

**CEFET/RJ - CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PEDRO HENRIQUE SOARES LOPES**

**GUILHERME FREIRE DE ARRUDA**

**ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM CURVAMENTO DE ARAME  
DE ARMADURA DE RISER FLEXÍVEL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RIO DE JANEIRO**

**2023**



**PEDRO HENRIQUE SOARES LOPES**

**GUILHERME FREIRE DE ARRUDA**

**ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM CURVAMENTO DE ARAME  
DE ARMADURA DE RISER FLEXÍVEL**

Trabalho de conclusão de curso para obtenção de grau no curso de Engenharia Mecânica no CEFET/RJ do Maracanã em que se apresenta com a Análise de Tensões Residuais em Curvamento do Arame de Armadura de Riser Flexível.

Professor Orientador: Paulo Pedro Kenedi

**RIO DE JANEIRO**

**2023**



Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

L864 Lopes, Pedro Henrique Soares

Análise de tensões residuais em curvamento de arame de armadura de riser flexível / Pedro Henrique Soares Lopes [e] Guilherme Freire de Arruda – 2023.  
44f.: il (algumas color.) , enc.

Educação  
Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.  
Bibliografia: f. 43-44.  
Orientador: Paulo Pedro Kenedi.

estrutural  
Paulo  
1. Engenharia mecânica. 2. Engenharia de materiais.  
3. Tubulação offshore. 4. Materiais – Fadiga. 5. Análise (Engenharia). I. Arruda, Guilherme Freire de. II. Kenedi, Paulo (Orient.). III. Título.

CDD 620.1

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281



## RESUMO

O mercado offshore é fundamental para a economia brasileira, gerando empregos e oportunidades em setores como exploração de petróleo e gás, energia renovável e construção naval. A pesquisa e o desenvolvimento tecnológico são essenciais para impulsionar o crescimento, melhorar a eficiência e garantir a sustentabilidade dessas atividades. A colaboração entre empresas e instituições de ensino é importante para formar profissionais capacitados e promover a inovação, impulsionando a competitividade do setor e contribuindo para o desenvolvimento do país. Nesse contexto, focando na área de exploração de petróleo e gás offshore, o trabalho se propõe modelar a distribuição das tensões residuais geradas em arames de armadura de *riser* flexível através de curvamentos sequenciais impostos utilizando o método dos elementos finitos. Os resultados preliminares mostram que os curvamentos sequenciais alternados, de curvatura cada vez maiores, geram regiões escoadas cada vez menores, resultando em distribuições de tensões residuais cada vez de menor amplitude, na seção transversal do arame da armadura de tração.

Palavras-chave: *riser* flexível, tensões residuais, curvamentos sequenciais, elementos finitos.



## **ABSTRACT**

The offshore market is fundamental to the Brazilian economy, generating jobs and opportunities in sectors such as oil and gas exploration, renewable energy, and shipbuilding. Research and technological development are essential for the growth, improve efficiency and ensure the sustainability of these activities. Collaboration between companies and educational institutions is important to train qualified professionals and promote innovation, boosting the sector's competitiveness and contributing to the country's development. In this context, focusing on the area of offshore oil and gas exploration, the work proposes to model the residual stresses distribution, generated in flexible riser tensile wires through sequential imposed curvatures, using finite element method. Preliminary results show that alternating sequential curvatures, increasing the curvatures, generate progressively smaller yield regions, resulting in residual stress distributions of increasingly smaller amplitude, in the cross-section of the tensile wires.

Keywords: flexible riser, residual stresses, sequential imposed curvatures, finite element.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas de um riser flexível.....	2
Figura 2 - Processo de deformação por rebobinamento. ....	2
Figura 3 - Enrolamento dos arames na máquina de armadura de tração. ....	3
Figura 4 - Máquina bobinadeira.....	3
Figura 5 - Carretel de Riser Flexível.....	4
Figura 6 - Representação do método por Difração de Nêutrons.....	6
Figura 7 – Método do Contorno.....	7
Figura 8 - Difração de raio x por planos atômicos (A-A' e B-B'). ....	8
Figura 9 - Viga submetida a momento fletor puro. ....	10
Figura 10 - Seção transversal retangular parcialmente plastificada. ....	11
Figura 11 - Curva Tensão vs Deformação de um material EPP.....	11
Figura 12 - Curva Tensão x Deformação de um material ECE. ....	12
Figura 13 - Viga submetida a Flexão: (a) carregamento e (b) descarregamento. ....	14
Figura 14 - Gráfico tensão vs deformação para dois pontos da viga. ....	15
Figura 15 - Distribuição na seção transversal das tensões normais da viga, submetida à flexão pouco severa: (a) o carregamento, (b) o springback e (c) as tensões residuais. ....	16
Figura 16 - Distribuição na seção transversal das tensões normais da viga, submetida à flexão muito severa: (a) o carregamento, (b) o springback e (c) as tensões residuais. ....	16
Figura 17 - Desenho da seção transversal do arame de armadura de <i>riser</i> estudado. ....	17
Figura 18 – Propriedades geométricas, tela do ANSYS.....	18
Figura 19 - Encruamento Isotrópico. Fonte: LEMAITRE e CHABOCHE, 1994. ....	19
Figura 20 - Encruamento Cinemático.....	20
Figura 21 - Modelo numérico analisado. ....	21
Figura 22 - Simetria do modelo numérico. ....	22
Figura 23 - Identificação dos Contatos.....	23
Figura 24 - Malha gerada. ....	23
Figura 25 - Distribuições de tensões longitudinais utilizando o comando Path, ao final do deslocamento transversal de 30 mm.....	25
Figura 26 - Ponto $y = -c$ da seção transversal do <i>path</i> . ....	25



Figura 27 - Gráfico de deslocamento do rolete superior, para o caso 1.....	27
Figura 28 - Gráfico de deslocamento do rolete inferior, para o caso 1.....	27
Figura 29 - Geometria inicial do caso 1.....	27
Figura 30 - Gráfico de deslocamento do <i>former</i> superior, para o caso 1. ....	28
Figura 31 - Gráfico de deslocamento do <i>former</i> inferior, para o caso 1. ....	28
Figura 32 - Deslocamento ao final do 1º ciclo do caso 1.....	29
Figura 33 - Tensões normais ao final do 1º ciclo do caso 1. ....	29
Figura 34 - Tensão vs Deformação para o caso 1, para $y = -c$ . ....	30
Figura 35 - Comparação entre modelo analítico e numérico no primeiro ciclo, para o caso 1.....	31
Figura 36 - Gráfico $y$ vs $\sigma_{\text{residual}}$ ao final de cada um dos três ciclos, para o caso 1. ....	32
Figura 37 - Geometria inicial do caso 2.....	33
Figura 38 - Gráfico de deslocamento do <i>former</i> superior, para o caso 2. ....	34
Figura 39 - Gráfico de deslocamento do <i>former</i> inferior, para o caso 2. ....	34
Figura 40 - Gráfico de deslocamento do rolete superior, para o caso 2.....	34
Figura 41 – Gráfico de deslocamento do rolete inferior, para o caso 2. ....	35
Figura 42 - Deslocamento ao final do 1º ciclo do caso 2.....	36
Figura 43 - Tensões normais ao final do 1º ciclo do caso 2. ....	36
Figura 44 - Tensão vs Deformação para o caso 2, para $y = -c$ . ....	37
Figura 45 - Comparação entre modelo analítico e numérico no primeiro ciclo, para o caso 2.....	38
Figura 46 - Gráfico $y$ vs $\sigma_{\text{residual}}$ ao final de cada um dos três ciclos, para o caso 2. ....	39
Figura 47 - Tensões vs ciclos, para $y = -c$ .....	40
Figura 48 - Deformações vs ciclo, para $y = -c$ . ....	41



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados geométricos de entrada .....	17
Tabela 2 - Propriedades mecânicas nominais do aço SAE 1065.....	18
Tabela 3 - Convergência de malha .....	24





## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS .....	5
2.1.1	Difração de Nêutrons .....	5
2.1.2	Método do Contorno .....	6
2.1.3	Difração de Raio X .....	7
2.1.4	Método do Furo Cego .....	8
2.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....	9
3	MODELO ANALÍTICO BÁSICO .....	10
3.1	EQUAÇÕES CONSTRUTIVAS.....	11
3.2	ANÁLISES DE MOMENTO FLETOR E DEFORMAÇÃO NA ZONA PLASTIFICADA .....	12
4	MODELO NUMÉRICO .....	17
4.1	DADOS INICIAIS .....	17
4.2	MODELO 3D.....	18
4.3	ENCRUAMENTO.....	19
4.3.1	Encruamento Isotrópico.....	19
4.3.2	Encruamento Cinemático.....	20
4.4	MODELO ANALISADO .....	21
4.5	SIMETRIA .....	21
4.6	CONTATOS.....	22
4.7	MALHA.....	23
4.8	SEÇÃO TRANSVERSAL ANALISADA .....	25
4.9	PRIMEIRO CASO.....	26
4.9.1	Condição de contorno .....	26
4.9.2	Carregamentos .....	28
4.9.3	Resultados .....	29
4.10	SEGUNDO CASO .....	32
4.10.1	Condições de Contorno.....	33
4.10.2	Carregamento.....	33
4.10.3	Resultados .....	35
5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	40



6	CONCLUSÃO .....	42
7	REFERÊNCIAS .....	43



## 1 INTRODUÇÃO

Tubos flexíveis (também chamados de *risers* flexíveis) são preferidos para operações de transferência do petróleo em detrimento dos tubos rígidos (também chamados de *risers* rígidos) visto que o primeiro permite maior confiabilidade, menor custo e maior flexibilidade na instalação.

Na Figura 1 mostra-se as camadas que compõem um *riser* flexível. Os arames de armadura (objeto de estudo), posicionados em forma helicoidal, resistem as cargas de tração, flexão e torção. As camadas do arame são montadas por enrolamento paralelo dos vários arames, de seção retangular, com baixo ângulo de hélice, entre 30° a 50°. As camadas do arame são montadas em duas camadas superpostas em direções de hélice opostas para suportar a força axial, a torção e flexão, mantendo a flexibilidade ao curvamento para a instalação e operação do tubo flexível.

Os tubos flexíveis, que têm uma das extremidades presa a um equipamento fixo do solo marinho (Hub da ANM) e a outra extremidade presa a um FPSO, estão sujeitos a vários movimentos dinâmicos, onde correntezas que ocorrem em diversas profundidades, e em diversas direções, aliado ao movimento natural do navio em que o tubo flexível está ligado, induz cargas fletoras, além da carga axial extremamente grande, que torna os arames da armadura sujeitos à falha por fadiga. Na extremidade ligada ao navio FPSO a severidade do esforço axial sofrido pela tubulação flexível é máxima, em função do peso próprio da tubulação.

Na fabricação dos arames de armadura, estes já sofrem grandes esforços decorrentes da laminação, que geram tensões e deformações plásticas, e por conseguinte, as tensões residuais. Estas tensões já formadas na fabricação, se somam as tensões que são geradas no transporte, instalação e operação da tubulação flexível.

Estimar a distribuição dessas tensões residuais geradas na seção transversal do arame de armadura não é trivial. Pode-se recorrer a modelos analíticos simplificados, como o mostrado no capítulo 3, modelos numéricos, com o uso de *software* de elementos finitos (EF), como mostrado no capítulo 4 ou mesmo abordagens experimentais, como as mostradas no capítulo 2, de revisão bibliográfica.

Os arames de armadura são fabricados em aço carbono conformados pela laminação a quente e posteriormente por laminação a frio até adquirir o formato desejado. Os arames de armadura são enrolados em bobinas pelos fornecedores para transporte até o cliente.

A Figura 1 mostra a nomenclatura de cada elemento que faz parte de um tubo flexível.



Figura 1 - Camadas de um *riser* flexível.

Fonte: Melo (2022).

Os arames de armadura quando recebidos, são desenrolados das bobinas dos fabricantes e reenrolados nas bobinas da máquina bobinadeira, como mostrado na Figura 2.

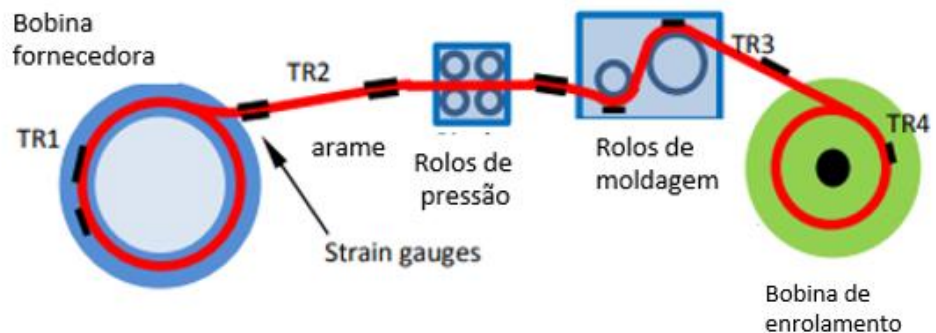
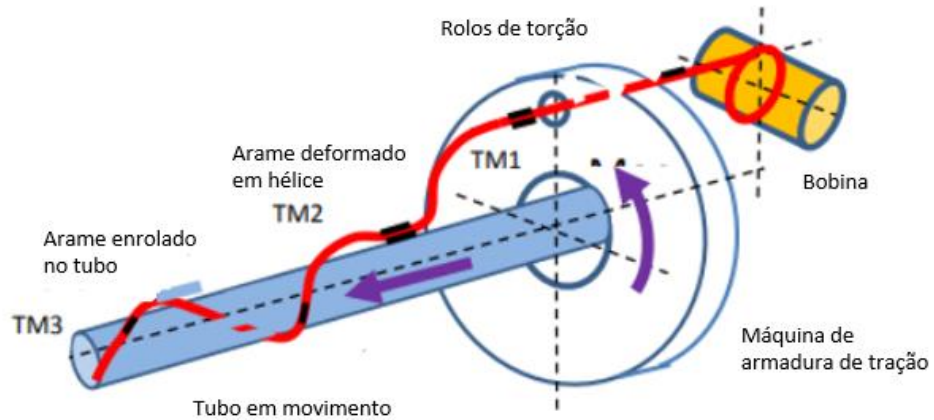


Figura 2 - Processo de deformação por rebobinamento.

Fonte: OMAE2017-61490.

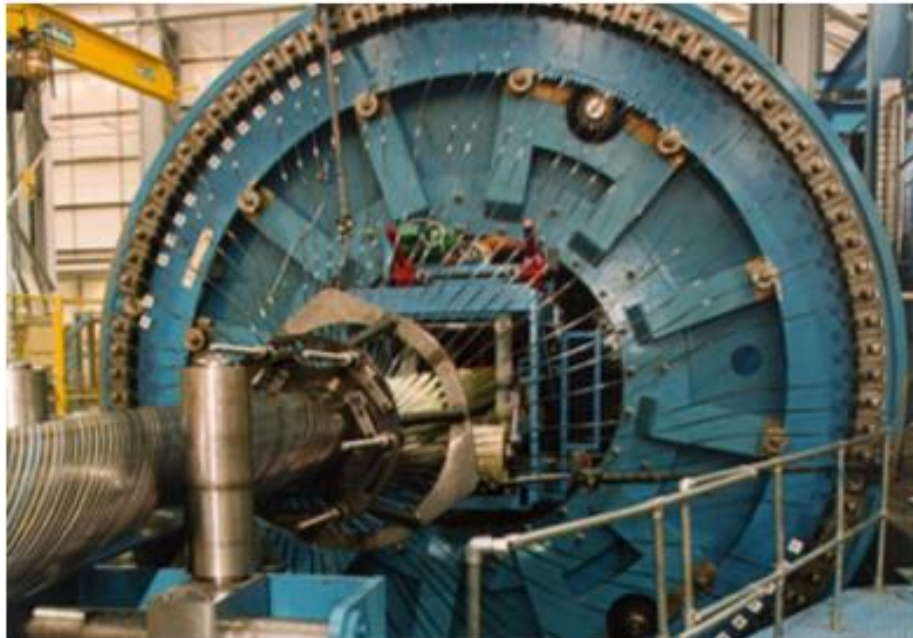
Os arames de armadura são então assentados, de forma helicoidal, formando uma das camadas de um tubo flexível, como mostrado esquematicamente na Figura 3.



**Figura 3 - Enrolamento dos arames na máquina de armadura de tração.**

Fonte: OMAE2017-61490.

A Figura 4 mostra uma foto de uma bobinadeira.



**Figura 4 - Máquina bobinadeira.**

Fonte: OMAE2017-61490.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo propõe abordar os métodos de medição experimental de tensões residuais existentes, como abordagens complementares aos modelos analítico e numérico propostos neste trabalho.

Tensões residuais são tensões internas que permanecem em um material após a remoção de forças externas. Elas podem ser compressivas ou trativas geradas por deformações excessivas, variações de temperatura ou processos de fabricação. As tensões residuais podem afetar o comportamento do material, podendo causar deformações indesejadas, empenamento ou falhas prematuras. O gerenciamento adequado das tensões residuais é fundamental para garantir a integridade e o bom desempenho dos equipamentos.

Há uma conexão direta entre as tensões residuais e a plasticidade, onde esse tipo de tensão ocorre apenas em situações em que o material sofre prévia deformação plástica. No caso de arames de armadura de tração de tubos flexíveis, tal plasticidade ocorre, por exemplo, durante o curvamento da linha, tanto em operação, quanto nos momentos em que é enrolada e desenrolada para o transporte, onde é utilizado um “carretel” para esse fim, como o mostrado na Figura 5.



**Figura 5 - Carretel de Riser Flexível.**

**Fonte: Maritime Developments, acesso em 22/06/2023.**

## 2.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Neste item são apresentados alguns métodos de medição experimental das tensões residuais, mostrando as principais vantagens e limitações de cada método.

### 2.1.1 Difração de Nêutrons

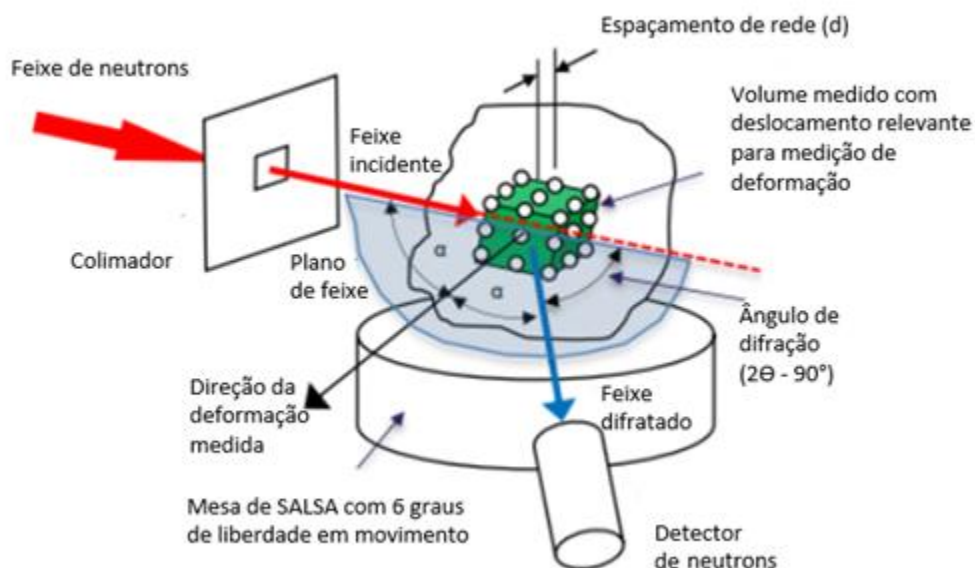
O método de difração de nêutrons, necessita da medição entre os planos cristalográficos para inferir um valor de tensão residual. Quando um feixe monocromático de nêutrons com um comprimento de onda  $\lambda$  incide sobre o material, de acordo com a lei de Bragg, cria um pico de difração em um ângulo de dispersão específico. O espaçamento da rede cristalina do material pode ser calculado a partir do ângulo de dispersão:

$$d \cdot 2\sin\theta = \lambda \quad (1)$$

Onde  $d$  é o espaçamento da rede do material,  $\theta$  é o ângulo de dispersão. As deformações causam mudança no espaçamento entre os planos cristalográficos do material e assim uma mudança na difração do ângulo incidente pode ser estimada como a mudança do plano cristalino do caso sem tensão ( $d_0$ ) e assim pode ser interpretado como deformação no material ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = \frac{d-d_0}{d_0} = \frac{\sin\theta_0}{\theta} - 1 \quad (2)$$

Onde  $\theta_0$  é o ângulo de dispersão inicial. A direção da deformação medida divide ao meio o ângulo entre os feixes incidentes e difratados como mostra a Figura 6:



**Figura 6 - Representação do método por Difração de Nêutrons.**

**Fonte: OMAE2017-61490.**

A boa penetração na espessura da peça e a seletiva absorção de nêutrons fazem deste método uma boa alternativa para se medir tensões residuais em arames de armadura de *riser* flexível.

### 2.1.2 Método do Contorno

Este tipo de método tem a vantagem de ser uma técnica relativamente barata e capaz de realizar medições em geometria não uniforme, ou seja, aquelas em que apresentam complexidade em sua forma.

O teste basicamente consiste em um corte que é feito na seção transversal da peça e em seguida é medido os deslocamentos perpendiculares à superfície de corte que são originados pelo relaxamento das tensões residuais pré-existentes.

A Figura 7 mostra o sequenciamento do método do contorno. O passo “A” mostra a distribuição de tensões residuais na seção de uma peça. Em seguida, no passo “B”, o corte é feito tirando o mínimo de material possível, geralmente um corte



por eletroerosão, em que há um relaxamento elástico na seção de corte. No passo “C”, são medidos os deslocamentos da peça, que se relacionam indiretamente com a distribuição de tensões residuais existente. A Figura 7 mostra uma variação deste método.

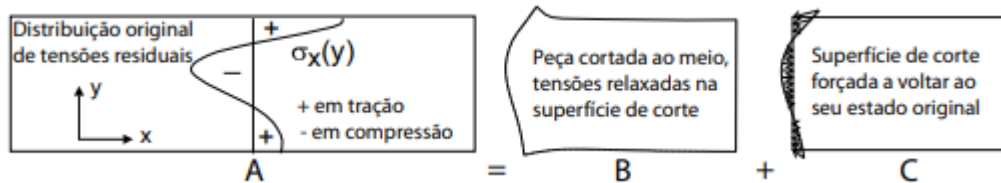


Figura 7 – Método do Contorno.

Fonte: Luiz (2021).

### 2.1.3 Difração de Raio X

O método consiste na medição indireta de tensões residuais por meio da medição do espaçamento entre os planos da rede cristalina dos materiais por meio de feixes estreitos de raio x. Por razão da absorção de raio x pela peça estudada, a técnica é limitada às regiões próximas à superfície.

Segundo a lei de Bragg, quando um material está tensionado, as deformações elásticas são refletidas na rede cristalina dos grãos individuais. Já a deformação no plano inter atômico se dá quando a tensão externa ou residual é menor que o limite de escoamento. A difração de raio x permite medir o espaçamento inter atômico, os quais indicam as macros tensões às quais o material está sujeito.

A Figura 8 mostra os feixes de um raio x paralelos, monocromáticos e coerentes com um comprimento de onda  $\lambda$ , o índice em dois planos com ângulo  $\theta$ , dois raios desse feixe identificados por 1 e 2 são espalhados pelos átomos P e Q. A interferência construtiva 1' e 2' ocorre quando o raio é espalhado em um raio e também e a diferença entre os caminhos 1-P-1' e 2-Q-2', ou seja, SQ e QT forem iguais a um valor  $n$  de comprimento de onda, que é a condição para a difração. SANTOS (2010).

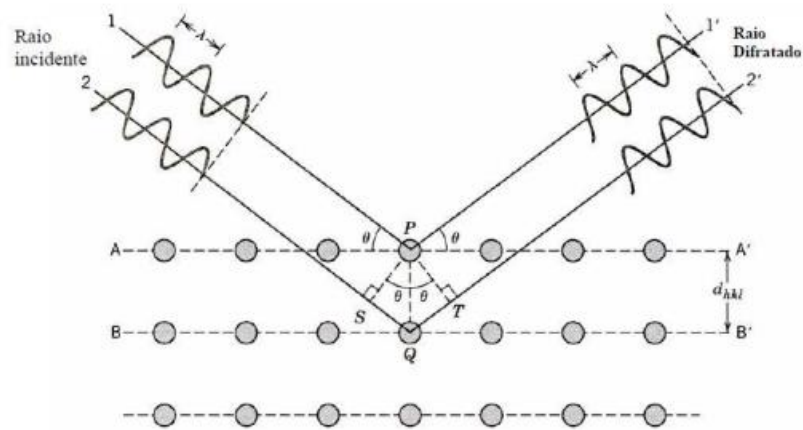


Figura 8 - Difração de raio x por planos atômicos (A-A' e B-B').

Fonte: SANTOS (2010).

$$n \cdot \lambda = \overline{SQ} + \overline{QT} \quad (3)$$

Sabendo-se que:  $\overline{SQ} = \overline{QT}$

$$\overline{SQ} = d_{hkl} \cdot \sin \theta \quad (4)$$

Então:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta \quad (5)$$

Onde,  $n$  é um n° inteiro,  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação difratada,  $d_{hkl}$  é o espaçamento dos planos atômicos e  $\theta$  é o ângulo de Bragg.

#### 2.1.4 Método do Furo Cego

Este método consiste em usinar um furo na peça em que a eliminação das tensões na superfície do furo causa a mudança no valor e na distribuição de

deformações na vizinhança do furo. Para medir esses valores de deformações, uma roseta extensométrica formada por três *strain gages*, é colada na região em que o furo será usinado, e assim consegue-se medir as mudanças geradas pela usinagem do furo nas distribuições de deformações. A ideia principal consiste em relacionar analiticamente as deformações aliviadas medidas com as tensões residuais existentes antes da usinagem do furo.

## 2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A grande maioria das referências a respeito das tensões residuais são baseadas em métodos experimentais. Vale citar que a maioria dos métodos experimentais utilizam somente a superfície da peça para a leitura de tensão residual. Portanto, não obstante as simplificações e as aproximações necessárias para a utilização dos modelos analíticos e numéricos para estudo das tensões residuais, principalmente na estimativa das tensões residuais no interior da seção transversal, se mostram importantes e complementares aos métodos experimentais.

### 3 MODELO ANALÍTICO BÁSICO

O foco do trabalho é analisar a distribuição de tensões residuais nas seções transversais de arames da armadura de tração de tubos flexíveis, que se assemelham a uma viga de seção retangular, quando submetidos a uma dada sequência de curvamentos.

Com intuito de apresentar os conceitos básicos de tensões residuais para familiarizar o leitor com as denominações utilizadas nesta área de tensões residuais, um modelo simples, para a estimativa da distribuição das tensões residuais apenas do primeiro ciclo, é apresentado.

A Figura 9 apresenta uma viga sob ação de momento fletor puro, e a Figura 10 mostra a seção retangular parcialmente plastificada.

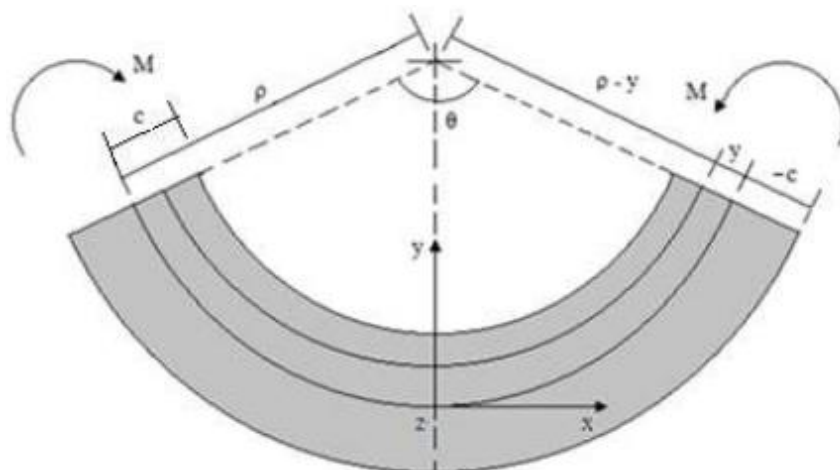


Figura 9 - Viga submetida a momento fletor puro.

Fonte: KENEDI (2023).

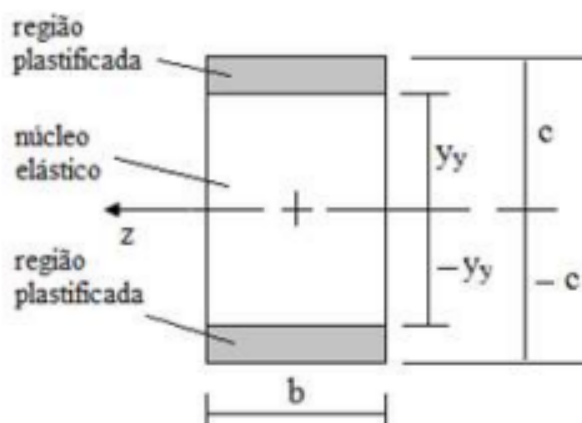


Figura 10 - Seção transversal retangular parcialmente plastificada.

Fonte: KENEDI (2023).

### 3.1 EQUAÇÕES CONSTRUTIVAS

Com relação as equações constitutivas, uma primeira aproximação é o material elástico perfeitamente plástico (EPP), em que a tensão permanece constante após o escoamento do material, como apresentado na Figura 11. Esse é um método relativamente simples, por isso é muito utilizado como primeira abordagem.

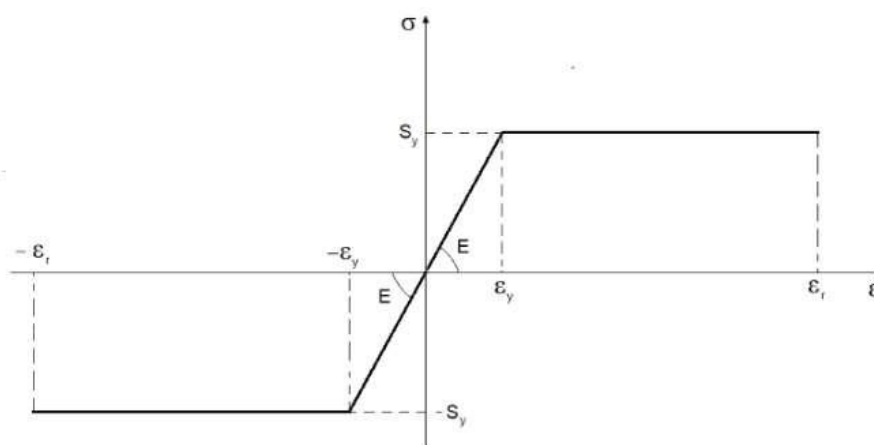


Figura 11 - Curva Tensão vs Deformação de um material EPP.

Fonte: KENEDI (2023).

Pode-se utilizar outra equação constitutiva, a do material elástico com encruamento (ECE), ou material bilinear, onde após o escoamento há uma nova região linear com inclinação  $E_t$  (módulo tangente), como mostrado na Figura 12.

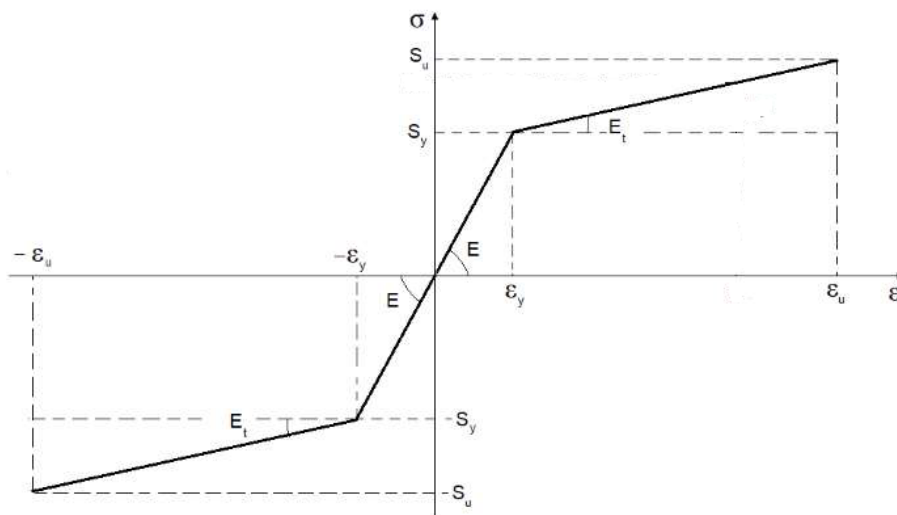


Figura 12 - Curva Tensão vs Deformação de um material ECE.

Fonte: KENEDI (2023).

### 3.2 ANÁLISES DE MOMENTO FLETOR E DEFORMAÇÃO NA ZONA PLASTIFICADA

Apenas o modelo ECE será citado desse ponto em diante. Quando se fala em flexão de vigas por imposição de curvatura, o raio de curvatura ( $\rho$ ) torna-se uma variável importante. Pode-se relacionar a deformação longitudinal  $\varepsilon_x$ , com a distância de um dado ponto à linha neutra (LN)  $y$ , e o raio de curvatura imposto  $\rho$ .

$$\varepsilon_x = -\frac{y}{\rho} \quad (6)$$

O raio de curvatura no início do escoamento  $\rho_y$  pode ser descrito pela equação 7.

$$\rho_y = \frac{E}{S_y} \cdot c \quad (7)$$

Onde  $E$  é o módulo de Young,  $c$  é a semi-altura da seção transversal, como mostrado na Figura 9, e  $S_y$  é a resistência ao escoamento. Pode-se calcular o momento fletor no início do escoamento  $M_y$ , conforme Hibbeler (2009).

$$M_y = \frac{2}{3} \cdot b \cdot c^2 \cdot S_y \quad (8)$$

Onde  $b$  é a largura da seção transversal. O momento fletor de uma seção retangular parcialmente plastificada  $M_{y_y}$  é mostrada, conforme Kenedi (2023).

$$M(y_y) = \frac{3}{2} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{3} \cdot \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \cdot \left( \frac{y_y}{c} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{y_y}{c} \right)^{-1} - 1 \right) \cdot \frac{E_t}{E} \right\} \cdot M_y \quad (9)$$

Na qual  $y_y = \rho \cdot \varepsilon_y$  é a distância da LN até a fronteira elastoplástica.  $\rho$  é o raio de curvatura e  $\varepsilon_y$  é a deformação elástica.

A equação 10 apresenta expressão semelhante a equação 9, porém em função de  $\rho$ , conforme Kenedi (2023).

$$M(\rho) = \frac{3}{2} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{3} \cdot \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \cdot \frac{E_t}{E} \right\} \cdot M_y \quad (10)$$

Onde  $\alpha$  é definido como:

$$\alpha(\rho) = \frac{3}{2} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{3} \cdot \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \cdot \frac{E_t}{E} \right\} \quad (11)$$

O termo  $\alpha(\rho)$  é um fator multiplicativo ao  $M_y$ , que significa o quanto que o momento  $M(\rho)$  é maior que  $M_y$ .

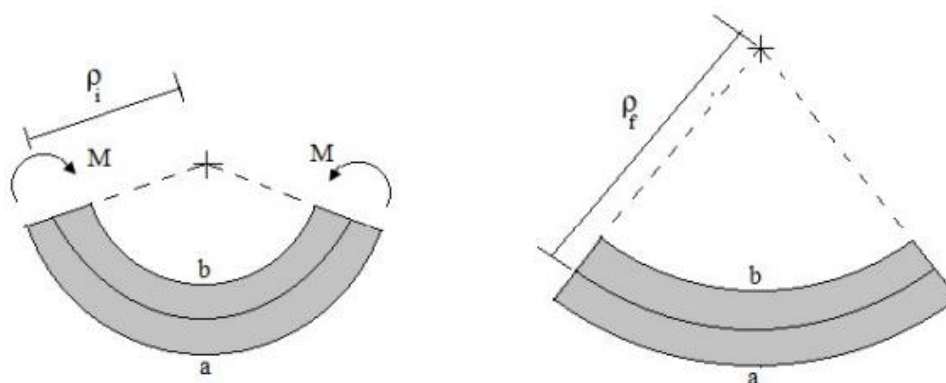
É possível expressar o momento fletor máximo em uma seção retangular, em função do raio de curvatura na máxima plastificação gerada ( $\rho_p = c/\varepsilon_u$ ), na qual  $\varepsilon_u$  é a deformação última, conforme Kenedi (2023).

$$M(\rho_p) = \frac{3}{2} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} - 1 \right) \cdot \frac{E_t}{E} \right] \cdot M_y \quad (12)$$

O fator de forma  $f$  estima quantas vezes o momento fletor aplicado pode aumentar antes da seção transversal falhar completamente por geração de rótula plástica, conforme Kenedi (2023).

$$f = \frac{3}{2} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} - 1 \right) \cdot \frac{E_t}{E} \right] \quad \text{onde} \quad 1 \leq \alpha < f \quad (13)$$

A tensão residual em uma viga submetida à flexão refere-se às tensões internas que permanecem após a aplicação e a remoção de uma carga, como no modelo de carregamento mostrado na Figura 13.



**Figura 13 - Viga submetida a Flexão: (a) carregamento e (b) descarregamento.**

**Fonte: KENEDI (2023).**

É possível notar que a viga após sofrer deformação plástica e em seguida o alívio de carga, apresenta uma curvatura menor (e um raio de curvatura maior). Tal fenômeno ocorre devido ao retorno elástico do material, também chamado de *springback*.



A Figura 14, mostra o desenvolvimento das tensões e das deformações para os pontos *a* e *b* da Figura 13.

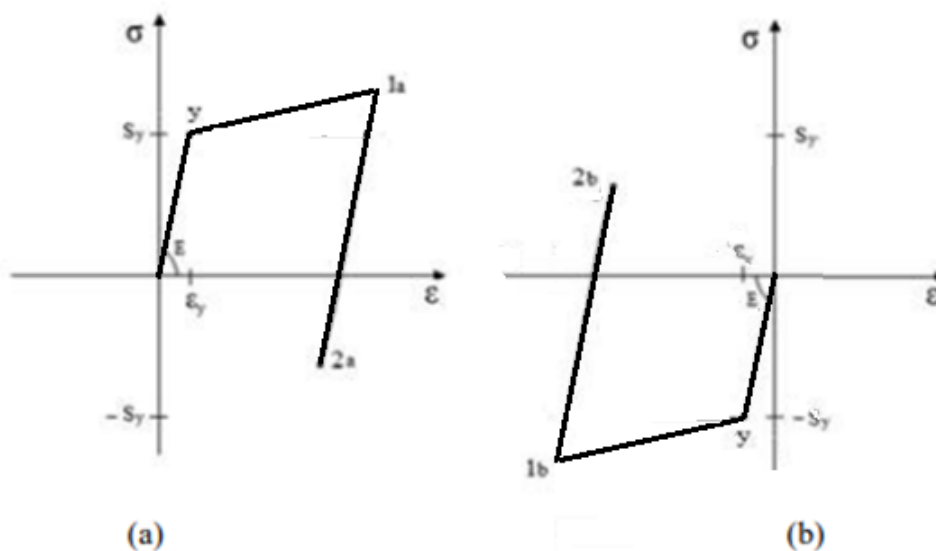


Figura 14 - Gráfico tensão vs deformação para dois pontos da viga. (a) para o ponto *a* e (b) para o ponto *b*, da Figura 13.

Fonte: Adaptada de KENEDI (2023).

As tensões geradas pelo *springback* ( $\sigma_{sb}$ ) podem ser estimadas:

$$\sigma_{sb}(\rho, y) = \frac{M(\rho) \cdot y}{I} \quad (14)$$

Onde  $I$  é o momento de inércia de área.

A representação gráfica da distribuição de tensões residuais na seção transversal para carregamentos pouco severos é ilustrado na Figura 15 e para carregamentos muito severos na Figura 16.

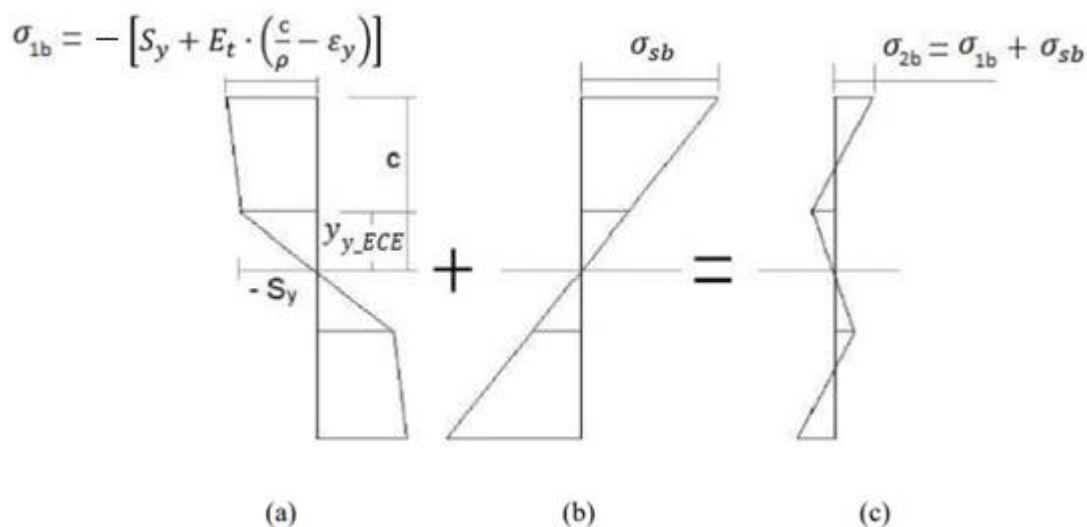


Figura 15 - Distribuição na seção transversal das tensões normais da viga, submetida à flexão pouco severa: (a) o carregamento, (b) o springback e (c) as tensões residuais.

Fonte: KENEDI (2023).

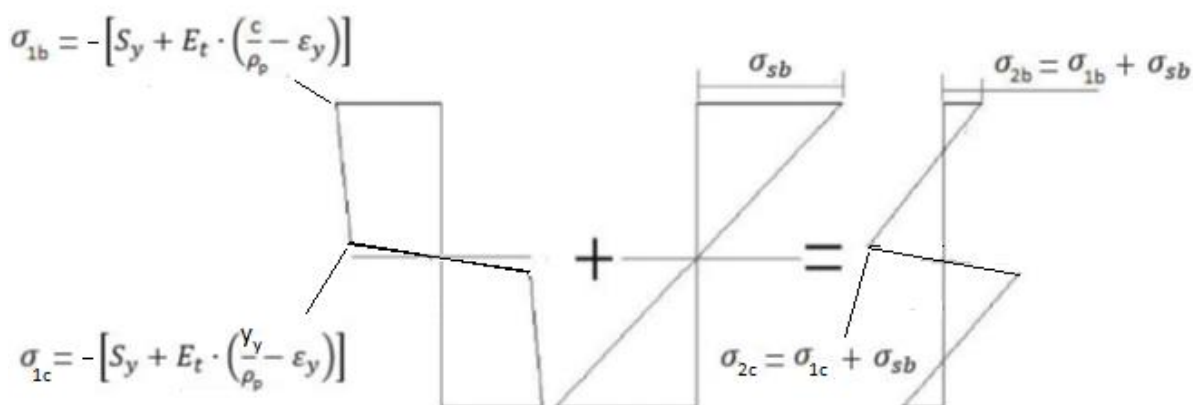


Figura 16 - Distribuição na seção transversal das tensões normais da viga, submetida à flexão muito severa: (a) o carregamento, (b) o springback e (c) as tensões residuais.

Fonte: KENEDI (2023).

Na Figura 15, para um carregamento pouco severo, com um núcleo elástico extenso, as maiores tensões residuais encontram-se em  $y = c$  e em  $y = -c$ . Na Figura 16 para um carregamento muito severo, com um núcleo elástico estreito, as maiores tensões residuais encontram-se em  $y = y_y$  e em  $y = -y_y$ .

## 4 MODELO NUMÉRICO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da proposta do trabalho com foco no modelo numérico. A seção transversal do arame de armadura de *riser* estudado é mostrada na Figura 17.

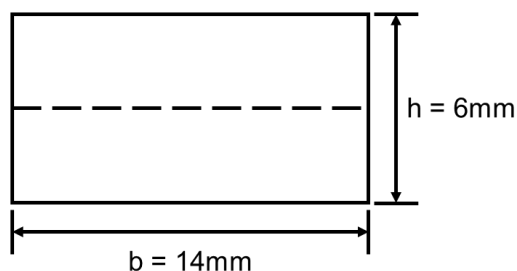


Figura 17 – Desenho da seção transversal do arame de armadura de *riser* estudado.

Fonte: Autores.

### 4.1 DADOS INICIAIS

A Tabela 1 apresenta os dados geométricos utilizados.

Tabela 1 - Dados geométricos de entrada

Descrição	Valor
<b>A</b>	1,6
<b>Raio de curvatura (<math>\rho</math>)</b>	64 mm
<b>Raio do <i>former</i></b>	61 mm
<b>Raio dos roletes</b>	10 mm
<b>Distância entre roletes</b>	180 mm
<b>Comprimento do arame</b>	500 mm

Fonte: Zaidan (2023)

Os raios dos roletes, bem como a distância entre eles, foram escolhidos em função do trabalho experimental de Zaidan (2023). O comprimento do arame foi estipulado pelos autores para garantir um comprimento suficiente de modo que permaneça apoiados nos roletes, mesmo quando curvados pelo *former*.

## 4.2 MODELO 3D

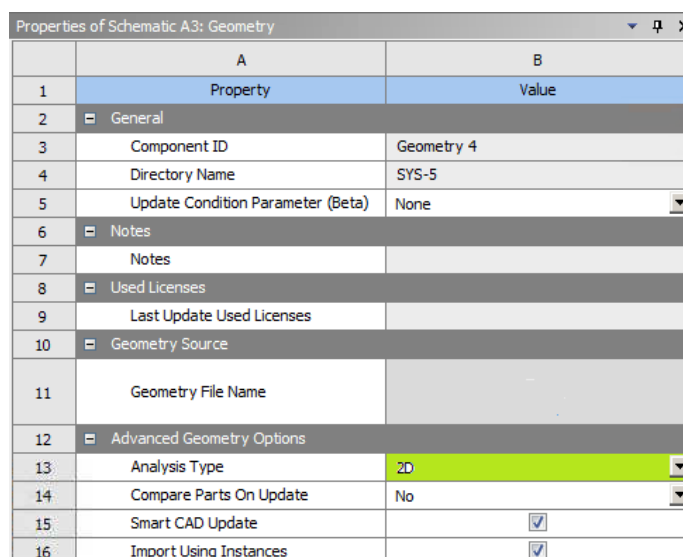
O modelo 3D foi concebido no *software* de modelagem 3D agregado ao *Ansys*, de nome *SpaceClaim*, na versão 2022 R2. As propriedades mecânicas utilizadas para o material dos modelos analítico e numérico são os mesmos do trabalho Zaidan (2023), cujo valores estão disponíveis na Tabela 2.

**Tabela 2 - Propriedades mecânicas nominais do aço SAE 1065**

Nomenclatura	Valor
<b>Módulo de elasticidade (E)</b>	207 Gpa
<b>Tensão de escoamento (<math>S_y</math>)</b>	1026 MPa
<b>Tensão última (<math>S_u</math>)</b>	1208 MPa
<b>Módulo de tangente (<math>E_t</math>)</b>	2.9 Gpa

Fonte: Zaidan (2023)

A Figura 18 apresenta as propriedades do modelo geométrico já importando para a interface de EF do *Ansys*, de nome *Mechanical*, na versão V2022 R2. Para transformar o modelo 2D em 3D, foi adicionado um comando *offset midplane* de 14 mm, mesmo valor da largura do arame. Esse comando adiciona esse valor em todos os corpos a partir do plano central gerando 7mm de espessura para cada lado, porém não cria elementos extras para tal.



**Figura 18 – Propriedades geométricas, tela do ANSYS.**

Para melhor escolha de contatos visto a adequação geométrica do modelo em uma condição plana, foi selecionado um modelo “2D”, para uma análise no estado plano de tensões. Dessa forma, os contatos *frictionless*, o que corresponde a todos os tipos de contato, são inibidos de abrirem durante a solução, preservando a convergência do modelo.

### 4.3 ENCRUAMENTO

O encruamento é um fenômeno que ocorre durante a deformação plástica a frio, resultando no aumento da resistência do material.

#### 4.3.1 Encruamento Isotrópico

Nesse tipo de encruamento, o material mantém sua isotropia ao longo de todo o processo de deformação plástica, a sua fronteira elastoplástica aumenta gradativamente com o carregamento, conforme mostrado na Figura 19. (LEMAITRE e CHABOCHE, 1994)

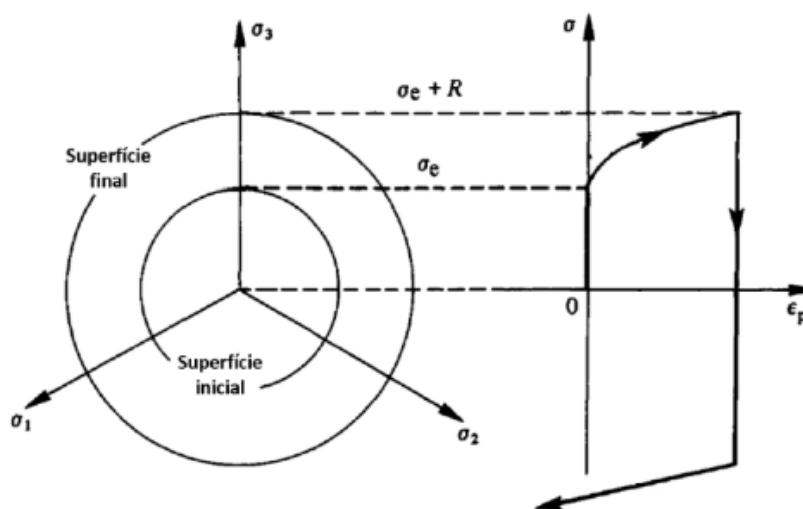


Figura 19 - Encruamento Isotrópico. Fonte: LEMAITRE e CHABOCHE, 1994.

### 4.3.2 Encruamento Cinemático

No encruamento cinemático o material não mantém sua isotropia ao longo de todo o processo de deformação plástica. Esse modelo de encruamento é mais próximo do observado na natureza, visto que, embora frequentemente os materiais são assumidos como isotrópicos, é muito raro isso realmente acontecer. (LEMAITRE e CHABOCHE, 1994)

Como os modelos analisados nesse trabalho possuem estruturas sob carregamento cíclico, o tipo de encruamento mais indicado é o cinemático, pois este modelo leva em conta o efeito Bauschinger, como mostrado na Figura 20.

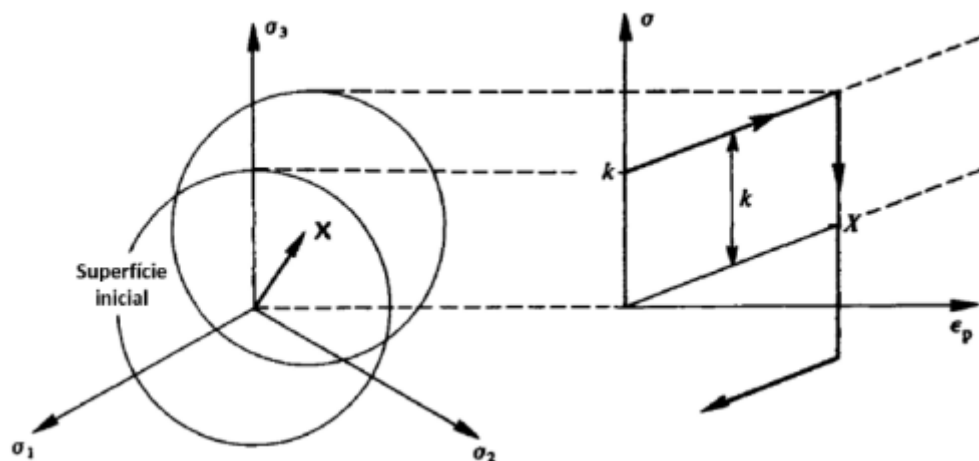
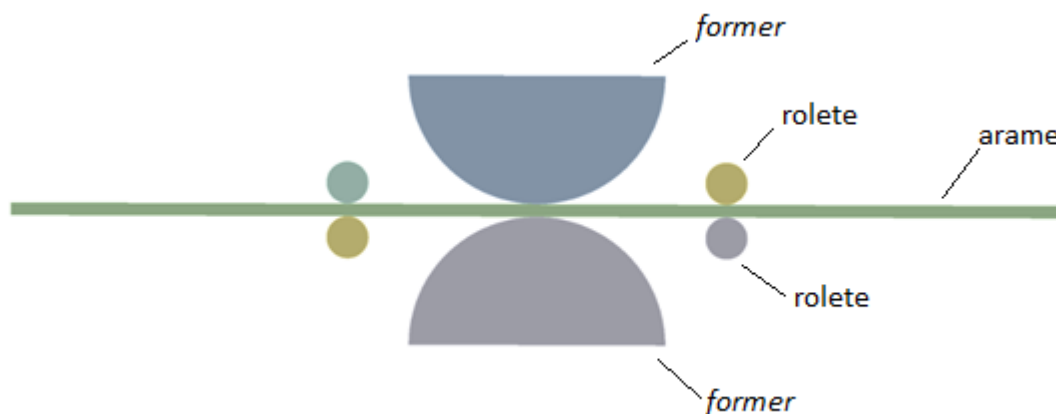


Figura 20 - Encruamento Cinemático.

Fonte: LEMAITRE e CHABOCHE, 1994.

#### 4.4 MODELO ANALISADO

A Figura 21 mostra o modelo numérico utilizado neste trabalho,



**Figura 21 - Modelo numérico analisado.**

O modelo numérico é composto pelo arame de armadura de *riser*, carregado por dois *formers* (um por vez) e por quatro roletes (dois por vez).

#### 4.5 SIMETRIA

A simetria foi utilizada no software de EF, pois o arame apoiado em roletes em suas extremidades e carregamento transversal central imposto pelo *former*, configura tanto a geometria quanto o carregamento, simétricos. Dessa maneira, somente é modelado a metade do conjunto analisado, como mostrado na Figura 22.

A vantagem deste tipo de abordagem são diversas, menor número de elementos, possibilidade de geração de uma malha mais refinada, melhor a convergência do modelo e conseqüentemente, menor custo computacional.

De fato, após uma tentativa de modelar o conjunto por inteiro, houve muitos problemas de convergência da análise por erros de “deformação excessiva” dos

elementos. Com a diminuição dos elementos que se deformam excessivamente, o modelo numérico passou a convergir mais facilmente.

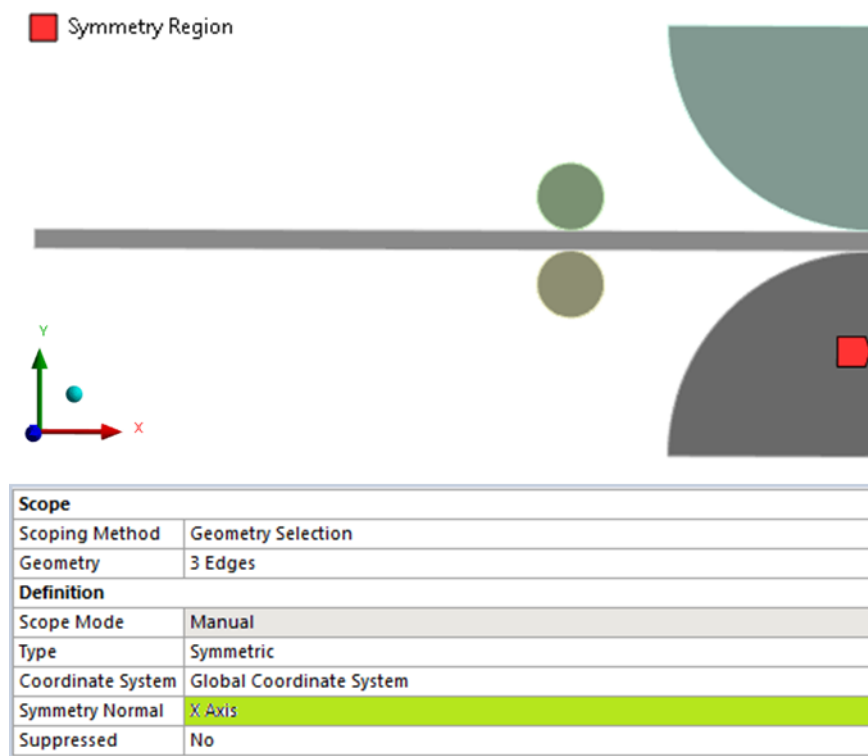


Figura 22 - Simetria do modelo numérico.

#### 4.6 CONTATOS

Os contatos entre os corpos estão apresentados na Figura 23, e todos são modelados como *frictionless* com o comando *adjust to touch* ligado com objetivo de prevenir a perda do contato durante a análise. É importante ressaltar que o natural é considerar o *former* e os roletes como *target*, e o arame como *contact*, já que o corpo deformado é o arame, portanto este é tratado como o corpo menos rígido entre os corpos envolvidos nas análises.



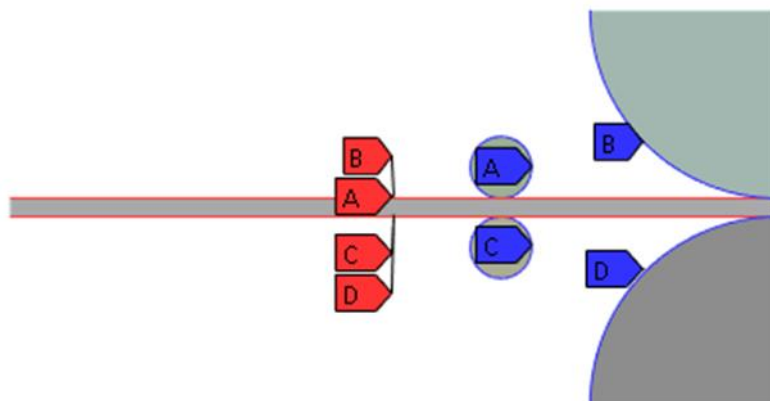


Figura 23 - Identificação dos Contatos.

#### 4.7 MALHA

A malha contém elementos de primeira ordem com método *quadrilateral dominant* em todos os corpos buscando a melhor qualidade e uniformidade gerada por esse método. O tamanho dos elementos da malha foi escolhido com 2 mm para o *former*, e 1 mm para o arame e os roletes.

Ainda assim, foi realizado um refino da malha em regiões de maior interesse, onde estabelecem os contatos e onde existem maiores deformações dos elementos. Para isso, foi utilizado a opção *sphere of influence* limitando e selecionando o tamanho dos elementos de tais regiões, como mostrado na Figura 24.

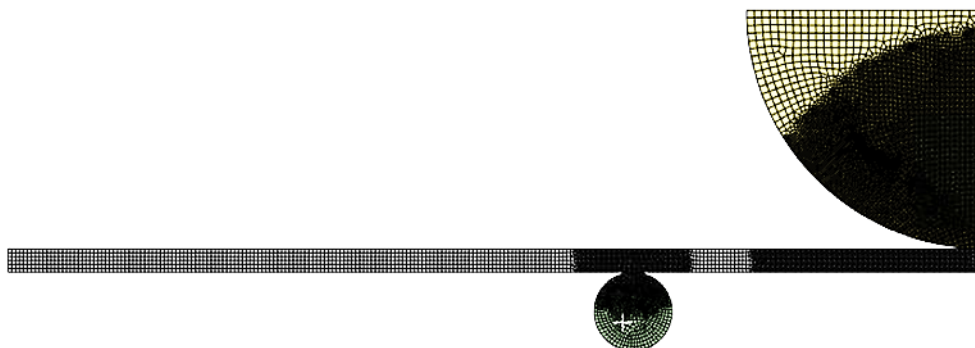


Figura 24 - Malha gerada.

Na tabela 3 mostra-se a convergência da malha realizada.

**Tabela 3 - Convergência de malha.**

Tamanho do elemento (mm)	Tensão (MPa)	Expressão do Erro	Erro (%)
<b>1,0</b>	1103,5		
<b>0,75</b>	1085,7	$\frac{(1103,5 - 1085,7)}{1085,7}$	2,0
<b>0,5</b>	1082	$\frac{(1085,7 - 1082)}{1082}$	0,34

A partir dos valores mostrados na Tabela 3, verifica-se que a malha com elementos de 1,0 mm para 0,75 mm, o erro já é bastante pequeno, convergindo para o tamanho de elemento utilizado para elementos de 0,5 mm.

No quadro 1 é feito um resumo dos dois casos a serem apresentados neste trabalho. A sequência de carregamentos propostos foi baseada em informações genéricas sobre os *straighteners* utilizados na indústria off-shore.

Casos	Descrição
Caso 1	Existem dois roletes acima e abaixo do arame, assim como um <i>former</i> acima e outro abaixo do mesmo. O <i>former</i> acima (desloca para baixo) e <i>former</i> abaixo (desloca para cima) na seguinte sequência: 30 mm, - 30 mm, 20 mm, - 20 mm, 10 mm e - 10 mm. Não há <i>sprinbacks</i> ao fim de cada um dos três ciclos. Os roletes se deslocam de acordo com a necessidade de cada movimento de cada <i>former</i> . O primeiro valor de deslocamento foi calculado em 30 mm baseado em cálculos realizados em Zaidan (2023), na qual um deslocamento próximo a este valor já garantiria um carregamento de flexão severo.
Caso 2	Existem dois roletes acima e abaixo do arame, assim como um <i>former</i> acima e outro abaixo do mesmo. O <i>former</i> acima (desloca para baixo) e <i>former</i> abaixo (desloca para cima) na seguinte sequência: 30 mm, - 25 mm, 20 mm, - 15 mm, 10 mm e - 5 mm. Não há <i>sprinbacks</i> ao fim de cada um dos três ciclos. Os roletes se deslocam de acordo com a necessidade de cada movimento de cada <i>former</i> .

**Quadro 1 - Casos analisados por elementos finitos.**

Embora fosse natural que a seção transversal para a geração do *path* fosse a seção de simetria do problema, foi escolhida uma seção transversal do arame 16 mm à esquerda da seção de simetria, visto que os pontos na seção de simetria do arame poderiam apresentar disporções provocadas pelo contato do *former* no arame.

#### 4.8 SEÇÃO TRANSVERSAL ANALISADA

Na Figura 25 é mostrado a da posição da seção do *path* em relação a simetria do problema.

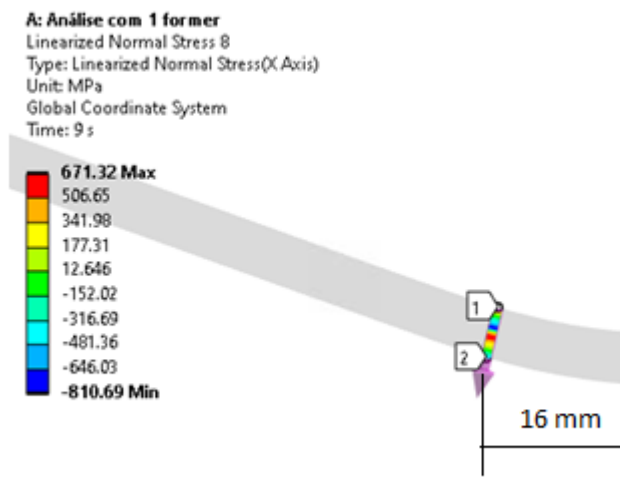


Figura 25 - Distribuições de tensões longitudinais utilizando o comando Path, ao final do deslocamento transversal de 30 mm.

A Figura 26 mostra o ponto  $y = -c$  do *path*, onde os dados para os gráficos  $\sigma/S_y$  vs  $\epsilon/\epsilon_y$  são gerados.

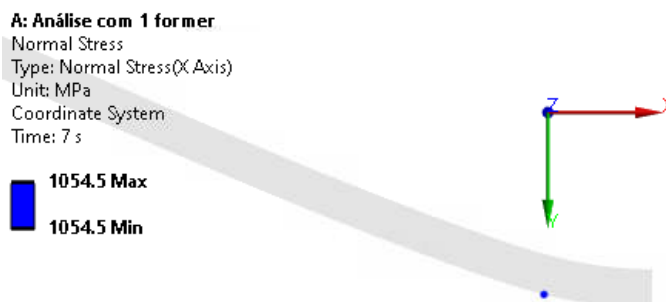


Figura 26 - Ponto  $y = -c$  da seção transversal do *path*.

A seguir, os dois casos são apresentados.

#### 4.9 PRIMEIRO CASO

Neste caso, foi realizado três ciclos com existência de dois *formers* posicionados acima e abaixo do arame (o que gera curvaturas de concavidades alternadas), com sincronismo entre seus movimentos, com a finalidade de entender a evolução da distribuição das tensões residuais ao final de cada ciclo e principalmente ao fim do teste. É importante salientar que os *formers*, neste caso, só se separam do arame ao final do terceiro ciclo, quando é, então, permitindo o *springback*.

##### 4.9.1 Condição de contorno

Os roletes se deslocam sincronizadamente com o intuito de que os mesmos não interfiram no aparecimento de tensões espúrias onde entram em contato com o arame. Dessa maneira, existe o deslocamento concomitante entre os roletes e os *formers*.

Para os roletes acima do arame, estes se deslocam para cima em 3 mm; 2 mm e 1 mm para cada ciclo respectivamente. Já para os roletes abaixo do arame, estes se deslocam seguindo o mesmo padrão em sentido oposto e em *steps* diferentes.

Nas Figuras 27 e 28, as linhas e pontos em verde mostram os deslocamentos dos respectivos componentes informados nas descrições, enquanto os pontos em vermelho fazem referência a cada *step* da análise.

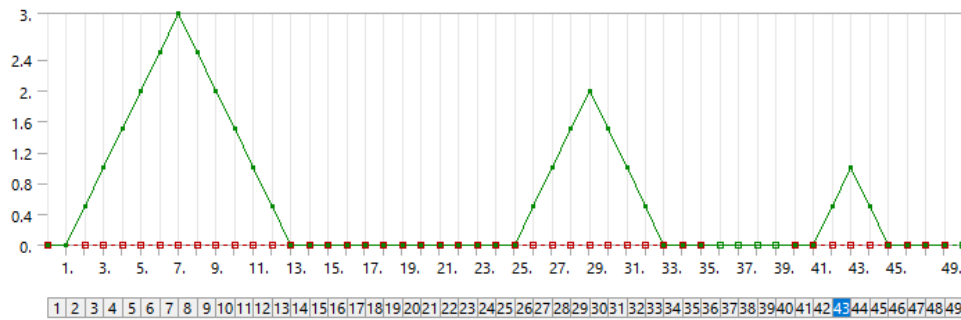


Figura 27 - Gráfico de deslocamento do rolete superior, para o caso 1.

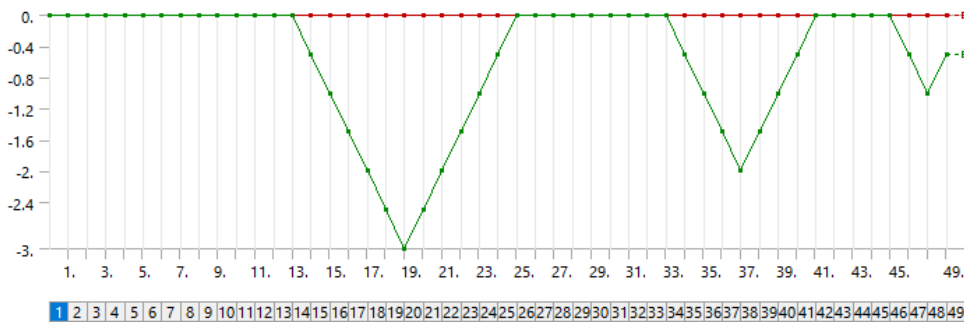


Figura 28 - Gráfico de deslocamento do rolete inferior, para o caso 1.

A Figura 29 mostra a geometria inicial do Caso 1.

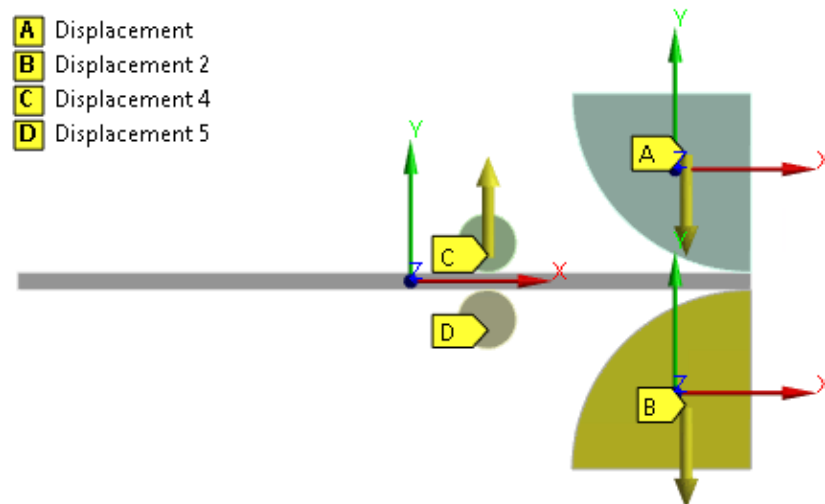


Figura 29 - Geometria inicial do caso 1.

Note que os *formers* estão com as marcações A e B, enquanto os roletes estão com as marcações C e D.

#### 4.9.2 Carregamentos

Quanto a sequência de carregamentos, este primeiro caso consiste em efetuar deslocamentos sincronizados entre os *formers* para curvar o arame em concavidades alternadas. Portanto, há deslocamentos transversais dos *formers* com 30 mm, -30 mm, 20 mm, -20 mm, 10 mm e -10 mm, sem springback entre ciclos. A Figura 30 e Figura 31 representam os deslocamentos transversais dos *formers*.

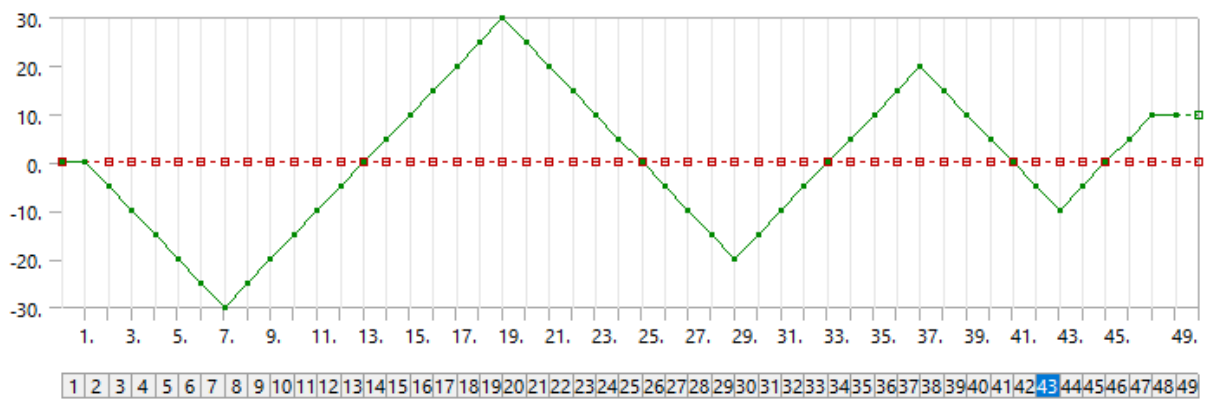


Figura 30 - Gráfico de deslocamento do *former* superior, para o caso 1.

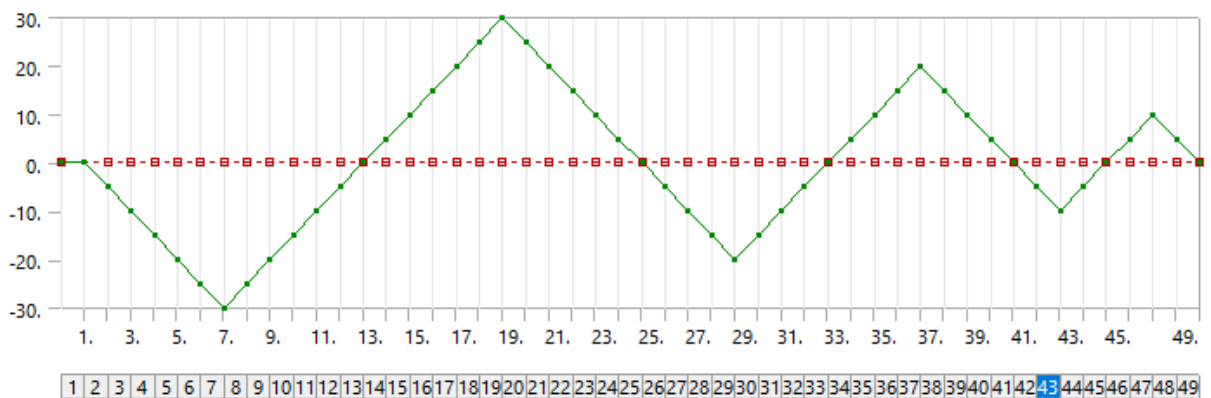


Figura 31 - Gráfico de deslocamento do *former* inferior, para o caso 1.

### 4.9.3 Resultados

A Figura 32 mostra o deslocamento do conjunto ao final do carregamento do primeiro ciclo. Portanto, o *former* superior desloca 30 mm para baixo curvando o arame.

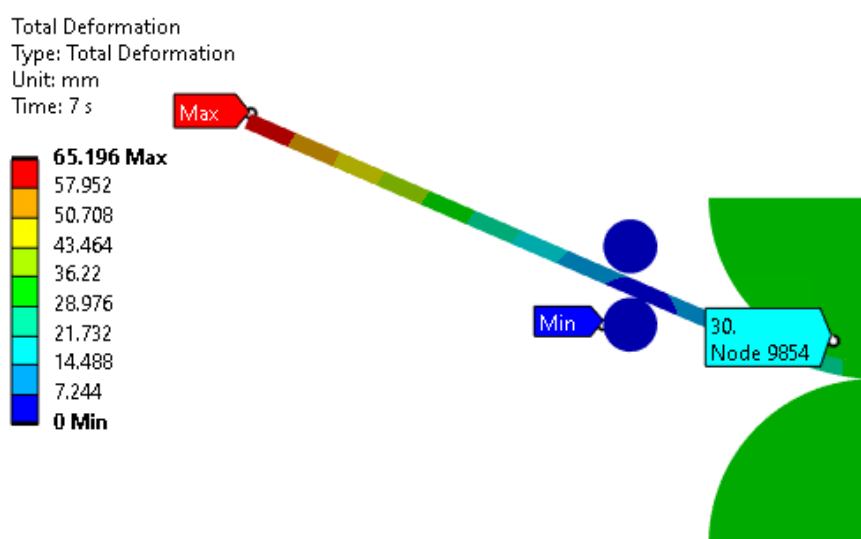


Figura 32 - Deslocamento ao final do 1º ciclo do caso 1.

A Figura 33 mostra a variação das tensões longitudinais ao final do carregamento do primeiro ciclo.

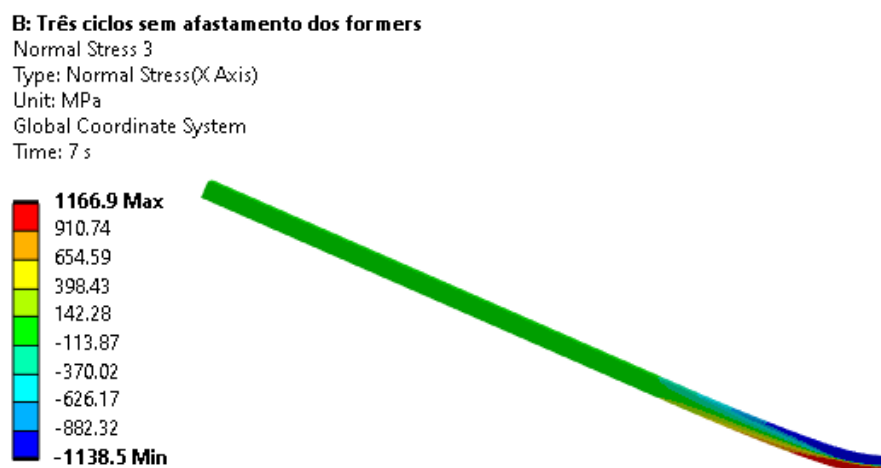


Figura 33 - Tensões normais ao final do 1º ciclo do caso 1.

A Figura 34 mostra a evolução das tensões e das deformações para o caso 1.

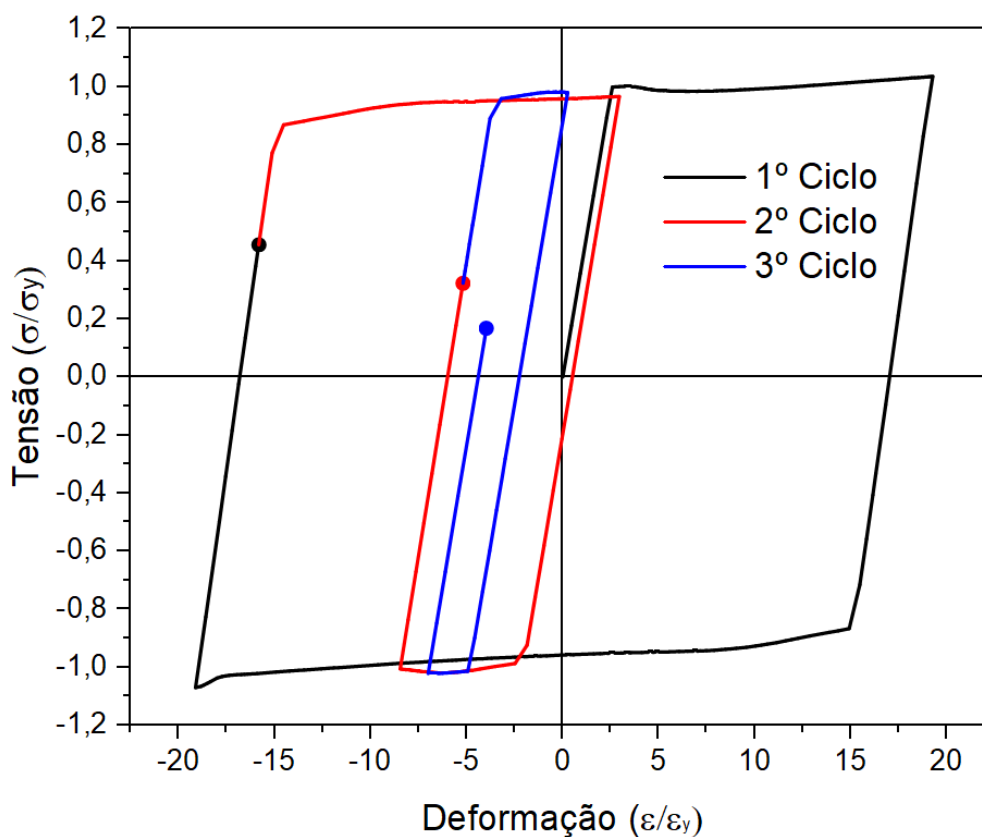
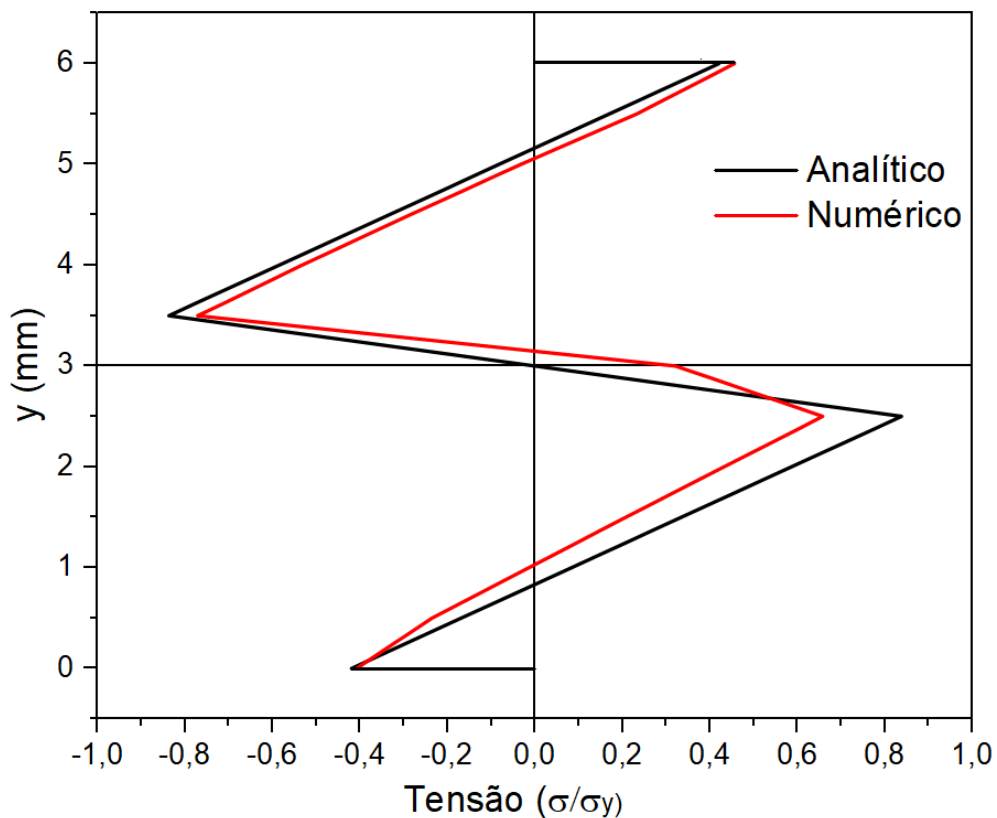


Figura 34 - Tensão vs Deformação para o caso 1, para  $y = -c$ .

É possível observar que as tensões e deformações residuais no arame foram sendo reduzidas progressivamente. Portanto, o caso 1, que alterna os sentidos das curvaturas sem afastamento dos *formers*, mostrou-se bastante eficaz para a redução das tensões residuais.

A Figura 35 mostra uma comparação entre os métodos analítico e numérico para o primeiro ciclo, que é uma limitação do modelo analítico.





**Figura 35 - Comparação entre modelo analítico e numérico no primeiro ciclo, para o caso 1.**

Na Figura 35, é possível notar que os modelos analítico e numérico, para o primeiro ciclo, tem de uma forma geral o desempenho bastante semelhante. Nota-se um pequeno desvio da simetria da distribuição de tensões residuais para o modelo numérico, que provavelmente está associado ao deslocamento da linha neutra do c.p. do arame de armadura de riser, uma vez que após o primeiro ciclo a viga torna-se levemente curva.

A Figura 36 mostra um conjunto da distribuição de tensões residuais após o final de cada um dos três ciclos.

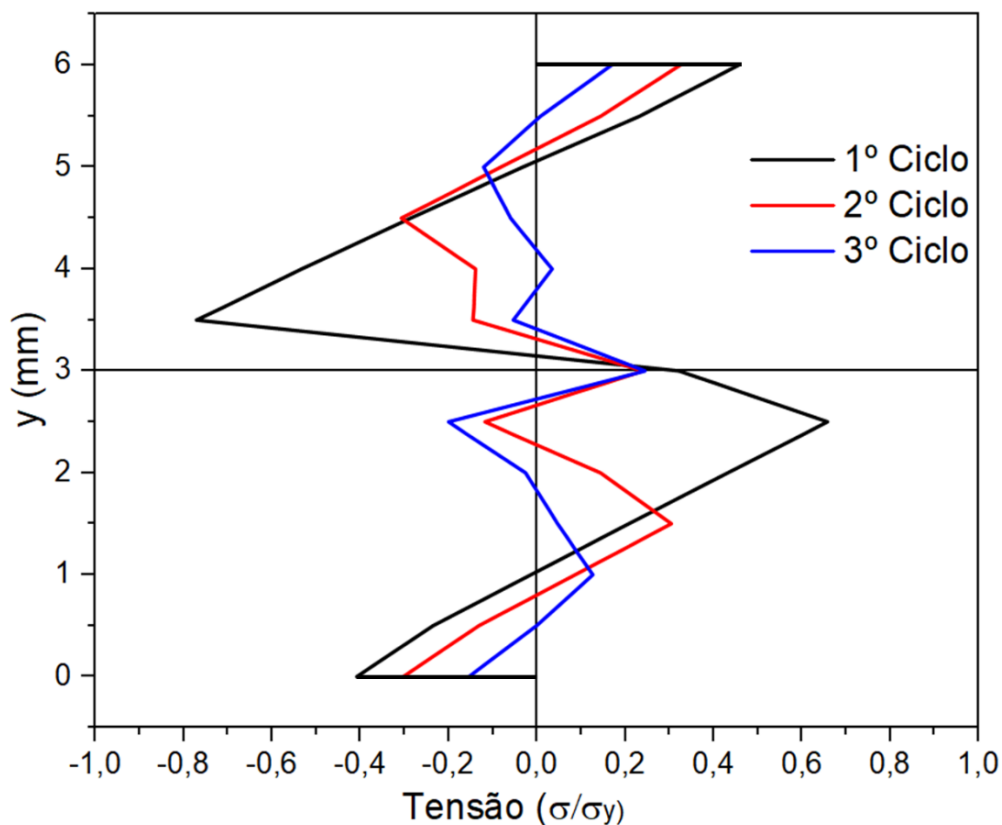


Figura 36 - Gráfico  $y$  vs  $\sigma_{\text{residual}}$  ao final de cada um dos três ciclos, para o caso 1.

Note que as distribuições das tensões residuais na seção transversal analisada, para o caso 1, a cada ciclo têm amplitudes cada vez menores, passando ao fim do 1º ciclo  $\sigma/S_y \approx 0,8$  para ao fim do 3º ciclo  $\sigma/S_y \approx 0,2$ , ambas as relações para  $y = -y_y$  ou  $+y_y$ .

#### 4.10 SEGUNDO CASO

No segundo caso analisado, o deslocamento dos *formers* foi diminuindo a cada semiciclo, com objetivo de simular uma imposição de curvatura decrescente. É importante salientar que os *formers*, neste caso, só se separam do arame ao final do terceiro ciclo, quando é, então, permitindo o *springback*.

#### 4.10.1 Condições de Contorno

Este caso segue o mesmo princípio de sincronia de movimento entre os *formers* já apresentado no caso anterior, com o adicional de decaimento do deslocamento a cada semiciclo. A Figura 37 mostra a geometria inicial do Caso 2.

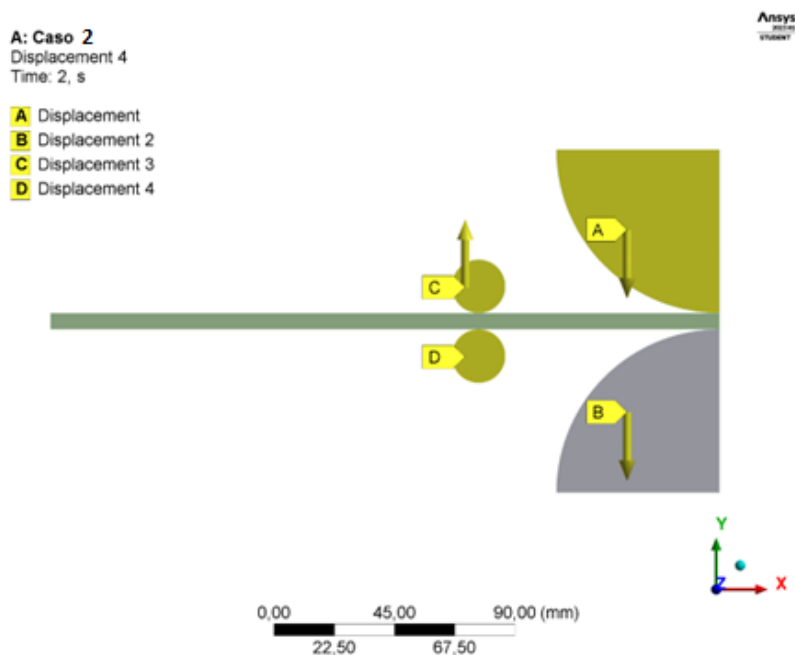


Figura 37 - Geometria inicial do caso 2.

Note que os *formers* estão com as marcações *A* e *B*, enquanto os roletes estão com as marcações *C* e *D*.

#### 4.10.2 Carregamento

A sequência de carregamentos para esse segundo caso se assemelha ao primeiro caso, porém a diminuição no deslocamento ocorre a cada semiciclo. Portanto, há deslocamentos transversais dos *formers*: 30 mm, - 25 mm, 20 mm, -15 mm, 10 mm e - 5 mm. As Figuras 38-41 representam os deslocamentos transversais dos *formers* e dos roletes

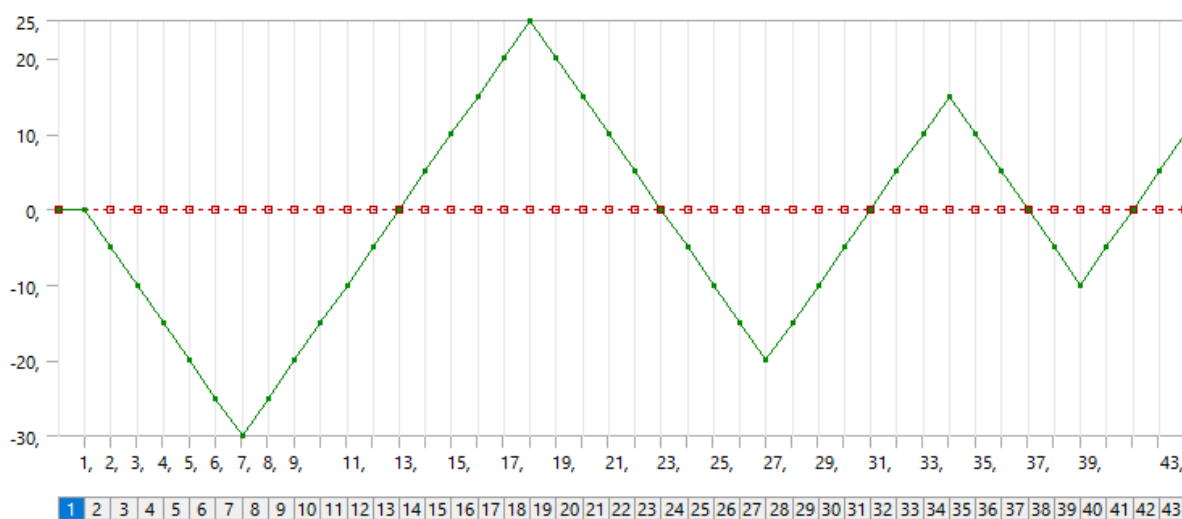


Figura 38 - Gráfico de deslocamento do *former* superior, para o caso 2.

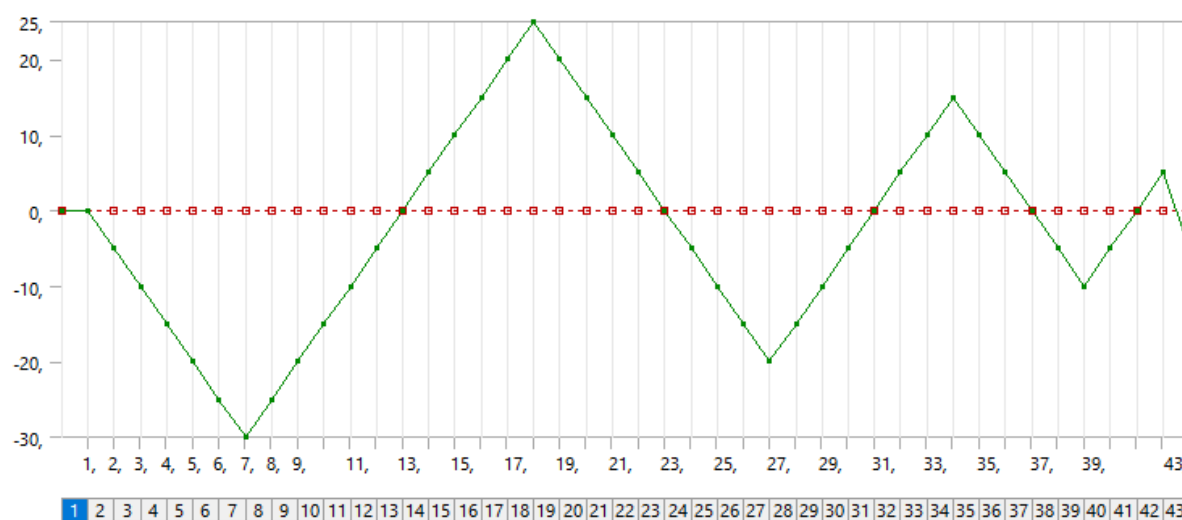


Figura 39 - Gráfico de deslocamento do *former* inferior, para o caso 2.

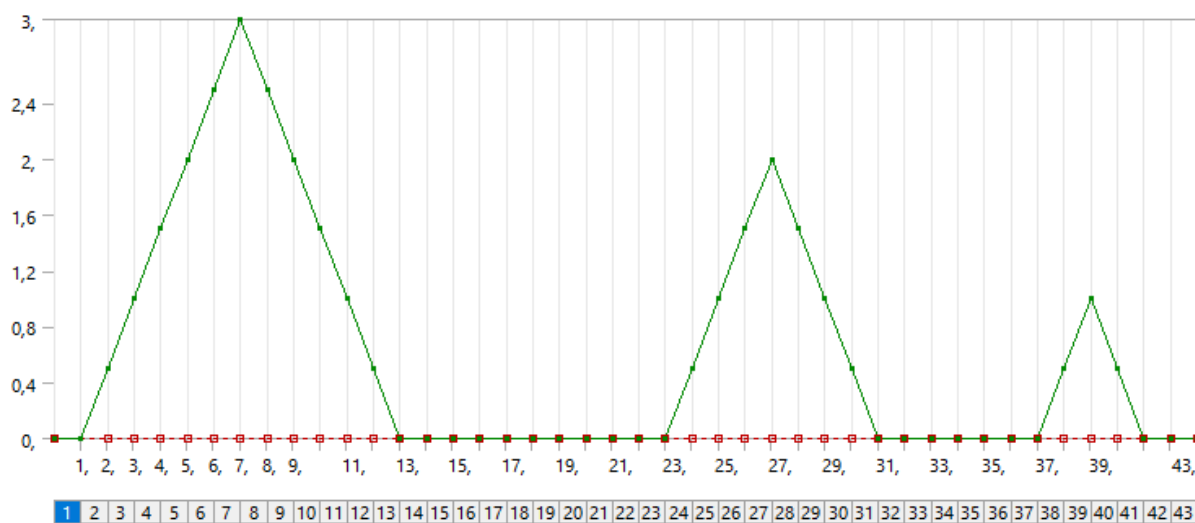
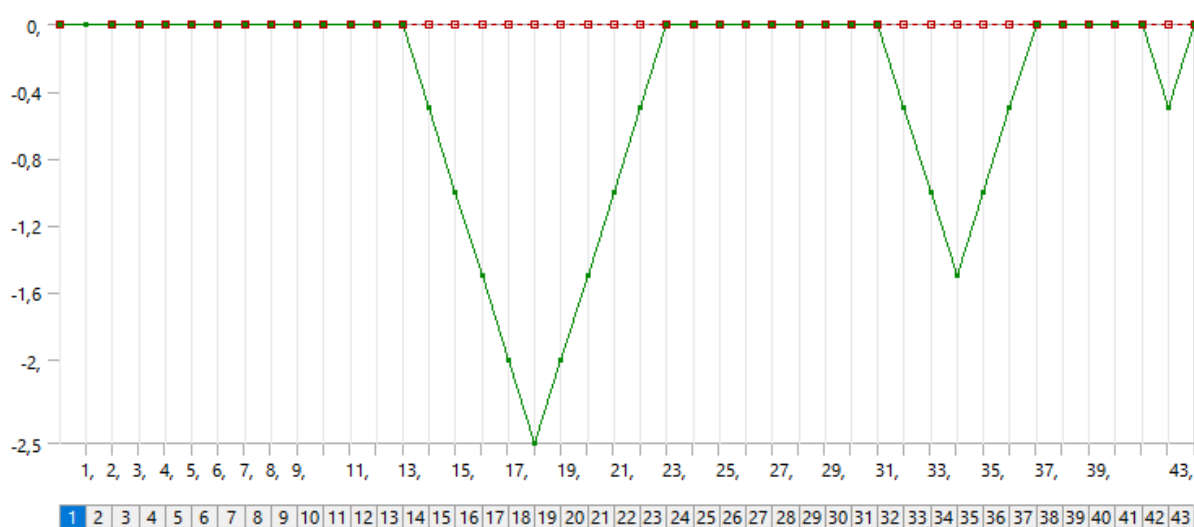


Figura 40 - Gráfico de deslocamento do rolete superior, para o caso 2.



**Figura 41 – Gráfico de deslocamento do rolete inferior, para o caso 2.**

#### 4.10.3 Resultados

Os resultados foram semelhantes aos do primeiro caso. O *former* superior desloca-se 30 mm para baixo curvando o arame neste sentido, semelhante ao caso anterior.

A Figura 42 mostra o deslocamento do conjunto no final do carregamento no primeiro ciclo. A Figura 43 mostra as tensões normais no final do carregamento no primeiro ciclo.

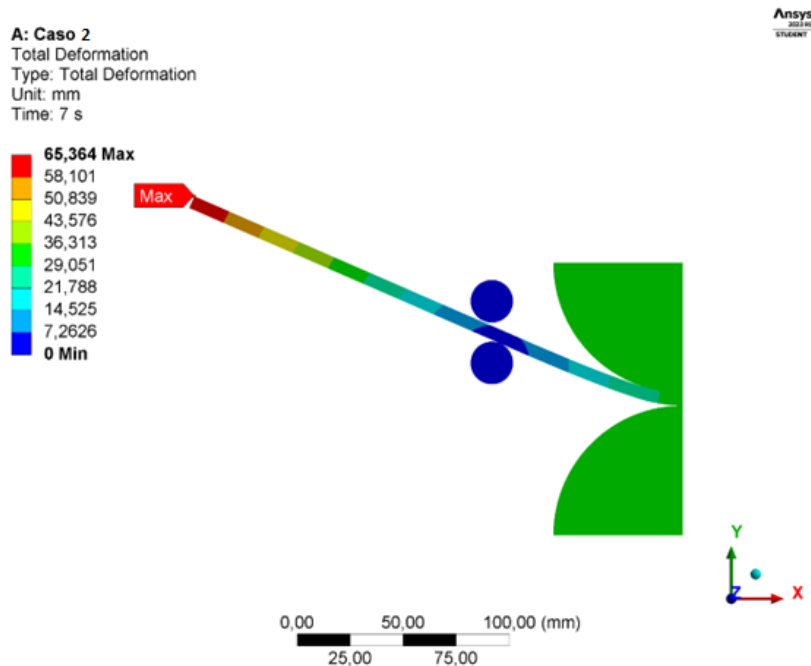


Figura 42 - Deslocamento ao final do 1º ciclo do caso 2.

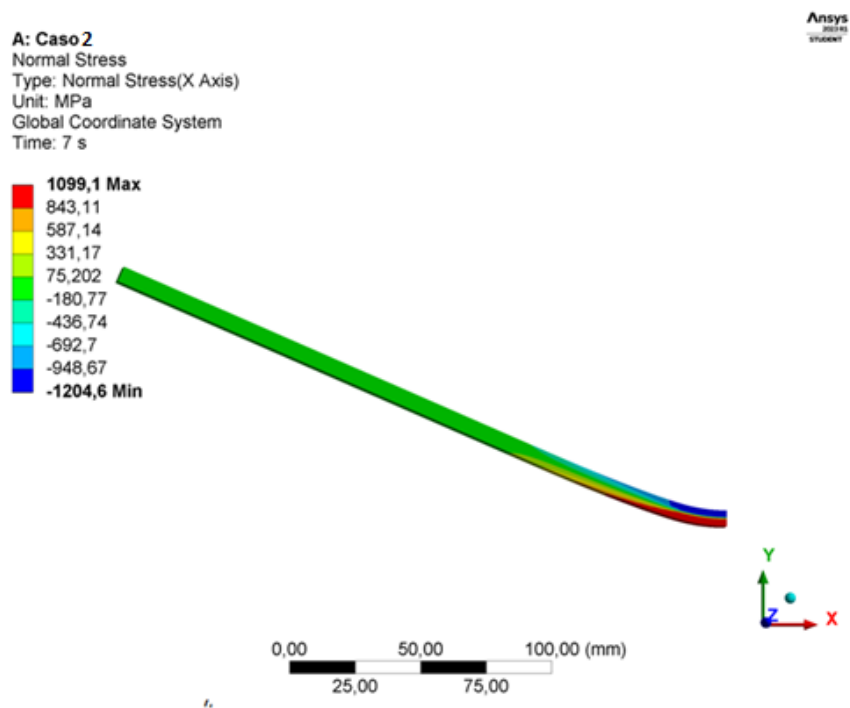


Figura 43 - Tensões normais ao final do 1º ciclo do caso 2.

O gráfico da Figura 44 acompanha a evolução das tensões e das deformações para todos os três ciclos, separados em 6 semiciclos.

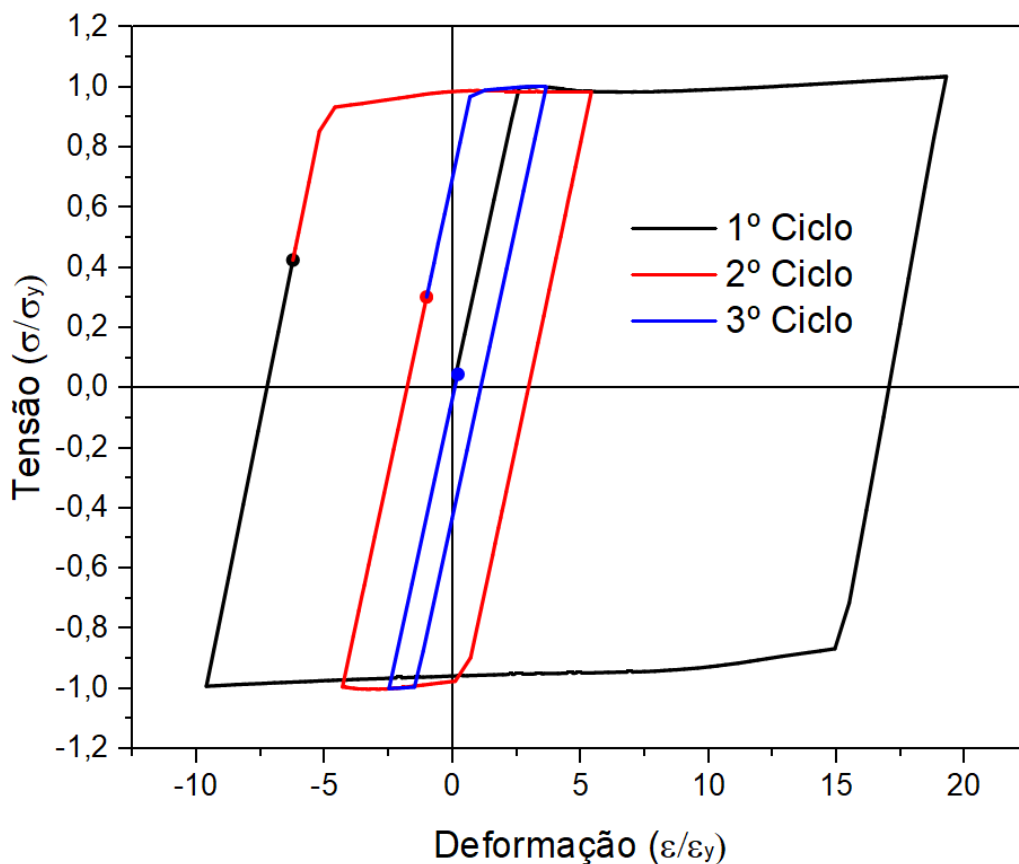
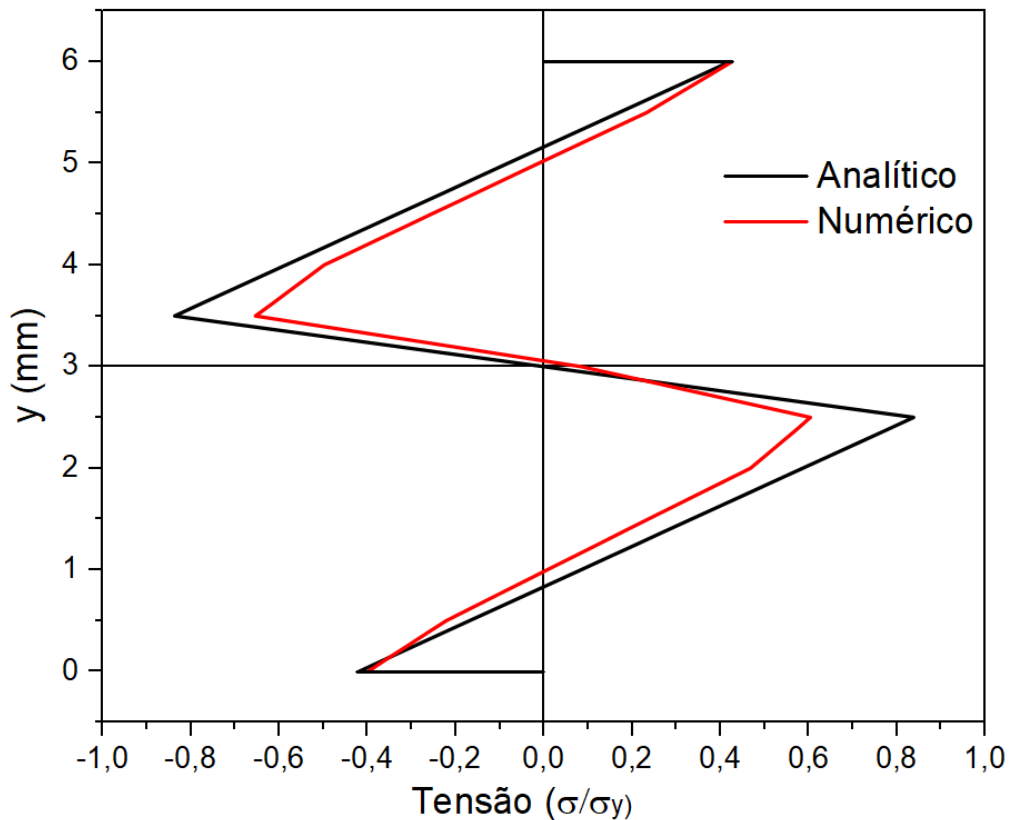


Figura 44 - Tensão vs Deformação para o caso 2, para  $y = -c$ .

É possível observar que as tensões e deformações residuais no arame,  $y = -c$ , reduziram em cada novo ciclo, e tensão residual final foi menor em relação ao caso 1. Nota-se que o último semiciclo apresentou pouca plastificação, muito inferior aos anteriores, o que é resultado do baixo deslocamento transversal dos *formers* nessa última etapa.

A Figura 45 mostra a relação das tensões residuais entre os métodos analítico e numérico para o primeiro ciclo, que é uma limitação do modelo analítico.



**Figura 45 - Comparação entre modelo analítico e numérico no primeiro ciclo, para o caso 2.**

Na Figura 35, é possível notar que os modelos analítico e numérico, para o primeiro ciclo, tem de uma forma geral o desempenho melhor que o do caso 1. O desvio da simetria da distribuição de tensões residuais do modelo numérico para o caso2, revelou-se quase imperceptível.

A Figura 46 mostra um conjunto da distribuição de tensões residuais após cada um dos três ciclos, para o caso 2.



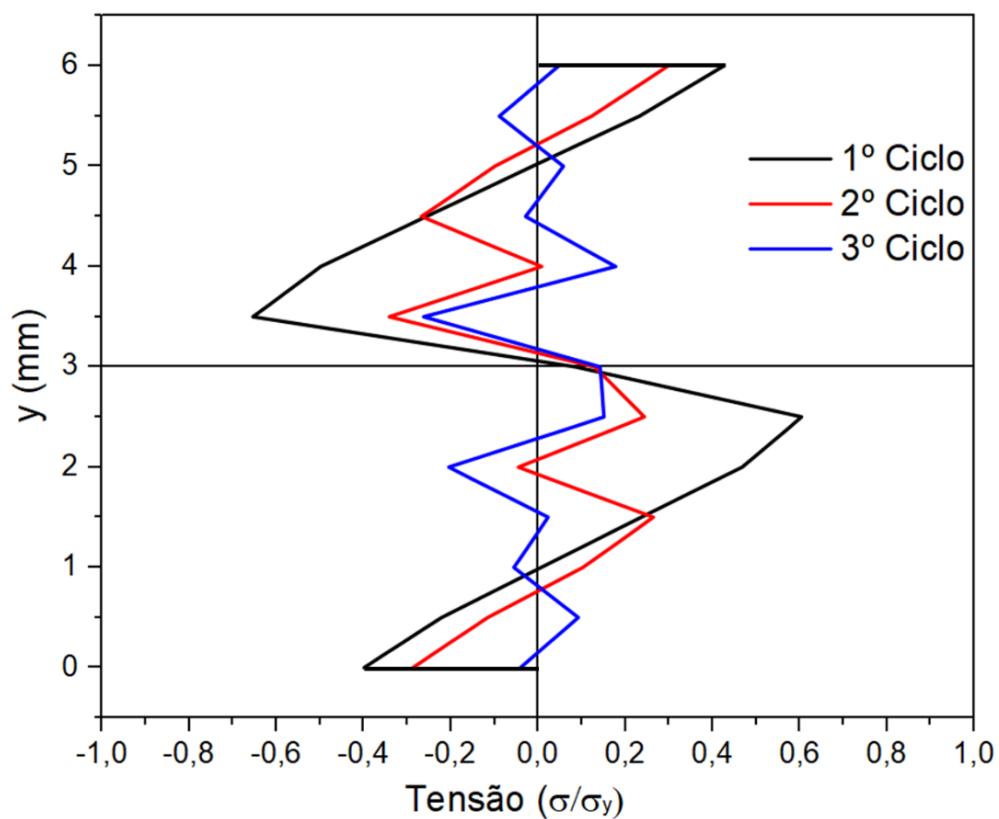


Figura 46 - Gráfico  $y$  vs  $\sigma_{\text{residual}}$  ao final de cada um dos três ciclos, para o caso 2.

Note que as distribuições das tensões residuais na seção transversal analisada, para o caso 2, a cada ciclo têm amplitudes menores, passando ao fim do 1º ciclo  $\sigma/S_y \approx 0,7$  para ao fim do 3º ciclo  $\sigma/S_y \approx 0,3$ , ambas as relações para  $y = -y_y$  ou  $+y_y$ .

## 5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A seção propõe abordar, graficamente, a comparação entre os valores tanto de tensão residual quanto de deformação residual, ao final dos três ciclos de carregamento, para cada caso.

A Figura 47 mostra os valores para cada ciclo em cada caso estudado como referência ao valor da tensão. Já a Figura 48 mostra os valores para cada ciclo em cada caso como referência ao valor de deformação. Em ambos os casos para  $y = -c$ .

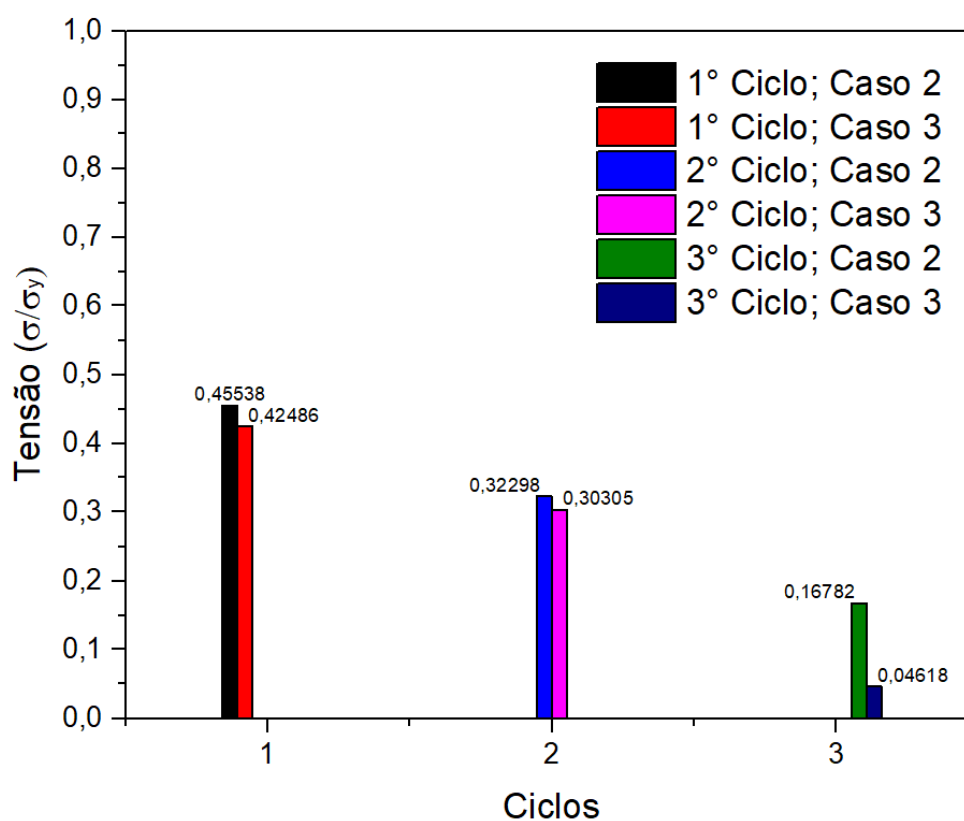


Figura 47 – Tensões residuais vs ciclos, para  $y = -c$ .

A Figura 47 revela que o caso 2 sempre se manteve com valores de tensões menores do que os vistos no caso 1.

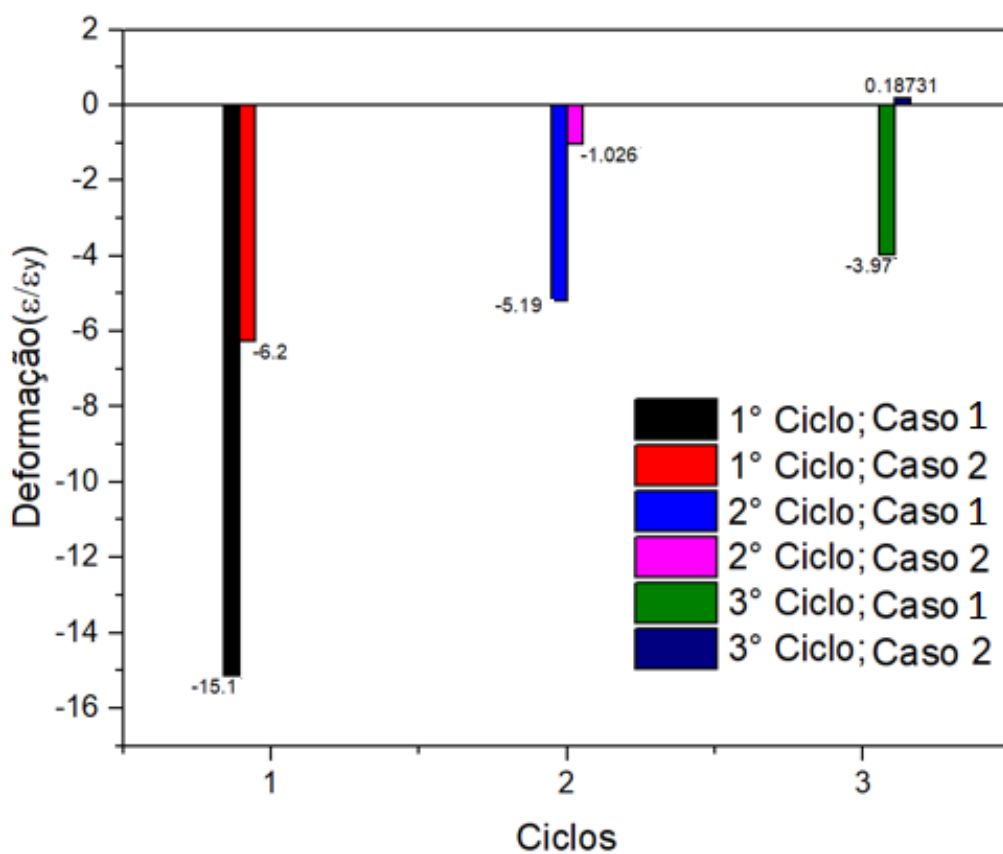


Figura 48 - Deformações residuais vs ciclos, para  $y = -c$ .

A Figura 48 revela que o caso 2 sempre se manteve com valores de deformações residuais menores do que os vistos no caso 1.

## 6 CONCLUSÃO

Foi proposta uma modelagem analítica simples da geração de tensões residuais, em barras chatas de seção retangular com material elástico com encruamento, através da imposição de curvatura, para um ciclo.

Foi feita a modelagem numérica através do uso do método dos Elementos Finitos, com a utilização do ANSYS Educacional, para modelar o arame de armadura de *riser* flexível submetido a imposição de curvaturas sequenciais pelo deslocamento transversal de um *former*.

Os resultados preliminares mostraram que três ciclos de curvamentos, em sentidos alternados, com plastificação parcial da seção transversal, foram suficientes para reduzir drasticamente as tensões residuais, da seção transversal. O caso 2 teve um desempenho semelhante em  $y = -y_y$  ou  $+y_y$ , enquanto teve um desempenho melhor que o caso 1 em  $y = -c$  ou  $+c$ , chegando em alguns casos as tensões residuais diminuírem de uma ordem de grandeza.

Como continuação desta pesquisa está previsto o aperfeiçoamento do modelo analítico para este possa fazer estimativas da distribuição das tensões residuais para mais de um ciclo. Outro ponto a ser abordado será a inclusão da teoria de viga curva, para que o modelo analítico possa reproduzir uma certa falta de simetria mostrada na distribuição de tensões residuais pelo método dos EF.

## 7 REFERÊNCIAS

BLÖDORN, Rodrigo. **Estudo do Furo e do Processo de Furação Empregado no Método do Furo Cego para Medição de Tensões Residuais**. Florianópolis – SC: Universidade Federal de Santa Catarina; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2014.

CHEN, Jianqiao. **Stress Strain Diagram For An Elastic Perfectly Plastic Material**. Researchgate.net. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jianqiao-Chen/publication/249354896/figure/fig3/AS:669971046735888@1536744953722/The-bi-linear-stressstrain-curve-of-metal-layer.png>. Acesso em: 24/06/2023.

CRIS, Ana. **Técnica do Furo-cego para Medição de Tensões Residuais**. maxwell.vrac.puc-rio.br. Disponível em: [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4411/4411\\_4.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4411/4411_4.PDF). Acesso em: 22/06/2023.

FERNADO, Upul; DAVIDSON, Michelle; KUN, Yan; ROY, Matthew; PIRLING, Thilo; WITHERS, Philip; FRANCIS, John. **Evolution of Residual Stress in Tensile Armour Wires of Flexible Pipes During Pipe Manufacture**. Trondheim, Noruega, 36° ed. OMAE, p. 1-9, Junho 2017.

Hibbeler, Russel. **Resistência dos Materiais**. 7. Ed. São paulo: Pearson, 2009.

KENEDI, P. P. **Apostila de Tensões Residuais**. Rio de Janeiro – RJ: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca; Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, 2023.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J.L. **Mechanics of Solid Materials**. Cambridge University Press, 1994.

LUIZ, J. **Medição de Tensões Residuais em Arames de Risers Flexíveis Associando o Método do Contorno à Interferometria de Luz Incoerente**.

Florianópolis – SC: Universidade Federal de Santa Catarina; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2021.

MARQUES, M.; BATISTA, A.; NOBRE, J.; LOUREIRO, A.; KORNMEIER, J. **A Utilização da Difração de Neutrões na Determinação do Perfil de Tensões Residuais em Revestimentos por Soldadura**. Insp, São Paulo, v.18, n. 02, p. 149-157, Abr/Jun 2013.

Melo, E. **AVALIAÇÃO DE DANO À ARMADURA DE TRAÇÃO DE UM DUTO FLEXÍVEL PELO MÉTODO DE MAGNETOSTRIÇÃO INVERSA**. Rio de Janeiro – RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro; Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, 2022.

SANTOS, C. **ESTUDO DA TENSÃO RESIDUAL ATRAVÉS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X**. Vitória – ES: Universidade Federal do Espírito Santo; Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

[https://maritimedevelopments.com/media/pagecontent/600x400\\_crop\\_top-center\\_70\\_none/Spirit-riser-transpooling-management.jpg](https://maritimedevelopments.com/media/pagecontent/600x400_crop_top-center_70_none/Spirit-riser-transpooling-management.jpg). Acesso em:

22/06/2023.

Zaidan, D. L., **INFLUÊNCIA DA TENSÃO RESIDUAL NA VIDA A FADIGA DE ESTRUTURAS PARCIALMENTE PLASTIFICADAS**, Dissertação apresentada no Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca; Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, 2023.