $6,39 \cdot 10^{-4}$ e $3,20 \cdot 10^{-4}$, respectivamente.

Figura 40 – Resposta elástica para o elemento 34 sem a presença de corrosão – Aço inox 304



Fonte: Próprio autor

Figura 41 – Resposta elástica para o elemento 36 sem a presença de corrosão – Aço inox 304

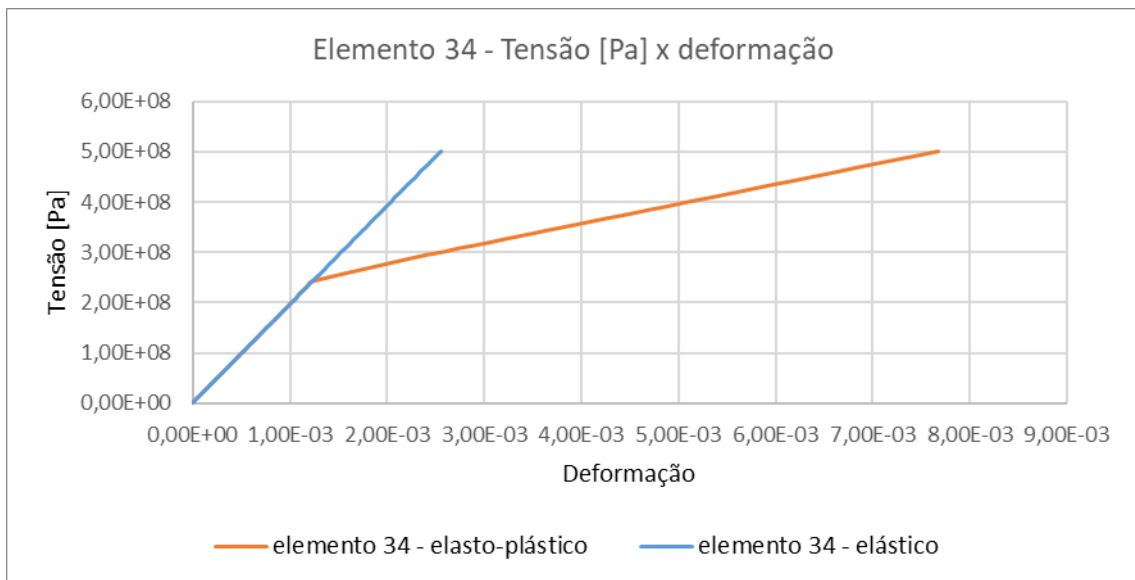


Fonte: Próprio autor

Nas figuras 42 e 43 se mostra o resultado para os mesmos elementos com uma redução homogênea em 50% na área de seção transversal. O perfil na cor azul corresponde à análise em regime elástico, enquanto o perfil em cor laranja considera o comportamento em regime plástico. Se considerada apenas a resposta elástica

isto pode conduzir a uma predição equivocada, com tensões e deformações que não retratam de modo eficaz o comportamento dos elementos. Quando se considera o comportamento plástico aumentam as deformações observadas. Na figura 42 verifica-se que a tensão ultrapassa o limite de escoamento do material, assumindo comportamento em regime plástico que é representado pela resposta linear com uma reta de coeficiente angular correspondente à plasticidade. Para o elemento 34, na figura 42 observa-se valores máximos de tensão de 501MPa e deformação de $7,68 \cdot 10^{-3}$. Comparada à simulação em que se desconsidera o comportamento em regime plástico, para os mesmos valores de tensão, a deformação assume valor máximo de $2,50 \cdot 10^{-3}$, aproximadamente 67,4% inferior.

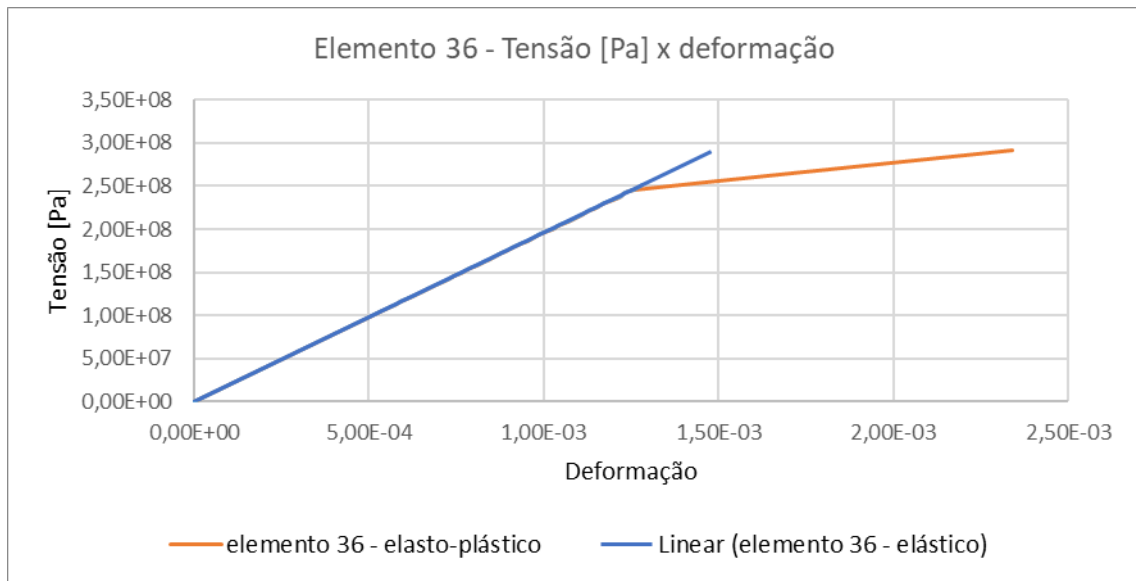
Figura 42 – Curvas de tensão x deformação para respostas linear e elasto-plástica – Elemento 34 – Aço inox 304 com presença de corrosão



Fonte: Próprio autor

Para o elemento 36, na figura 43 observa-se valores máximos de tensão de 292MPa e deformação de $2,34 \cdot 10^{-3}$. Comparada à simulação em que se desconsidera o comportamento em regime plástico, para os mesmos valores de tensão, a deformação assume valor máximo de $1,46 \cdot 10^{-3}$, aproximadamente 37,6% inferior.

Figura 43 – Curvas de tensão x deformação para respostas linear e elasto-plástica – Elemento 36 – Aço inox 304 com presença de corrosão

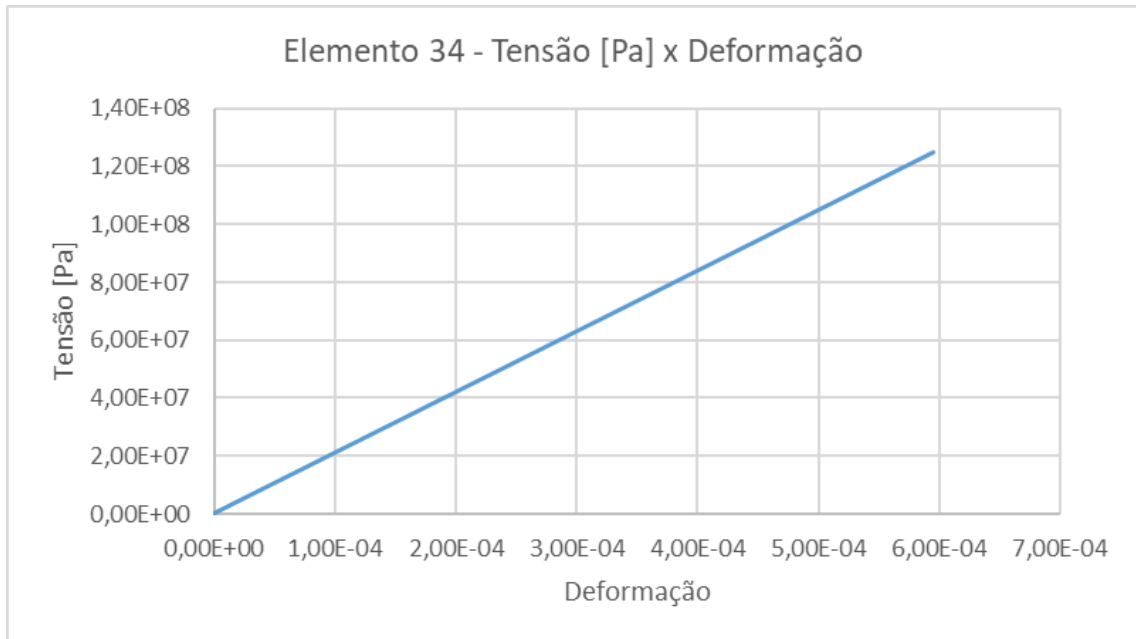


Fonte: Próprio autor

Para os elementos observados, nota-se que o limite de tração não é atingido. Embora exista deformação permanente na estrutura em presença de comportamento plástico o resíduo de carga é reduzido até que se verifique o equilíbrio nessa condição, e a estrutura não entra em colapso. A análise foi repetida para a estrutura constituída por aço estrutural galvanizado S235 W, com os resultados sendo apresentados nas figuras 44 a 47.

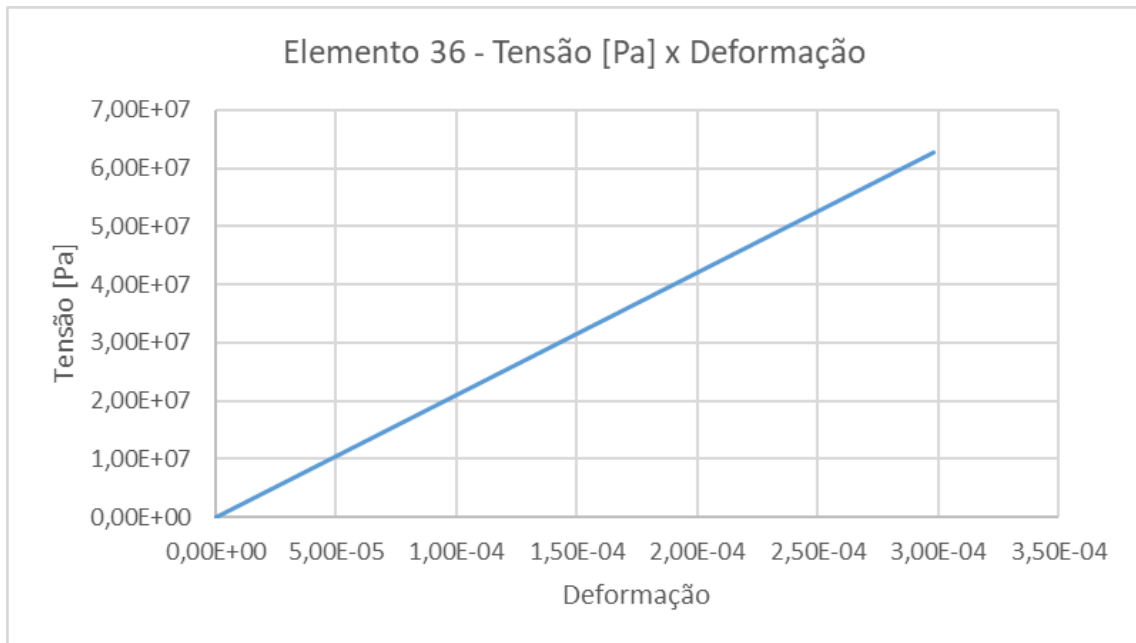
As figuras 44 e 45 mostram o comportamento em regime elástico dos elementos 34 e 36 sem a presença de corrosão, assumindo uma resposta linear com valores máximos de tensão na ordem de 125,0MPa e 62,7MPa e deformações de $5,95 \cdot 10^{-4}$ e $2,99 \cdot 10^{-4}$, respectivamente.

Figura 44 – Resposta elástica para elementos sem a presença de corrosão – Elemento 34 – Aço estrutural galvanizado S235 W sem presença de corrosão



Fonte: Próprio autor

Figura 45 – Resposta elástica para elementos sem a presença de corrosão – Elemento 36 – Aço estrutural galvanizado S235 W sem presença de corrosão

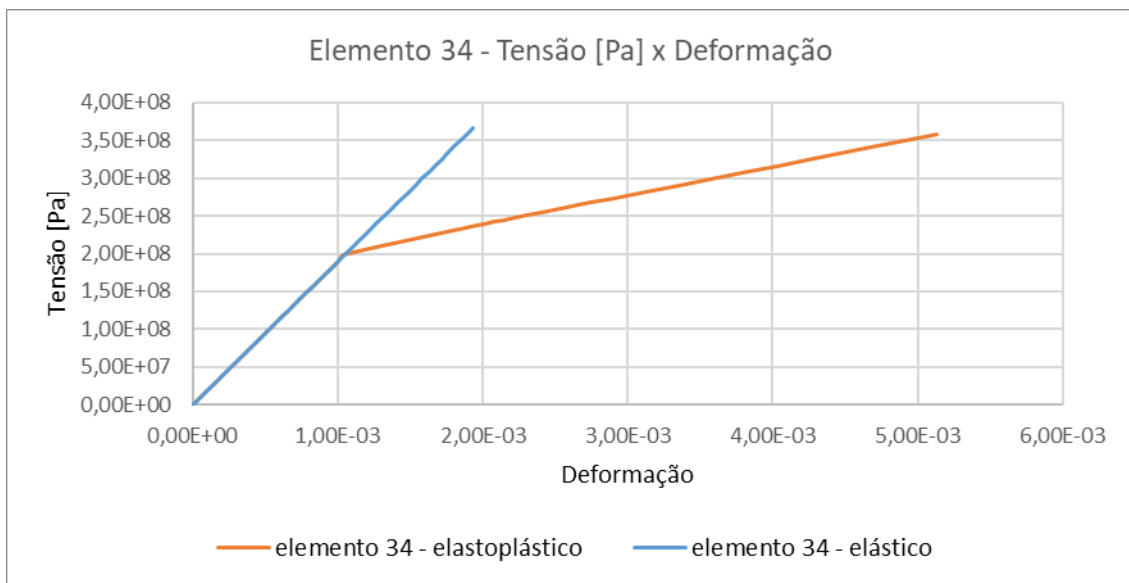


Fonte: Próprio autor

Analogamente para o aço inox 304, as figuras 46 e 47 contrastam o tipo de análise executado na estrutura em aço galvanizado, considerando os elementos com corrosão em 50% na área de seção transversal. Para o elemento 34 a resposta

em tensão assume valor máximo de 501MPa, que é superior ao limite de tração do material. Portanto, na figura 46 é apenas apresentado o comportamento anterior ao instante de ruptura, que ocorre quando a tensão atinge o valor de 360MPa. Considerando o comportamento em regime plástico, a deformação admite valor máximo de $5,13 \cdot 10^{-3}$. Para a simulação considerando apenas o regime elástico, para os mesmos valores de tensão, a deformação assume valor máximo de $1,89 \cdot 10^{-3}$, aproximadamente 63,2% inferior.

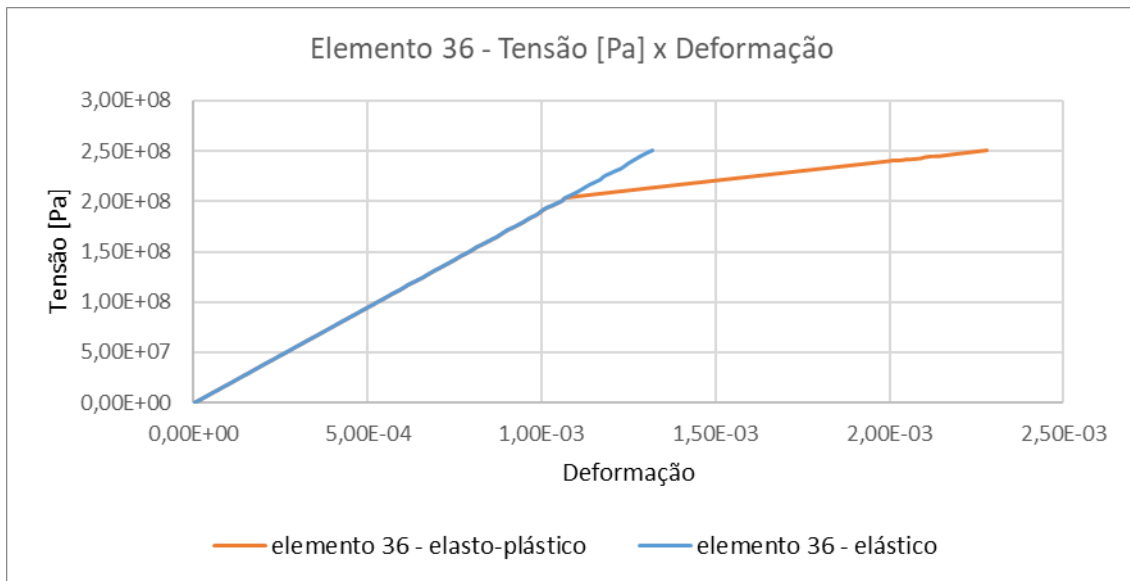
Figura 46 – Curvas de tensão x deformação para respostas linear e elasto-plástica –Elemento 34 – Aço estrutural galvanizado S235 W com presença de corrosão



Fonte: Próprio autor

Para o elemento 36, na figura 47 observa-se valores máximos de tensão de 251MPa e deformação de $2,28 \cdot 10^{-3}$. Comparada à simulação em que se desconsidera o comportamento em regime plástico, para os mesmos valores de tensão, a deformação assume valor máximo de $1,32 \cdot 10^{-3}$, aproximadamente 42,1% inferior.

Figura 47 – Curvas de tensão x deformação para respostas linear e elasto-plástica – Elemento 36 – Aço estrutural galvanizado S235 W com presença de corrosão



Fonte: Próprio autor

Para o aço estrutural galvanizado é possível observar que é atingida a tensão limite de tração, com o elemento 34 apresentando ruptura e comportamento em regime plástico anterior à falha, o que pode favorecer à sobrecarga em outros elementos e levar ao colapso da estrutura. A tabela 7 reúne as principais diferenças encontradas entre os resultados.

Tabela 7—Resultados para tensão e deformação máximas nos elementos 34 e 36

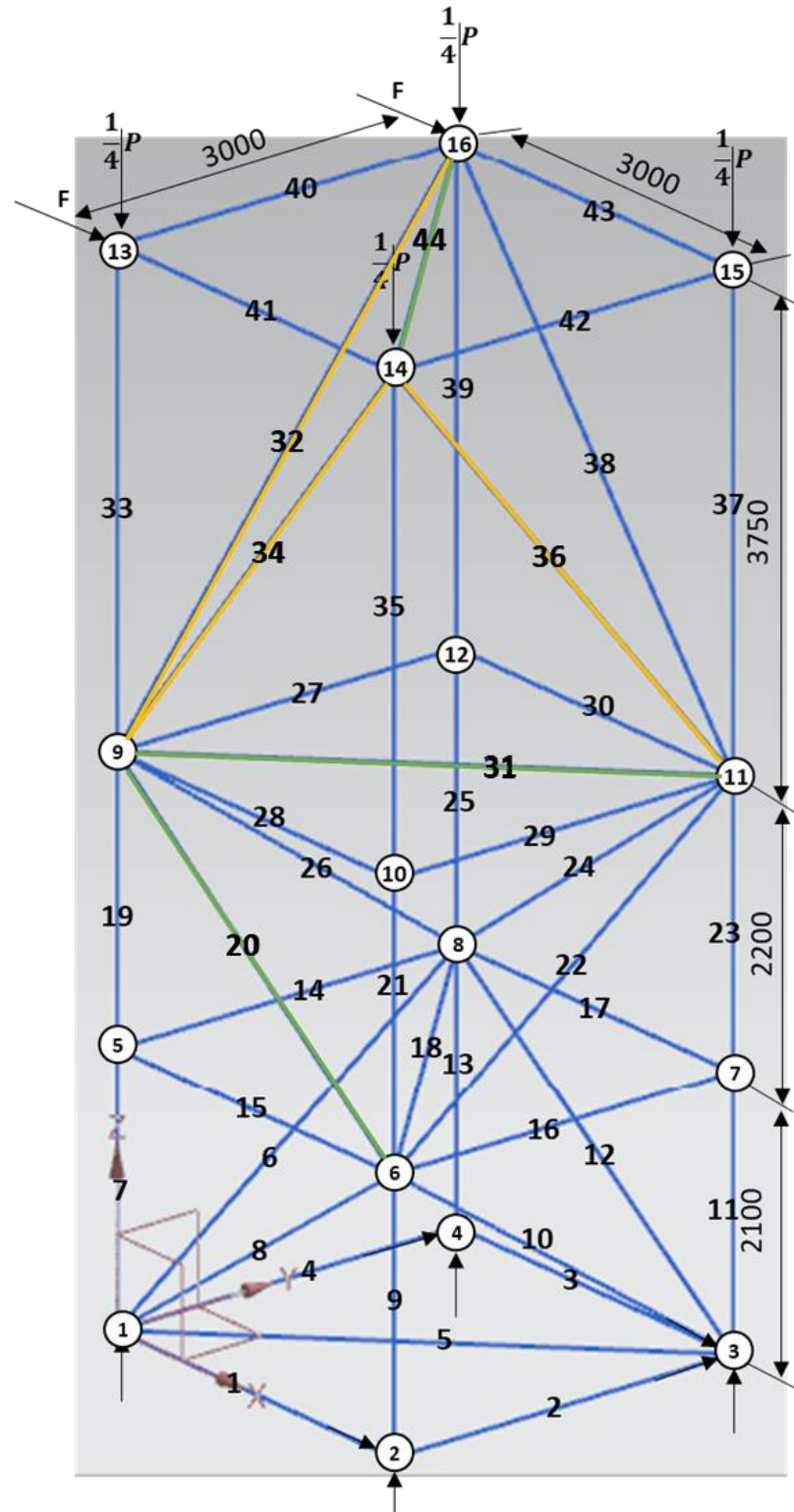
	Aço Inox 304 (UNS S30400)			Aço estrutural com recobrimento galvanizado S 235W (EN-10025-5)		
	Sem corrosão	50% corrosão	50% corrosão (elástico)	Sem corrosão	50% corrosão	50% corrosão (elástico)
Deformação elemento 34	6,390E-04	7,680E-03	2,505E-03	5,950E-04	5,130E-03	1,890E-03
Tensão elemento 34 [Pa]	1,250E+08	5,010E+08	5,010E+08	1,250E+08	3,600E+08	3,600E+08
Deformação elemento 36	3,200E-04	2,340E-03	1,460E-03	2,990E-04	2,280E-03	1,320E-03
Tensão elemento 36 [Pa]	6,270E+07	2,920E+08	2,920E+08	6,270E+07	2,510E+08	2,510E+08

Fonte: Próprio autor

A figura 48 apresenta os três elementos que contêm os maiores esforços de tração, representados na cor amarela, e aqueles que contêm os maiores esforços de compressão, representados na cor verde. Os três elementos que apresentam maiores esforços de tração correspondem ao 34, 36 e 32, em ordem decrescente.

Para compressão, trata-se dos elementos 44, 20 e 31, em ordem decrescente em módulo.

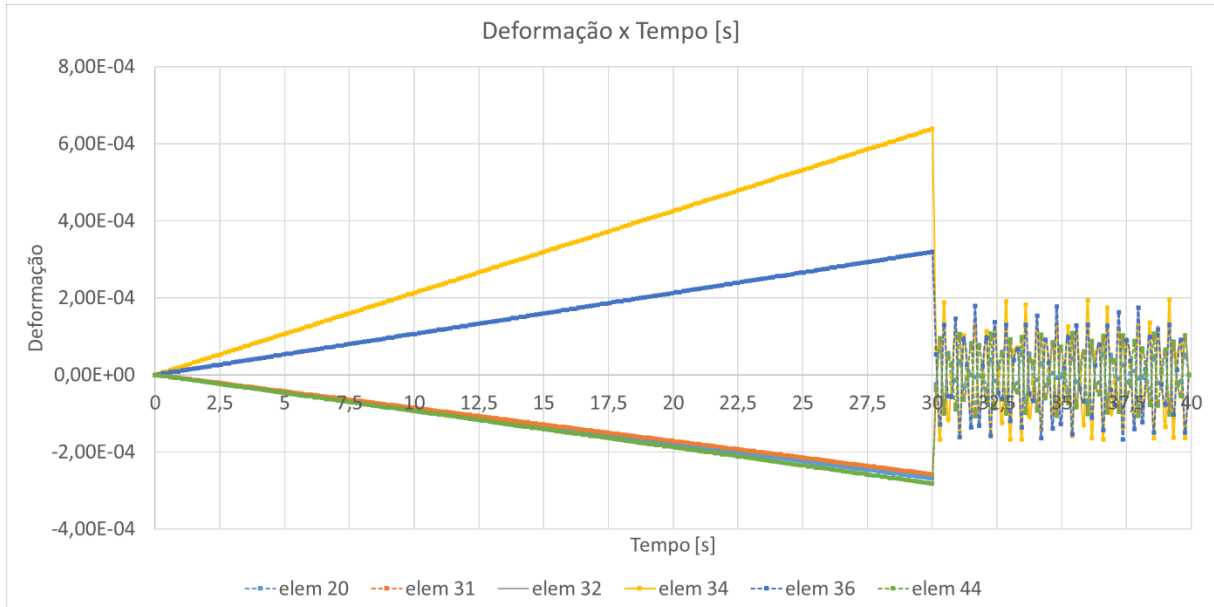
Figura 48 – Principais elementos em tração e compressão – estrutura de torre



Fonte: Próprio autor

A figura 49 apresenta a resposta das deformações nos elementos indicados da estrutura em função do tempo, para a estrutura constituída por aço inox 304 sem a presença de corrosão.

Figura 49 – Curvas de deformação x tempo – Aço Inox 304 sem efeito de corrosão



Fonte: Próprio autor

A figura 50 apresenta a resposta das deformações para os mesmos elementos, mas para a estrutura constituída por aço estrutural galvanizado S235 W, com a presença de corrosão. Observa-se no elemento 34, por volta do instante de 12s, a resposta em regime plástico. A deformação ultrapassa o valor associado à tensão de escoamento, na região do eixo vertical próxima à 1.10^{-3} , e aumenta com o tempo com uma maior taxa de deformação, visto que os resíduos de tensão são absorvidos seguindo as características de encruamento. Visto ser alcançada a tensão de ruptura, a máxima deformação é alcançada anterior ao instante quando é encerrada a aplicação do carregamento, por volta de 21,6s. Os demais elementos representados não apresentam ruptura, sendo apenas verificadas respostas em regime plástico em certos elementos.

Para conferir se o intervalo de tempo escolhido não corresponde ao de uma frequência natural associada, é executada uma análise dos autovalores e autovetores da estrutura. Os resultados das frequências naturais e períodos são apresentados para os primeiros oito modos de vibração e reunidos na tabela 8. Nota-se que o intervalo $\Delta t = 0,15s$ para análise não incorre em problemas para a execução das simulações.

Tabela 8–Frequências naturais e períodos

ω_n [rad/s]	31,44	54,74	57,41	128,34	169,66	174,42	220,62	324,07
Freq. [Hz]	5,00	8,71	9,14	20,43	27,00	27,76	35,11	51,58
Per. T [s]	0,20	0,11	0,11	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02

Fonte: Próprio autor

Figura 50 – Curvas de deformação x tempo – Aço estrutural galvanizado S235 W com efeito de corrosão

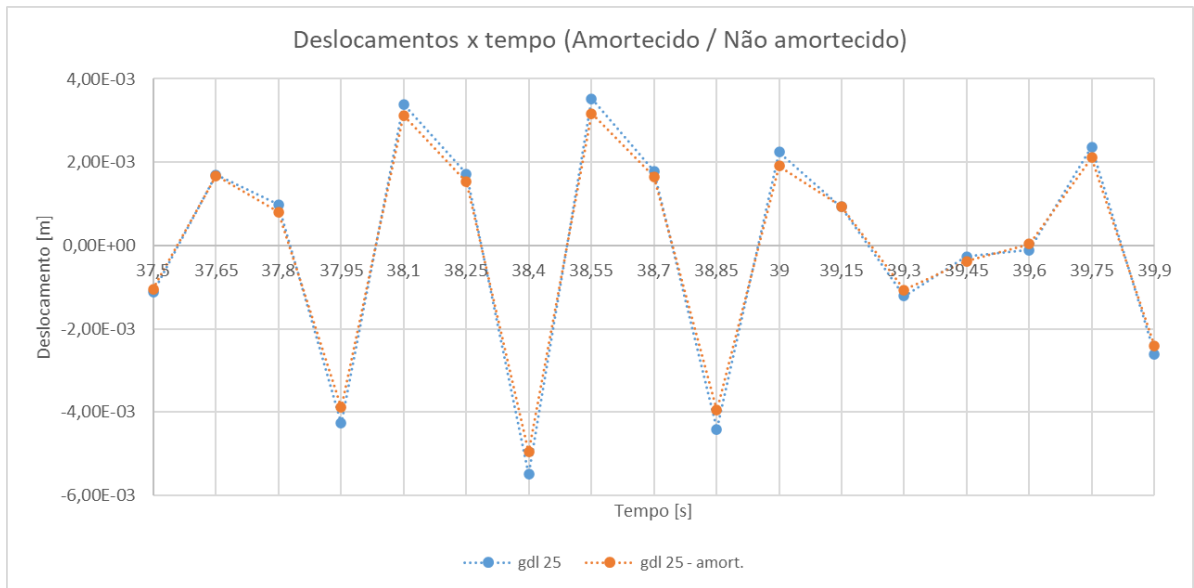


Fonte: Próprio autor

5.5 CONSIDERAÇÃO DO AMORTECIMENTO

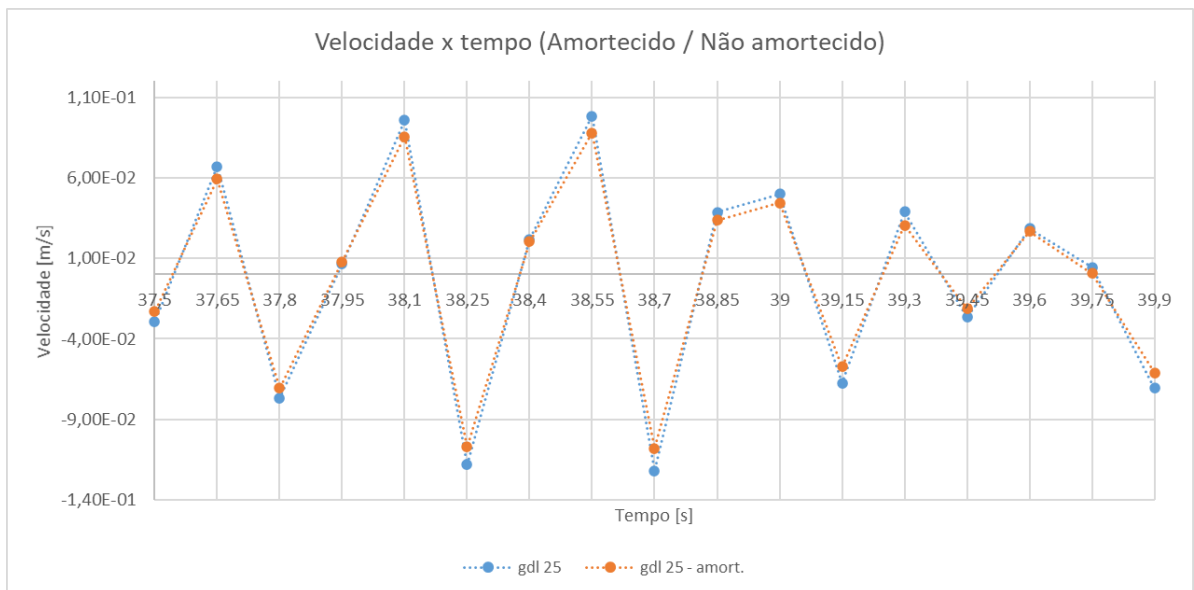
Para demonstrar o potencial do conjunto de rotinas desenvolvido, foi incluído o efeito de amortecimento e implementado um elemento amortecedor puro com a mesma vinculação do elemento 34, associado ao elemento barra constituído por aço Inox 304 com nível de corrosão em 50% da seção de área transversal. Os resultados mostram-se nas figuras 51, 52 e 53 para as variáveis de deslocamento, velocidade e aceleração, respectivamente. São apresentados para o grau de liberdade 25, associado ao nó 9 na direção do eixo x do sistema de coordenadas, representados no intervalo de tempo entre 37,5s a 40s.

Figura 51 – Deslocamento GDL 25 9_x - Elemento 34 amort/ n. amort

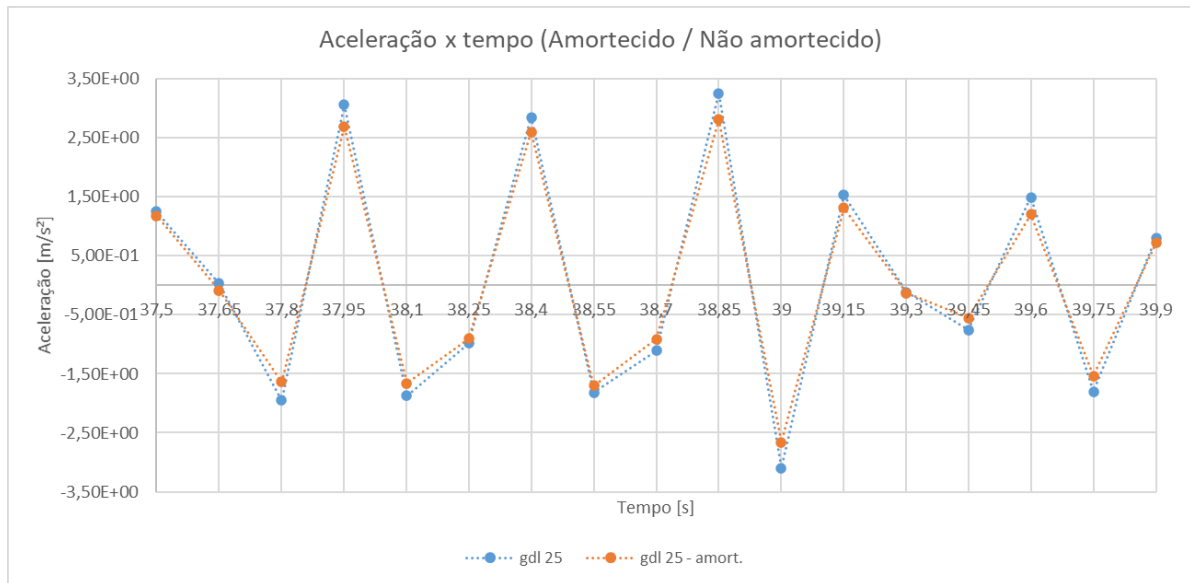


Fonte: Próprio autor

Figura 52 – Velocidade GDL 25 9_x - Elemento 34 amort./ n. amort



Fonte: Próprio autor

Figura 53 – Aceleração GDL 25 9_x - Elemento 34 amort./ n. amort

Fonte: Próprio autor

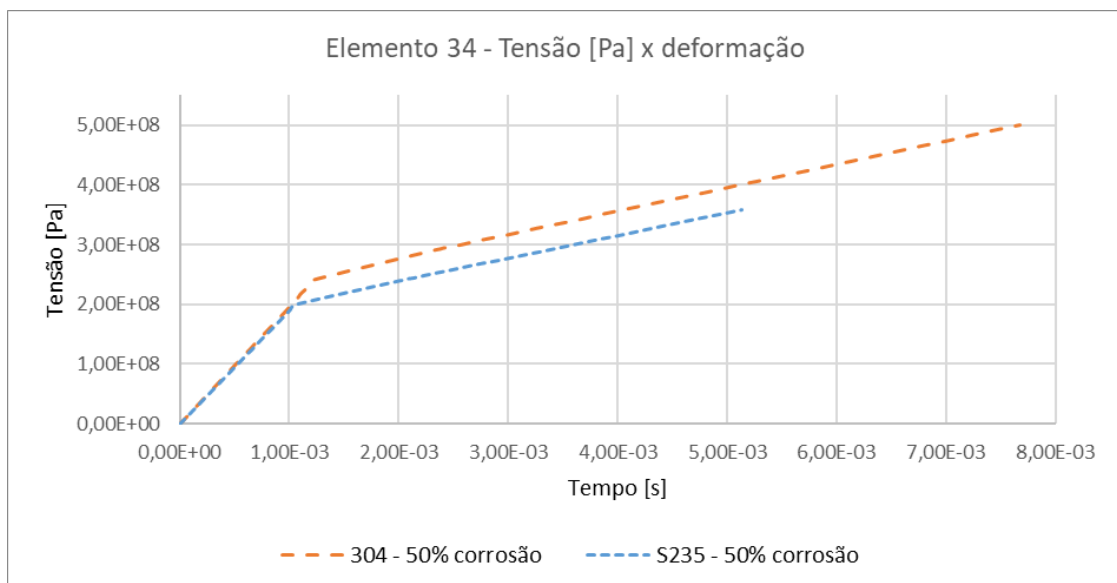
Para o elemento amortecedor foi utilizado um parâmetro de 6kN.s/m. O valor foi escolhido arbitrariamente de modo a obter uma redução próxima dos 10% no campo dos deslocamentos, além de corresponder a amortecedores que podem ser encontrados comercialmente. A implementação de valores maiores resulta na redução da amplitude das respostas e na diminuição do tempo para estabilização da estrutura. O intervalo escolhido para representação facilita a visualização para maiores variações com relação a curva não amortecida. O efeito de amortecimento pode ser observado considerando a atenuação na resposta no campo dos deslocamentos, velocidade e aceleração, apresentando amplitude menor comparada à resposta não amortecida. A resposta em velocidade e aceleração decorre do elemento adicional. Para o intervalo representado, há uma redução média em 9,44% na resposta com relação aos deslocamentos, redução média de 14,5% no campo de velocidade e redução média de 1,25% no campo de aceleração.

6 MODIFICAÇÕES NO ELEMENTO CRÍTICO

Como o elemento 34, constituído por aço estrutural galvanizado S235 W e com seção de área reduzida em 50% derivado da corrosão induzida no elemento, apresentou fratura em solicitação de carga, foi proposto introduzir alterações no membro da estrutura com o emprego do aço inox 304. Com isso, a estrutura passa a ser formada por dois tipos de material. Realizaram-se simulações de duas situações, uma alterando o material e mantendo o mesmo nível de corrosão induzida em toda a estrutura, a outra alterando o material e considerando metade da corrosão presente na estrutura, correspondendo a uma redução na seção de área transversal do elemento de 25%. Não foram aplicadas alterações geométricas na estrutura, e as condições de vinculação e solicitações também foram mantidas.

A figura 54 apresenta as curvas que relacionam as tensões e deformações obtidas para a primeira situação, durante a fase de carregamento imposto à estrutura. Nota-se que embora o elemento apresente comportamento em regime plástico, este inicia-se a partir de um ponto acima e não ocorre fratura como quando é utilizado o aço galvanizado. Isto deve-se a resistência à tração e a tensão de escoamento do Inox 304 serem superiores, correspondentes a 565MPa e 250MPa, comparados aos 360MPa e 205MPa do aço galvanizado, respectivamente. Como os módulos de elasticidade são próximos, o comportamento em regime elástico é similar.

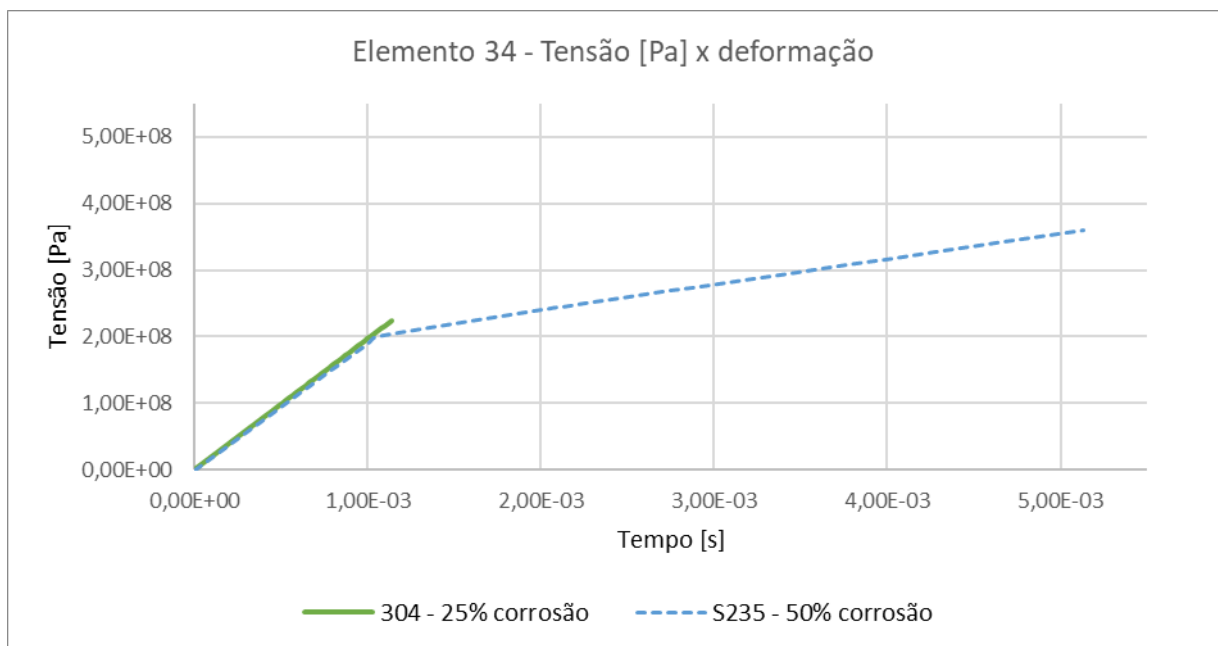
Figura 54 – Tensão x deformação – Elemento 34 (Inox 304) – 50% corrosão



Fonte: Próprio autor

A figura 55, de modo análogo, apresenta as curvas obtidas para a segunda situação. Como a resistência à corrosão do aço inox 304 é superior a do aço galvanizado utilizado, em uma aplicação para trabalho é plausível admitir um nível de corrosão inferior para o elemento constituído pelo inox, quando comparado com a corrosão global da estrutura. Contrapondo as curvas para os distintos materiais, observa-se que o elemento não atinge a tensão de escoamento e, portanto, não apresenta comportamento em regime plástico.

Figura 55 – Tensão x deformação – Elemento 34 (Inox 304) – 25% corrosão



Fonte: Próprio autor

A tabela 9 reúne os resultados encontrados nas simulações. Para o primeiro caso encontra-se um valor de tensão máxima de 501MPa, um aumento de 39,2% da solicitação suportada pelo elemento 34, comparado ao da estrutura original construída em aço galvanizado. Neste caso a deformação assume o valor de $7,68 \cdot 10^{-3}$ m/m, o que representa um aumento de 49,7%. Do mesmo modo, para o segundo caso observa-se um valor de tensão máxima de 223MPa e de uma deformação de $1,14 \cdot 10^{-3}$ m/m, correspondendo a uma redução percentual de 38% e 77,8% respectivamente.

Tabela 9–Resultados para tensão e deformação máximas no elemento 34, construído em Inox 304

Elemento 34		
	25% corrosão SAE 304	50% corrosão SAE 304
σ [Pa]	2,23E+08	5,01E+08
ε [m/m]	1,14E-03	7,68E-03

Fonte: Próprio autor

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Comparando a estrutura constituída por aço estrutural S235 W e o aço inox 304, sem a presença de corrosão as forças de entrada produziram um deslocamento máximo próximo de 18mm. Para os elementos 34 e 36 constituídos em aço inox 304, a deformação associada com o mesmo nível de tensão para a estrutura sem efeito de corrosão é cerca de 7% maior comparado ao aço estrutural galvanizado. Como o aço inox 304 apresenta um módulo de Young de menor magnitude, no regime elástico admite deformações maiores.

Para a estrutura com efeito de corrosão com 50% de redução de área da seção transversal, os elementos apresentam comportamento em regime elástico e plástico, sendo que a deformação no elemento 34 é cerca de 49,7% superior para o aço inox 304, enquanto no elemento 36 cerca de 2,6% superior para o aço inox 304. Isto pode ser explicado visto que as deformações sofridas para o aço estrutural S235 W levaram a ruptura do material, com tensões acima do limite máximo de tração, além do que, acima da tensão de escoamento de 215 MPa, o aço S235 W apresenta maior sensibilidade ao efeito de corrosão quando comparado ao aço inox 304. Os valores apresentados nas colunas nomeadas “50% corrosão (elástico)” trata-se apenas de uma simulação para apresentar o equívoco possível na predição de comportamento no caso em que o regime plástico é negligenciado, resultando em deformações com valores até 67% menores.

A partir das simulações efetuadas para o caso de estudo, observa-se que alterando o material constituinte do elemento 34 resulta suficiente para garantir que a estrutura não entre em colapso, quando submetida a condições severas de corrosão e solicitação. Isto reflete em um custo de implementação e manutenção reduzido, visto a utilização do aço inox 304 apenas em um elemento localizado da estrutura, na sua maior parte constituída em aço galvanizado.

A solução proposta de substituição do elemento 34, constituído por aço galvanizado S235 W, por outro de mesma geometria mas em Inox 304, é válida para uma intervenção emergencial, visando prevenir o colapso na estrutura da torre de resfriamento com um nível de degradação considerável. Deste modo, com um custo e tempo de manutenção relativamente menores, é possível a adequação para continuidade da operação do equipamento. Para uma reforma ou *retrofit*, é mais

adequada a padronização dos elementos e materiais utilizados, visto tratar-se de uma estrutura composta por diversas barras que pode ser suscetível a erros de montagem, caso existam muitas variações que possam impactar na configuração da estrutura.

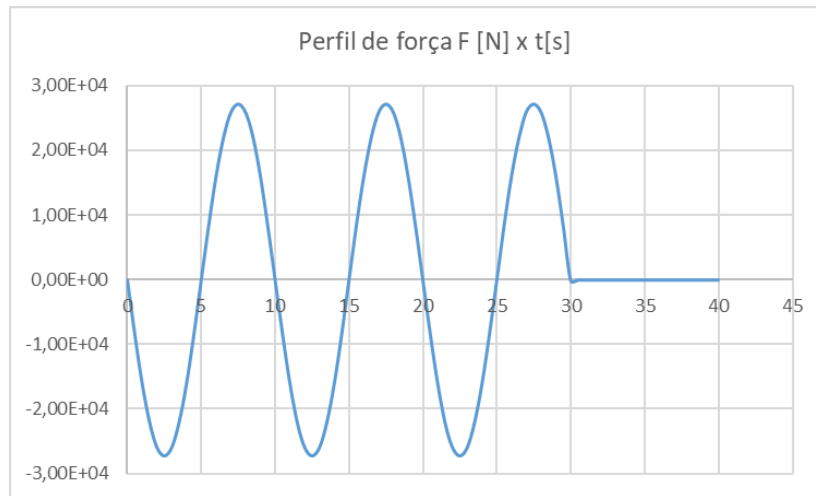
Os resultados apresentados para a simulação considerando o elemento amortecedor puro e ideal apresentam uma redução média de 6,26% na resposta no campo dos deslocamentos. A soma do amortecimento global da estrutura com o elemento amortecedor utilizado, deve reforçar a tendência à redução dos deslocamentos observados.

O trabalho até o presente momento proporciona um conjunto efetivo de rotinas, capazes de prever o comportamento nos regimes elástico e plástico para estruturas treliçadas nos campos de dinâmica e estática. Futuro desenvolvimento pode ser feito de modo a permitir outros tipos de elementos para serem simulados com o código.

7.1 SUGESTÃO PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO

A continuidade deste trabalho seria a inclusão do amortecimento global da estrutura através do método de Rayleigh e a inclusão de outros perfis de forças aplicadas para observar a resposta não-linear dinâmica. Simulações para estruturas conhecidas na literatura podem ser realizadas para validação do conjunto de rotinas desenvolvido, comparando os resultados obtidos. É proposta a execução de simulações para diferentes arranjos geométricos, para conferir a atuação de elementos do tipo barra como “fusíveis” em caso de falha na estrutura, de modo a verificar a robustez do conjunto. Outros perfis de força podem ser aplicados, por exemplo, uma evolução de forças (F) que assume o formato de uma curva senoidal variante com o tempo aplicado na estrutura por um período de 30 segundos, sendo que após este intervalo nenhuma força é aplicada, como mostra a figura 56. Esta curva melhor representa os esforços envolvidos provenientes de um desbalanceamento de massa, além de permitir visualizar o efeito cíclico do carregamento na resposta em regime elástico-plástico da estrutura.

Figura 56 – Evolução cíclica de aplicação de forças nos nós 13 e 16



Fonte: Próprio autor

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

304 STAINLESS STEEL INFORMATION SHEET. **Austral Wright Metals**. Disponível em: <<https://www.australwright.com.au/technical-data/alloys/stainless-steel/304-stainless-steel/>>, Acesso em: 18 de Agosto de 2021.

ALPINA EQUIPAMENTOS. **Alpina Equipamentos**. Produtos: Torres de Resfriamento de Água Série TBS. Disponível em: <https://www.alpinaequipamentos.com.br/produto/torres-de-resfriamento-de-agua/serie-tbs/8>, Acesso em: 20 de Outubro de 2021.

BAI L., ZHANG Y., **Nonlinear dynamic behavior of steel framed roof structure with self-centering members under extreme transient wind load**. Engineering Structures, v.49, p. 819-830, 2013.

CONNOR J. **Section 4: Nonlinear Analysis of Trusses**. Disponível em: <https://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/1-571-structural-analysis-and-control-spring-2004/lecture-notes/1_571_4.pdf>, Acesso em: 02 de Julho de 2020

How Cooling Towers Work (W/ Diagram, Pictures & Principles). **Cooling Tower products**. Disponível em: <<https://www.coolingtowerproducts.com/blog/how-cooling-towers-work-diagram-pictures-2015.htm>>, Acesso em: 20 de Outubro de 2021.

JANI, D. B. **Energy Efficient HVAC Cooling Towers – an Overview**. Disponível em: <<https://www.coolingindia.in/energy-efficient-hvac-cooling-towers-an-overview/>>, Acesso em: 20 de Outubro de 2021.

KIM N. **Introduction to nonlinear finite element analysis**. Springer, 2015.

LAW S. S., LI. X. Y., **Identification of structural damping in time domain**. Journal of Sound and Vibration, v.328, p. 71-84, 2009.

LEE T., CHUNG K., CHANG H., **A new implicit dynamic finite element analysis procedure with damping included.** Engineering Structures, v.147, p. 530-544, 2017.

LI D., CHENG X., HUANG T., WEI R., HAN N., XING F., **A simplified constitutive model for corroded steel bars.** Construction and Building Materials, v.186, p. 11-19, 2017.

LIN J., ZHANG J., GUO P., WANG K. **A mathematical model for coupled vibration system of road vehicle and coupling effect analysis.** Applied Mathematical Modelling, v.40, p. 1199-1217, 2015.

LOGAN D. **A First Course in the Finite Element Method.** University of Wisconsin-Platteville, 5^a ed., 2012.

NAEIM C., ANDERSON C. A. **Basic Structural Dynamics.** John Wiley & Sons, 2012.

SAUOMA V. E. **Matrix structural analysis with an introduction to finite elements.** CEAE - University of Colorado, 1999

STOJANOVIC V., PETKOVIC M. D., MILIC D., **Nonlinear vibrations of a coupled beam-arch bridge system.** Journal of Sound and Vibration, v.464, 2020.

Table of design material properties for structural steel. **Eurocode Applied.** Disponível em: <<https://eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties/>>, Acesso em: 18 de Agosto de 2021.

WALSH, T. **Power station collapse.** Disponível em: <www.lithgowmercury.com.au/story/1268492/power-station-collapse/>, Acesso em: 20 de Junho de 2020

What Is Evaporative Cooling?. **SPX Cooling.** Disponível em: <<https://spxcooling.com/evaporative-cooling-drives-cooling-tower-process/>>, Acesso

em: 20 de Outubro de 2021.

WIERZBICKI T. Lecture 12: Fundamental Concepts in Structural Plasticity.

Disponível em: <https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-080j-structural-mechanics-fall-2013/course-notes/MIT2_080JF13_Lecture12.pdf>, Acesso em: 02 de Julho de 2020

XIONG C., ZENG C., LI Y., LI L., LI P., LI D., The Constitutive Relationship for Corroded Steel Bars: Model and Analysis. Materials, v.12, 2019.

ZHOU S., LI. Y., REN Z., SONG, G., WEN B., Nonlinear dynamic analysis of a unilateral vibration vehicle system with structural nonlinearity under harmonic excitation. Mechanical Systems and Signal Processing, v.116, p. 751-771, 2019.

APÊNDICE A – PADRÃO DE ARQUIVO DE ENTRADA

Nesta seção é apresentado o formato do arquivo de entrada para simulação da estrutura, constituído pelos dados utilizados pelo conjunto de rotinas, no caso para o aço inox 304 com efeito de corrosão.

```

=====
= Arquivo de entrada quanto a estrutura a ser analisada =
=====
=====
= Tipo de elemento
= Entrada e_tipo, segundo numeração dos elementos
= "0" mola
= "1" barra
= "2" amortecedor
=====
=== e_tipo elemento 1: 1
=== e_tipo elemento 2: 1
=== e_tipo elemento 3: 1
=== e_tipo elemento 4: 1
=== e_tipo elemento 5: 1
=== e_tipo elemento 6: 1
=== e_tipo elemento 7: 1
=== e_tipo elemento 8: 1
=== e_tipo elemento 9: 1
=== e_tipo elemento 10: 1
=== e_tipo elemento 11: 1
=== e_tipo elemento 12: 1
=== e_tipo elemento 13: 1
=== e_tipo elemento 14: 1
=== e_tipo elemento 15: 1
=== e_tipo elemento 16: 1
=== e_tipo elemento 17: 1
=== e_tipo elemento 18: 1
=== e_tipo elemento 19: 1
=== e_tipo elemento 20: 1
=== e_tipo elemento 21: 1
=== e_tipo elemento 22: 1
=== e_tipo elemento 23: 1
=== e_tipo elemento 24: 1
=== e_tipo elemento 25: 1
=== e_tipo elemento 26: 1
=== e_tipo elemento 27: 1
=== e_tipo elemento 28: 1
=== e_tipo elemento 29: 1
=== e_tipo elemento 30: 1
=== e_tipo elemento 31: 1
=== e_tipo elemento 32: 1
=== e_tipo elemento 33: 1
=== e_tipo elemento 34: 1
=== e_tipo elemento 35: 1
=== e_tipo elemento 36: 1
=== e_tipo elemento 37: 1
=== e_tipo elemento 38: 1
=== e_tipo elemento 39: 1
=== e_tipo elemento 40: 1

```



```

=== e_tipo elemento 41: 1
=== e_tipo elemento 42: 1
=== e_tipo elemento 43: 1
=== e_tipo elemento 44: 1

```

```

=====
= Coordenadas nós
= Entrar de acordo com a numeração adotada
=====

```

```

=== No 1: (0.0,0.0,0.0)
=== No 2: (3.0,0.0,0.0)
=== No 3: (3.0,3.0,0.0)
=== No 4: (0.0,3.0,0.0)
=== No 5: (0.0,0.0,2.1)
=== No 6: (3.0,0.0,2.1)
=== No 7: (3.0,3.0,2.1)
=== No 8: (0.0,3.0,2.1)
=== No 9: (0.0,0.0,4.3)
=== No 10: (3.0,0.0,4.3)
=== No 11: (3.0,3.0,4.3)
=== No 12: (0.0,3.0,4.3)
=== No 13: (0.0,0.0,8.05)
=== No 14: (3.0,0.0,8.05)
=== No 15: (3.0,3.0,8.05)
=== No 16: (0.0,3.0,8.05)

```

```

=====
= Vínculo entre nós
= Numeração adotada para constituir elementos
= Cada linha representa no_i e no_j do elemento
=====

```

```

=== Vínculo elemento 1: 1 | Vínculo 2: 4
=== Vínculo elemento 2: 1 | Vínculo 2: 2
=== Vínculo elemento 3: 2 | Vínculo 2: 3
=== Vínculo elemento 4: 3 | Vínculo 2: 4
=== Vínculo elemento 5: 1 | Vínculo 2: 3
=== Vínculo elemento 6: 1 | Vínculo 2: 8
=== Vínculo elemento 7 1 | Vínculo 2: 5
=== Vínculo elemento 8: 1 | Vínculo 2: 6
=== Vínculo elemento 9: 2 | Vínculo 2: 6
=== Vínculo elemento 10: 3 | Vínculo 2: 6
=== Vínculo elemento 11: 3 | Vínculo 2: 7
=== Vínculo elemento 12: 3 | Vínculo 2: 8
=== Vínculo elemento 13: 4 | Vínculo 2: 8
=== Vínculo elemento 14: 5 | Vínculo 2: 8
=== Vínculo elemento 15: 5 | Vínculo 2: 6
=== Vínculo elemento 16: 6 | Vínculo 2: 7
=== Vínculo elemento 17: 7 | Vínculo 2: 8
=== Vínculo elemento 18: 6 | Vínculo 2: 8
=== Vínculo elemento 19: 5 | Vínculo 2: 9
=== Vínculo elemento 20: 6 | Vínculo 2: 9
=== Vínculo elemento 21: 6 | Vínculo 2: 10
=== Vínculo elemento 22: 6 | Vínculo 2: 11
=== Vínculo elemento 23: 7 | Vínculo 2: 11
=== Vínculo elemento 24: 8 | Vínculo 2: 11
=== Vínculo elemento 25: 8 | Vínculo 2: 12
=== Vínculo elemento 26: 8 | Vínculo 2: 9
=== Vínculo elemento 27: 9 | Vínculo 2: 12
=== Vínculo elemento 28: 9 | Vínculo 2: 10
=== Vínculo elemento 29: 10 | Vínculo 2: 11

```

=== Vinculo elemento 30: 11 | Vinculo 2: 12
=== Vinculo elemento 31: 9 | Vinculo 2: 11
=== Vinculo elemento 32: 9 | Vinculo 2: 16
=== Vinculo elemento 33: 9 | Vinculo 2: 13
=== Vinculo elemento 34: 9 | Vinculo 2: 14
=== Vinculo elemento 35: 10 | Vinculo 2: 14
=== Vinculo elemento 36: 11 | Vinculo 2: 14
=== Vinculo elemento 37: 11 | Vinculo 2: 15
=== Vinculo elemento 38: 11 | Vinculo 2: 15
=== Vinculo elemento 39: 12 | Vinculo 2: 16
=== Vinculo elemento 40: 13 | Vinculo 2: 16
=== Vinculo elemento 41: 13 | Vinculo 2: 14
=== Vinculo elemento 42: 14 | Vinculo 2: 15
=== Vinculo elemento 43: 15 | Vinculo 2: 16
=== Vinculo elemento 44: 14 | Vinculo 2: 16

=====

= Propriedades de material das barras

= Entrada coeficiente densidade, segundo numeração dos elementos

=====

=== dens elemento 1: 7965
=== dens elemento 2: 7965
=== dens elemento 3: 7965
=== dens elemento 4: 7965
=== dens elemento 5: 7965
=== dens elemento 6: 7965
=== dens elemento 7: 7965
=== dens elemento 8: 7965
=== dens elemento 9: 7965
=== dens elemento 10: 7965
=== dens elemento 11: 7965
=== dens elemento 12: 7965
=== dens elemento 13: 7965
=== dens elemento 14: 7965
=== dens elemento 15: 7965
=== dens elemento 16: 7965
=== dens elemento 17: 7965
=== dens elemento 18: 7965
=== dens elemento 19: 7965
=== dens elemento 20: 7965
=== dens elemento 21: 7965
=== dens elemento 22: 7965
=== dens elemento 23: 7965
=== dens elemento 24: 7965
=== dens elemento 25: 7965
=== dens elemento 26: 7965
=== dens elemento 27: 7965
=== dens elemento 28: 7965
=== dens elemento 29: 7965
=== dens elemento 30: 7965
=== dens elemento 31: 7965
=== dens elemento 32: 7965
=== dens elemento 33: 7965
=== dens elemento 34: 7965
=== dens elemento 35: 7965
=== dens elemento 36: 7965
=== dens elemento 37: 7965
=== dens elemento 38: 7965
=== dens elemento 39: 7965

=== dens elemento 40: 7965
=== dens elemento 41: 7965
=== dens elemento 42: 7965
=== dens elemento 43: 7965
=== dens elemento 44: 7965

=====
= Propriedades de material das barras
= Entrada coeficiente E, segundo numeração dos elementos

=====
=== E elemento 1: 196000000000
=== E elemento 2: 196000000000
=== E elemento 3: 196000000000
=== E elemento 4: 196000000000
=== E elemento 5: 196000000000
=== E elemento 6: 196000000000
=== E elemento 7: 196000000000
=== E elemento 8: 196000000000
=== E elemento 9: 196000000000
=== E elemento 10: 196000000000
=== E elemento 11: 196000000000
=== E elemento 12: 196000000000
=== E elemento 13: 196000000000
=== E elemento 14: 196000000000
=== E elemento 15: 196000000000
=== E elemento 16: 196000000000
=== E elemento 17: 196000000000
=== E elemento 18: 196000000000
=== E elemento 19: 196000000000
=== E elemento 20: 196000000000
=== E elemento 21: 196000000000
=== E elemento 22: 196000000000
=== E elemento 23: 196000000000
=== E elemento 24: 196000000000
=== E elemento 25: 196000000000
=== E elemento 26: 196000000000
=== E elemento 27: 196000000000
=== E elemento 28: 196000000000
=== E elemento 29: 196000000000
=== E elemento 30: 196000000000
=== E elemento 31: 196000000000
=== E elemento 32: 196000000000
=== E elemento 33: 196000000000
=== E elemento 34: 196000000000
=== E elemento 35: 196000000000
=== E elemento 36: 196000000000
=== E elemento 37: 196000000000
=== E elemento 38: 196000000000
=== E elemento 39: 196000000000
=== E elemento 40: 196000000000
=== E elemento 41: 196000000000
=== E elemento 42: 196000000000
=== E elemento 43: 196000000000
=== E elemento 44: 196000000000

=====
= Propriedades de tensao de escoamento
= Entrada tensao escoamento, segundo numeração dos elementos

=====
=== ten_esco elemento 1: 250000000

```
=== ten_esco elemento 2: 250000000
=== ten_esco elemento 3: 250000000
=== ten_esco elemento 4: 250000000
=== ten_esco elemento 5: 250000000
=== ten_esco elemento 6: 250000000
=== ten_esco elemento 7: 250000000
=== ten_esco elemento 8: 250000000
=== ten_esco elemento 9: 250000000
=== ten_esco elemento 10: 250000000
=== ten_esco elemento 11: 250000000
=== ten_esco elemento 12: 250000000
=== ten_esco elemento 13: 250000000
=== ten_esco elemento 14: 250000000
=== ten_esco elemento 15: 250000000
=== ten_esco elemento 16: 250000000
=== ten_esco elemento 17: 250000000
=== ten_esco elemento 18: 250000000
=== ten_esco elemento 19: 250000000
=== ten_esco elemento 20: 250000000
=== ten_esco elemento 21: 250000000
=== ten_esco elemento 22: 250000000
=== ten_esco elemento 23: 250000000
=== ten_esco elemento 24: 250000000
=== ten_esco elemento 25: 250000000
=== ten_esco elemento 26: 250000000
=== ten_esco elemento 27: 250000000
=== ten_esco elemento 28: 250000000
=== ten_esco elemento 29: 250000000
=== ten_esco elemento 30: 250000000
=== ten_esco elemento 31: 250000000
=== ten_esco elemento 32: 250000000
=== ten_esco elemento 33: 250000000
=== ten_esco elemento 34: 250000000
=== ten_esco elemento 35: 250000000
=== ten_esco elemento 36: 250000000
=== ten_esco elemento 37: 250000000
=== ten_esco elemento 38: 250000000
=== ten_esco elemento 39: 250000000
=== ten_esco elemento 40: 250000000
=== ten_esco elemento 41: 250000000
=== ten_esco elemento 42: 250000000
=== ten_esco elemento 43: 250000000
=== ten_esco elemento 44: 250000000
```

```
=====
= Propriedades de geometria das barras
```

```
= Entrada diâmetros das barras de acordo c/ numeração elementos
```

```
=====
=== Diametro elemento 1: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 2: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 3: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 4: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 5: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 6: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 7: 0.100355990348634
=== Diametro elemento 8: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 9: 0.100355990348634
=== Diametro elemento 10: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 11: 0.100355990348634
```

```

=== Diametro elemento 12: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 13: 0.100355990348634
=== Diametro elemento 14: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 15: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 16: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 17: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 18: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 19: 0.100355990348634
=== Diametro elemento 20: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 21: 0.100355990348634
=== Diametro elemento 22: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 23: 0.100355990348634
=== Diametro elemento 24: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 25: 0.100355990348634
=== Diametro elemento 26: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 27: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 28: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 29: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 30: 0.0391288966435809
=== Diametro elemento 31: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 32: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 33: 0.100355990348634
=== Diametro elemento 34: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 35: 0.100355990348634
=== Diametro elemento 36: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 37: 0.100355990348634
=== Diametro elemento 38: 0.0156250978461886
=== Diametro elemento 39: 0.100355990348634
=== Diametro elemento 40: 0.108465355728698
=== Diametro elemento 41: 0.108465355728698
=== Diametro elemento 42: 0.108465355728698
=== Diametro elemento 43: 0.108465355728698
=== Diametro elemento 44: 0.0156250978461886

```

```

=====
= Propiedades do elemento tipo mola

```

```

= Entrada coeficiente k

```

```

=====
=== mola const elemento 1: 0
=== mola const elemento 2: 0
=== mola const elemento 3: 0
=== mola const elemento 4: 0
=== mola const elemento 5: 0
=== mola const elemento 6: 0
=== mola const elemento 7: 0
=== mola const elemento 8: 0
=== mola const elemento 9: 0
=== mola const elemento 10: 0
=== mola const elemento 11: 0
=== mola const elemento 12: 0
=== mola const elemento 13: 0
=== mola const elemento 14: 0
=== mola const elemento 15: 0
=== mola const elemento 16: 0
=== mola const elemento 17: 0
=== mola const elemento 18: 0
=== mola const elemento 19: 0
=== mola const elemento 20: 0
=== mola const elemento 21: 0

```

=== mola const elemento 22: 0
=== mola const elemento 23: 0
=== mola const elemento 24: 0
=== mola const elemento 25: 0
=== mola const elemento 26: 0
=== mola const elemento 27: 0
=== mola const elemento 28: 0
=== mola const elemento 29: 0
=== mola const elemento 30: 0
=== mola const elemento 31: 0
=== mola const elemento 32: 0
=== mola const elemento 33: 0
=== mola const elemento 34: 0
=== mola const elemento 35: 0
=== mola const elemento 36: 0
=== mola const elemento 37: 0
=== mola const elemento 38: 0
=== mola const elemento 39: 0
=== mola const elemento 40: 0
=== mola const elemento 41: 0
=== mola const elemento 42: 0
=== mola const elemento 43: 0
=== mola const elemento 44: 0

=====
= Propriedades do elemento tipo amortecedor
= Entrada coeficiente amort

=====
=== amortconst elemento 1: 0
=== amort const elemento 2: 0
=== amort const elemento 3: 0
=== amort const elemento 4: 0
=== amort const elemento 5: 0
=== amort const elemento 6: 0
=== amort const elemento 7: 0
=== amort const elemento 8: 0
=== amort const elemento 9: 0
=== amort const elemento 10: 0
=== amort const elemento 11: 0
=== amort const elemento 12: 0
=== amort const elemento 13: 0
=== amort const elemento 14: 0
=== amort const elemento 15: 0
=== amort const elemento 16: 0
=== amort const elemento 17: 0
=== amortconstelemento 18: 0
=== amort const elemento 19: 0
=== amort const elemento 20: 0
=== amort const elemento 21: 0
=== amort const elemento 22: 0
=== amort const elemento 23: 0
=== amort const elemento 24: 0
=== amort const elemento 25: 0
=== amort const elemento 26: 0
=== amort const elemento 27: 0
=== amort const elemento 28: 0
=== amort const elemento 29: 0
=== amort const elemento 30: 0
=== amort const elemento 31: 0

```

=== amort const elemento 32: 0
=== amort const elemento 33: 0
=== amort const elemento 34: 0
=== amort const elemento 35: 0
=== amort const elemento 36: 0
=== amort const elemento 37: 0
=== amort const elemento 38: 0
=== amort const elemento 39: 0
=== amort const elemento 40: 0
=== amort const elemento 41: 0
=== amort const elemento 42: 0
=== amort const elemento 43: 0
=== amort const elemento 44: 0

```

```

=====
= Condições de contorno da estrutura
= Listagem gdl com restrição
= "0" c/ restrição
= "1" s/ restrição
=====

```

```

=== node: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 0
=== node: 2
=== rest. gdl: 0
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 0
=== node: 3
=== rest. gdl: 0
=== rest. gdl: 0
=== rest. gdl: 0
=== node: 4
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 0
=== rest. gdl: 0
=== node: 5
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== node: 6
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== node: 7
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== node: 8
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== node: 9
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== node: 10
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1

```

```

=== rest. gdl: 1
=== node: 11
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== node: 12
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== node: 13
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== node: 14
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== node: 15
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== node: 16
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1
=== rest. gdl: 1

```

```

=====
= Condiçoes de contorno da estrutura
= Listagem gdl no com força aplicada
= "0" s/ aplicacao
= "1" c/ aplicacao
=====

```

```

=== node_f: 13
=== forcagdl: 19
=== forcagdl: 15
=== forcagdl: 0
=== node_f: 14
=== forcagdl: 0
=== forcagdl: 15
=== forca gdl: 0
=== node_f: 15
=== forcagdl: 0
=== forcagdl: 15
=== forca gdl: 0
=== node_f: 16
=== forcagdl: 19
=== forcagdl: 15
=== forca gdl: 0

```

```

=====
= Condiçoes de aplicação de massas pontuais
= Listagem nó com massa aplicada
=====

```

```

=== massa pontual node 1: 0
=== massa pontual node 2: 0
=== massa pontual node 3: 0
=== massa pontual node 4: 0
=== massa pontual node 5: 0
=== massa pontual node 6: 0
=== massa pontual node 7: 0

```



```

=== massa pontual node 8: 0
=== massa pontual node 9: 0
=== massa pontual node 10: 0
=== massa pontual node 11: 0
=== massa pontual node 12: 0
=== massa pontual node 13: 385.9
=== massa pontual node 14: 385.9
=== massa pontual node 15: 385.9
=== massa pontual node 16: 385.9

```

```

=====
= Condições de aplicação de tempo
=====

```

```

=== tempo inicial: 0
=== tempo final: 40
=== incremento de tempo: 0.15
=====

```

APÊNDICE B – RESPOSTA SOB EFEITO DE CORROSÃO (INOX 304)

