

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Lucas Rodrigo Carneiro

**Análise numérica da curvatura dos arames da
armadura de tração de dutos flexíveis durante
processo de dobramento**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Carlos Alberto Almeida

Rio de Janeiro

Julho 2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, aos meus pais Herculano Carneiro e Nerilândia Lima por me darem a oportunidade de estudar em uma faculdade de qualidade como a PUC-RIO e me apoiarem durante todo o curso e nas minhas decisões.

Ao meu professor e orientador Carlos Alberto de Almeida por toda orientação e suporte durante a execução deste trabalho e ensinamentos dentro de sala de aula.

Aos professores do Departamento de Mecânica da PUC-RIO por todos os ensinamentos que refletem diretamente no profissional que me tornei.

Aos meus colegas de trabalho da TechnipFMC, Marcelo Miyazaki, Maira Ávila e Tais Borba, que sempre me engajaram e me deram suporte neste fim da graduação.

A todos da equipe *Reptiles* Baja PUC-Rio onde tive oportunidade de trabalhar, cujo projeto foi essencial para o meu amadurecimento pessoal e profissional.

Agradeço à minha namorada Flavia Belem por estar sempre ao meu lado me dando força e coragem para superar meus momentos mais difíceis.

Agradeço também os meus amigos Patrick Dauelsberg, Mariana Pessoa, Paulo Roberto Mendes e Luan Guaranys pelo companheirismo e apoio durante o curso de engenharia mecânica.

RESUMO

Análise numérica da curvatura dos arames da armadura de tração de dutos flexíveis durante processo de dobramento

Este trabalho apresenta e compara dois modelos 2D em elementos finitos para análise da curvatura dos arames da armadura de tração de dutos flexíveis durante o processo de dobramento. Em ambos os modelos, foi utilizado o programa comercial *ANSYS* de elementos finitos e com este é possível avaliar não só a curvatura depois do dobramento como também sua curvatura após o retorno elástico. O primeiro modelo consiste em um arame engastado sob flexão pura com não-linearidades geométricas e físicas do material. No segundo modelo, o arame engastado é conformado em um gabarito sob auxílio de um cilindro. E a este modelo é adicionado a não-linearidade de contato entre os componentes. Ambos os modelos geram resultados para comportamentos de materiais elásticos, elástico-perfeitamente plástico e elastoplástico e seus resultados são comparados com um modelo analítico disponível na literatura. Conclui-se que o modelo que conforma o arame no gabarito exige maior esforço computacional para convergir quando comparado ao primeiro modelo. Isto é justificado pelo contato que ocorre entre os componentes do modelo. Em contrapartida este segundo modelo apresenta melhores resultados para comportamentos que possuem plasticidade.

Palavras-chave: Armadura de tração; Conector; Grandes deslocamentos; Não-linearidade; Contato; Retorno elástico; Curvatura; Plasticidade.

ABSTRACT

Numerical analysis of flexible pipe tensile armor wire curvature during folding process

This work presents and compares two 2D finite elements models to evaluate the flexible pipe tensile armor wire curvature during the folding process. Both models were simulated in commercial finite elements software ANSYS and with it is possible to analyse the wire curvature after folding process. Additionally, it is also possible to evaluate curvature after the spring back. The first model consists in a cantilever wire subjected to pure bending with geometric and physical material nonlinearity. In the second model, a cantilever wire is conformed in a collar with help of a cylinder and to this is added contact nonlinearity. Both models generate results to elastic, elastic perfectly plastic and elastic-plastic bilinear materials behavior and their results are also compared with an analytical model available in the literature. It is concluded that the conforming wire model needs more computational efforts to converge than the first model due to contacts between components. In return, the second model generates better results when plasticity behaviors are adopted.

Key-words: Tensions armor; End fitting; Large displacements; Nonlinearity; Contact; Spring back; Curvature; Plasticity.

SUMÁRIO

	Introdução	13
	Motivação	13
	Objetivo	15
1.	Considerações iniciais	16
1.1.	Duto flexível.....	16
1.2.	Conector ou <i>End fitting</i>	21
2.	Montagem do conector em uma linha de duto flexível	23
2.1.		
2.2.		
2.3.	Solução Analítica	26
3.	Aplicação de momento em vigas.....	26
3.1.	Material elástico	28
3.1.1.	Material elástico-perfeitamente plástico	29
3.1.2.	Material elastoplástico (relação constitutiva bilinear)	31
3.1.3.		
3.2.	Retorno elástico	32
4.	Modelo Numérico de Viga sob Flexão Pura	34
4.1.	Premissas.....	34
4.2.	Parâmetros geométricos do modelo.....	35
4.3.	Características da malha de elementos finitos	35
4.4.		
4.5.	Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no modelo	36
4.6.	Metodologia.....	40
4.6.1.		
4.6.2.	Resultados	44
4.6.3.	Comportamento Elástico	45
5.	Comportamento elástico-perfeitamente plástico	48
5.1.		
5.2.	Comportamento elastoplástico bilinear.....	53
5.3.		
	Modelo Numérico de Viga sob Conformação em Gabarito	56
	Geometria do Modelo	56
	Premissas.....	57
	Características da malha de elementos finitos	58

	Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no modelo	59
	Metodologia	59
	Resultados	61
	Comportamento Elástico	61
5.4.	Comportamento elástico-perfeitamente plástico	65
5.5.	Comportamento elastoplástico bilinear.....	68
5.6.		
5.6.1.		
5.6.2.	Conclusões	71
5.6.3.		
6.		

Lista de figuras

Figura 1.1 - Produção de energia primária de 1970-2016 [3]	13
Figura 1.2 - Conector dissecado com arames da armadura de tração rompidos [6]	15
Figura 2.1 – Arranjo submarino de <i>risers</i> e <i>flowlines</i> [7]	17
Figura 2.2 - Diferentes arranjos submarinos [8]	17
Figura 2.3 – Camadas do duto flexível [9]	18
Figura 2.4 – Visão geral e perfil de carcaça intertravada [12]	18
Figura 2.5 - Processo de extrusão da camada plástica interna [14]	19
Figura 2.6 – Diferentes perfis de armadura de pressão: (a) formato Z; (b) formato C; (c) formato T – tipo 1; (d) formato T – tipo 2 e (e) formato PSI [10]	19
Figura 2.7 - Armadura de tração sendo assentada durante a fabricação [11]	20
Figura 2.8 - Seção transversal do arame da armadura de tração [1]	20
Figura 2.9 - Visão geral de um conector [1]	21
Figura 2.10 – Ilustração de um exemplo de conector e seus componentes [13]	22
Figura 2.11 - Tipos de ancoragens utilizada pelos principais fabricantes de linhas flexíveis: (a) tipo gancho ou <i>hook</i> ; (b) tipo ondulações ou <i>crimping</i> . [1]	22
Figura 2.12 - Armadura de tração dobradas sob o colar de dobramento [2]	24
Figura 2.13 - Arames dobrados sobre o colar de dobramento [1]	24
Figura 2.14 - Ruptura dos arames de tração região próxima às dobras [1]	25
Figura 3.1 - Análise de uma viga sob flexão [15]	26
Figura 3.2 - Modelo de viga sob flexão pura	28
Figura 3.3 - Curva tensão x deformação de material elástico-perfeitamente plástico [4]	29
Figura 3.4 - Perfil de tensão de materiais elástico-perfeitamente plástico [5]	30
Figura 3.5 - Curva tensão x deformação de material elastoplástico bilinear [4]	31
Figura 3.6 - Gráfico de Momento x Curvatura durante carregamento e retorno elástico [16]	32
Figura 4.1 - Simplificação do arame de armadura de tração para uma viga reta de seção retangular [1]	34
Figura 4.2 - Imagem Adaptada de uma viga sob flexão pura [4]	35
Figura 4.3 – Dimensões do arame utilizadas no modelo de viga sob momento	35
Figura 4.4 - Representação do Elemento PLANE182 [17]	36

Figura 4.5 – Visão detalhada dos elementos do modelo proposto	36
Figura 4.6 - Gráfico de tensão x deformação dos materiais que serão utilizados no modelo de viga sob flexão pura e do ensaio de tração apresentado por Campello	38
Figura 4.7 - Histórico de carregamento para o comportamento Elástico	39
Figura 4.8 - Histórico de carregamento para o comportamento Elástico Perfeitamente Plástico	39
Figura 4.9 - Histórico de carregamento para o comportamento Elastoplástico Bilinear	39
Figura 4.10 - Condições de contorno do modelo de viga sob momento	40
Figura 4.11- Comportamento Elástico: Deflexão do arame após carregamento	42
Figura 4.12 - Comportamento Elástico: Deflexão do arame após retorno elástico	42
Figura 4.13 - Comportamento elástico perfeitamente plástico: Deflexão do arame após carregamento	43
Figura 4.14 - Comportamento elástico perfeitamente plástico: Deflexão do arame após retorno elástico	43
Figura 4.15 - Comportamento elastoplástico bilinear: Deflexão do arame após carregamento	43
Figura 4.16 - Comportamento elastoplástico bilinear: Deflexão do arame após retorno elástico	44
Figura 4.17 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elástica sob flexão pura	45
Figura 4.18 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após carregamento do modelo elástico de viga sob flexão pura.	46
Figura 4.19 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após carregamento no modelo elástico numérico de viga sob flexão pura	46
Figura 4.20 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elástico de viga sob flexão pura.	47
Figura 4.21 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após retorno elástico do modelo elástico numérico de viga sob flexão pura	48
Figura 4.22 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elástica-perfeitamente plástica sob flexão pura	48

Figura 4.23 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após carregamento do modelo elástico-perfeitamente plástico de viga sob flexão pura.	49
Figura 4.24 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após carregamento no modelo elástico-perfeitamente plástico numérico de viga sob flexão pura	49
Figura 4.25 - Variação do raio de curvatura numérico após carregamento x módulo tangente no modelo elástico-perfeitamente plástico	50
Figura 4.26 - Variação do raio de curvatura numérico após carregamento x módulo tangente no modelo elástico-perfeitamente plástico	51
Figura 4.27 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elástico-perfeitamente plástico de viga sob flexão pura.	52
Figura 4.28 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após retorno elástico no modelo elástico-perfeitamente plástico numérico de viga sob flexão pura	52
Figura 4.29 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elastoplástico bilinear sob flexão pura	53
Figura 4.30 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após carregamento do modelo elastoplástico bilinear de viga sob flexão pura.	54
Figura 4.31 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após carregamento no modelo elastoplástico bilinear numérico de viga sob flexão pura	54
Figura 4.32 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elastoplástico bilinear de viga sob flexão pura.	55
Figura 4.33 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após retorno elástico no modelo elastoplástico bilinear numérico de viga sob flexão pura	55
Figura 5.1 - Visão geral do modelo numérico de viga sob conformação em gabarito: (a) cilindro deslocado em 30°, (b) cilindro em 60°, (c) cilindro em 90° e (d) cilindro em 135°.	56
Figura 5.2 - Componentes do modelo de viga sob conformação em gabarito	57
Figura 5.3 - Dimensões geométricas do colar de dobramento, arame de tração, base e cilindro	57
Figura 5.4 - Contato entre o arame de tração e o colar de dobramento	58
Figura 5.5 - Contato entre o arame de tração e a base	59
Figura 5.6 - Contato entre o arame de tração e o cilindro	59

Figura 5.7 - Passos do modelo de viga sob conformação em gabarito: (a) primeiro passo, (b) segundo passo.	60
Figura 5.8 - Condições de contorno do modelo de viga sob conformação em gabarito	60
Figura 5.9 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elástica sob conformação em gabarito	62
Figura 5.10 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após conformação do modelo elástico de viga sob conformação em gabarito	63
Figura 5.11 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após conformação no modelo elástico numérico de viga sob conformação em gabarito	63
Figura 5.12 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elástico de viga sob conformação em gabarito	64
Figura 5.13 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após retorno elástico no modelo elástico numérico de viga sob conformação em gabarito	65
Figura 5.14 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elástico-perfeitamente plástico sob conformação em gabarito	65
Figura 5.15 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após conformação do modelo elástico-perfeitamente plástico de viga sob conformação em gabarito	66
Figura 5.16 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após conformação no modelo elástico-perfeitamente plástico numérico de viga sob conformação em gabarito	66
Figura 5.17 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elástico-perfeitamente plástico de viga sob conformação em gabarito	67
Figura 5.18 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após retorno elástico no modelo elástico-perfeitamente plástico numérico de viga sob conformação em gabarito	67
Figura 5.19 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elastoplástico bilinear sob conformação em gabarito	68
Figura 5.20 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após conformação do modelo elastoplástico bilinear de viga sob conformação em gabarito	69

Figura 5.21 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após conformação no modelo elastoplástico bilinear numérico de viga sob conformação em gabarito

69

Figura 5.22 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elastoplástico bilinear de viga sob conformação em gabarito

70

Figura 5.23 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elastoplástico bilinear de viga sob conformação em gabarito

70

Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Número de elementos e nós do modelo viga sob flexão pura.....	36
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração das amostras de arame da armadura de tração [1].....	37
Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no modelo de viga sob momento	37
Tabela 4.4 - Momento aplicado para cada comportamento do material.....	40
Tabela 4.5 - Parâmetros de convergência e não-linearidade dos modelos de viga sob flexão pura	41
Tabela 4.6 - Resultado do raio de curvatura após carregamento e após retorno elástico obtidos analiticamente.....	44
Tabela 5.1 - Número de elementos e nós do modelo de viga sob conformação em gabarito	59
Tabela 5.2 - Parâmetros de convergência e não-linearidade dos modelos de viga sob conformação em gabarito.....	61

Introdução

Motivação

1. A indústria do petróleo está em constante crescimento e é destaque no cenário mundial e nacional. Como pode ser visto na Figura 1.1, o petróleo continua sendo a principal fonte primária de energia produzida no país, com participação de 44,24% no ano de 2016 (130,37 milhões de toneladas de petróleo).
- 1.1.

Apesar de antes de 1980 não ter uma participação muito significativa na produção nacional, o petróleo passou a apresentar um crescimento substancial na sua participação a partir dessa década, indo de 13,94% no ano 1980 (9,26 milhões de toneladas de petróleo) para 30,23% no ano 1990 (32,55 milhões de toneladas de petróleo), se tornando a principal energia primária produzida no país, ultrapassando a produção de energia por lenha e carvão vegetal.

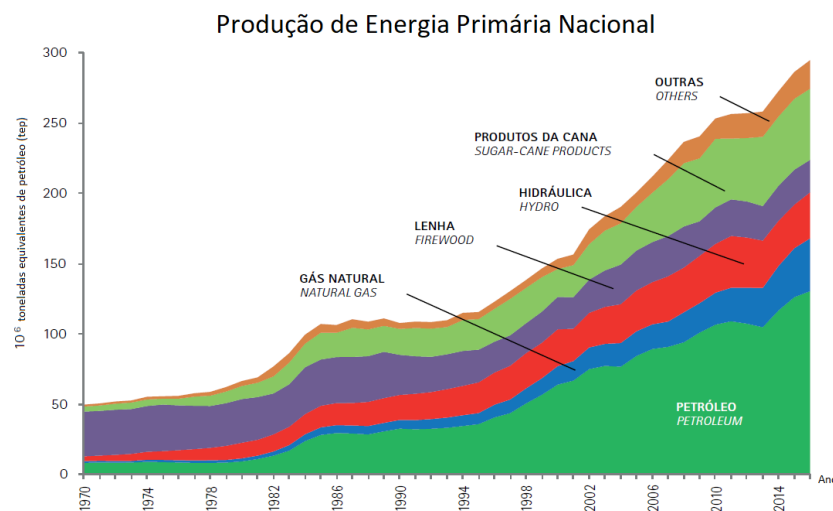


Figura 1.1 - Produção de energia primária de 1970-2016 [3]

Com a descoberta de reservas de petróleo na Bacia de Santos, anunciada pela Petrobrás em 2006, o setor de exploração de petróleo marítimo, conhecido como *offshore*, foi desafiado a superar barreiras tecnológicas para atingir lâminas d'água ultra profundas (1500m a 3000m de lâmina d'água).

Para atender a demanda de exploração de petróleo no mar, o desenvolvimento dos equipamentos estruturais responsáveis pelo transporte de fluidos entre o poço e a plataforma de produção como o duto flexível e seus acessórios, tiveram seus

projetos adaptados para as condições severas da exploração de óleo e gás encontradas nas bacias de águas profundas a fim de evitar ocorrência de falhas e possíveis prejuízos.

Os dutos flexíveis são compostos por camadas concêntricas de metal (carcaça, armadura de pressão, armadura de tração) e material polimérico (camada plástica interna e capa protetora externa), cada camada possuindo funções específicas como, resistência mecânica às pressões internas, externas, carregamentos axiais e garantir estanqueidade do duto, tais funções que serão detalhadas ao longo deste trabalho. Sua conexão com a plataforma ou outra linha de duto flexível é feita através de um acessório conhecido como conector ou *end fitting*.

Um dos principais avanços tecnológicos necessários para que a exploração de petróleo da camada de pré-sal seja possível é a melhoria no desempenho estrutural dos conectores, pois com o aumento da lâmina d'água de exploração do petróleo, o comprimento da linha de flexível necessário aumenta e consequentemente o carregamento a ser suportado pelos conectores e pelos arames que compõem a armadura de tração, camada responsável por suportar carregamento axiais, também aumentam.

Os conectores de topo são os responsáveis pela interface da linha flexível com a plataforma e suportam o maior carregamento por estarem mais próximos da plataforma junto com os arames do primeiro tramo de dutos flexíveis. Atualmente, foram registradas falhas em arames da armadura de tração por MARINHO [6] como ilustra a Figura 1.2.

Na figura 1.2, pode ser visto um duto flexível sem sua camada plástica externa, com seus arames da armadura de tração rompidos próximos da região da interface com o conector que está embebido em resina curada.



Figura 1.2 - Conector dissecado com arames da armadura de tração rompidos [6]

A ruptura dos arames da armadura de tração próximos ao conector é conhecida no setor *offshore*. Dentre as possíveis causas desta falha, tem-se o processo de montagem do conector no duto flexível, que induz tensões residuais axiais nos arames de tração devido ao processo de dobramento e desdobramento aos arames da armadura de tração, que ainda é realizado manualmente sem um devido controle e podendo causar uma redução no tempo de serviço dos dutos flexíveis.

1.2. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o raio de curvatura e o raio de curvatura residual a ser imprimido nos arames da armadura de tração através de dois modelos numéricos e um modelo analítico.

O modelo analítico consiste num modelo bidimensional de previsão de curvatura e curvatura residual de um arame da armadura de tração quando dobrado assumindo os comportamentos: elásticos, elástico-perfeitamente plástico e elastoplástico. Em todos considera-se o comportamento não-linear geométrico associado aos grandes deslocamentos do arame. No segundo modelo é incluído também o efeito do contato, como não-linearidade.

Os modelos numéricos são desenvolvidos no software comercial ANSYS® versão 18.1 e seus resultados comparados com os previstos no modelo analítico sendo avaliada a convergência dos modelos numéricos.

Considerações iniciais

2. Neste capítulo será apresentada uma fundamentação do duto flexível com sua aplicação, composição de suas camadas e funções estruturais. Além desta fundamentação, o processo de montagem do conector com as camadas do duto flexível e suas implicações serão expostos aqui para melhor entendimento do tema proposto.

Duto flexível

- 2.1. Amplamente utilizados no setor *offshore* devido à sua baixa rigidez à flexão, alta resistência à tração e bom isolamento térmico, além de sua facilidade de instalação, transporte e armazenamento, os dutos flexíveis são estruturas compostas por camadas concêntricas metálicas e poliméricas.

Sua função é transportar fluidos entre os poços e a plataforma, podendo ter seu *design* adaptado de acordo com o fluido que está sendo transportada, a temperatura, a lâmina d'água de operação e a vida em serviço.

Dentre as aplicações em que o duto flexível é utilizado, pode-se citar:

- Produção de óleo, escoando o petróleo do poço para armazenamento na plataforma;
- Injeção de gás ou água da plataforma para o poço, visando facilitar a produção de óleo.

O setor *offshore* classifica os tramos de dutos flexíveis que ficam suspensos como *risers* e os tramos que ficam assentados no leito marinho de *flowlines* (Figura 2.1). Dentre as características de um *riser* pode-se citar a sua exposição a carregamentos variáveis no tempo durante a operação, causados por correntes marinhas, carregamentos devido ao movimento do fluido transportado e a movimentação da embarcação ou plataforma em que o *riser* de topo se encontra ancorado, tornando seu projeto muito mais robusto para prevenir falhas por fadiga. Por outro lado, o *flowline* está sujeito a grandes pressões hidrostáticas, sofrendo carregamentos dinâmicos apenas durante seu lançamento.

Além dos *risers* e *flowlines*, diversos arranjos submarinos utilizam flutuadores, visando minimizar as tensões axiais trativas que o *riser* de topo sofre devido ao peso

dos tramos de dutos flexíveis, que se configurado no arranjo de catenária livre (conhecido como *free hanging*, representado na Figura 2.2) ultrapassaria a tensão axial trativa máxima de projeto.

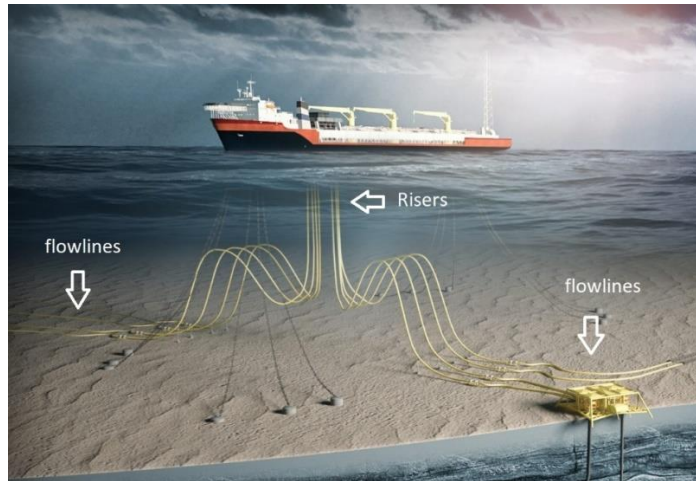


Figura 2.1 – Arranjo submarino de *risers* e *flowlines* [7]

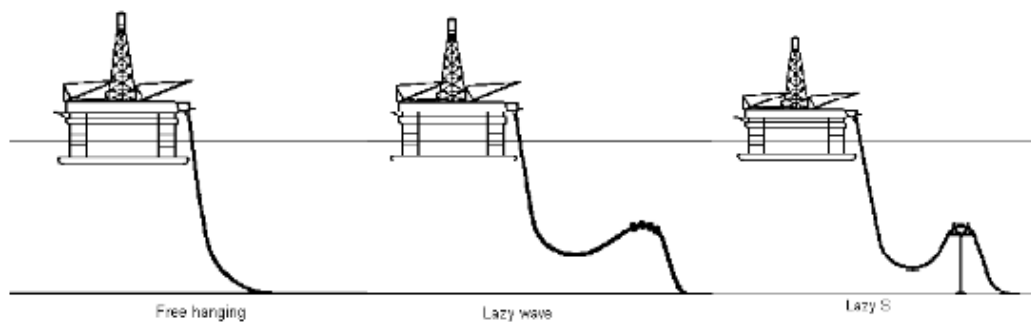


Figura 2.2 - Diferentes arranjos submarinos [8]

Cada camada que compõem o duto flexível (Figura 2.3) tem uma função específica que lhe confere a capacidade de suportar pressões internas, pressões externas, cargas axiais trativas variáveis no tempo e estanqueidade do fluido transportado.

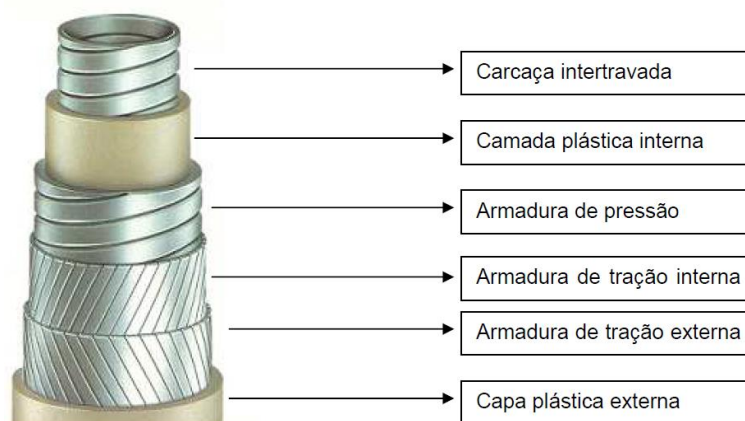


Figura 2.3 – Camadas do duto flexível [9]

Considerando-se da camada mais interna para a mais externa, a carcaça intertravada tem como objetivo resistir a carregamentos radiais compressivos causados pela queda rápida da pressão interna em conjunto com altas pressões hidrostáticas devido à profundidade, não possuindo resistência à tração significativa. Como está em contato direto com o fluido transportado, a mesma está sujeita a ação corrosiva que os componentes do fluido podem causar. Por esse motivo, a carcaça é confeccionada em aço inoxidável e seu perfil (Figura 2.4) auxilia no seu desempenho ao colapso devido ao intertravamento entre as fitas quando enroladas em espiral. O travamento das fitas pode ser realizado com uma ou duas fitas de aço espiraladas com ângulo de assentamento próximo de 90°.

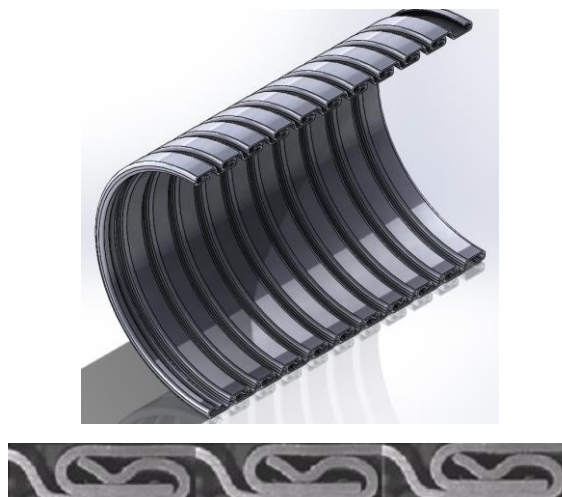


Figura 2.4 – Visão geral e perfil de carcaça intertravada [12]

Normalmente extrudada em cima da carcaça intertravada (Figura 2.5), a camada plástica interna tem como principal função garantir a estanqueidade do fluido

transportado e proteger da corrosão e dos ataques de produtos químicos diluídos no fluido transportado e que podem vir a causar danos às camadas estruturais mais externas.

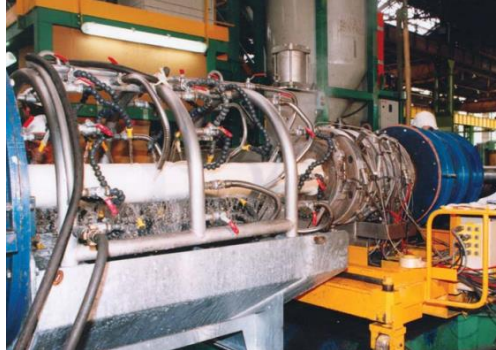


Figura 2.5 - Processo de extrusão da camada plástica interna [14]

A armadura de pressão se trata de uma camada de reforço estrutural responsável por resistir à pressão interna. Normalmente, a geometria das fitas de aço permite que estas se intertravem impedindo a expansão devido a pressões internas. Diferente da carcaça, vários perfis conhecidos de armadura de pressão são utilizados, dentre eles, o perfil tipo-Z (Figura 2.6a).

A armadura de pressão não possui resistência à tração e é tipicamente confeccionada em aço de alto carbono, podendo possuir uma ou duas camadas de armadura espiraladas de forma helicoidal.

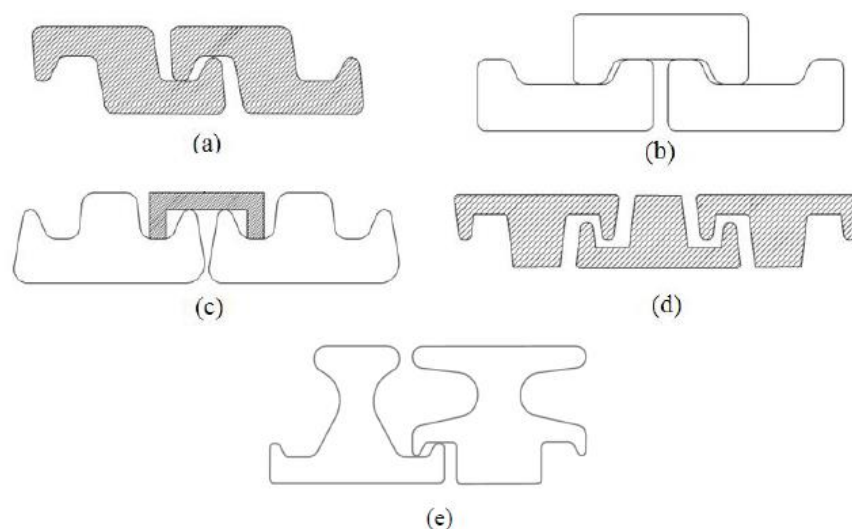


Figura 2.6 – Diferentes perfis de armadura de pressão: (a) formato Z; (b) formato C; (c) formato T – tipo 1; (d) formato T – tipo 2 e (e) formato PSI [10]

Análogo às armaduras de pressão, a armadura de tração pode ser composta de duas camadas de diversos arames de aço de alto carbono que são espiralados durante a fabricação (Figura 2.7), sendo a segunda camada espiralada no sentido contrário da primeira camada. Entretanto, sua geometria é bem mais simples, consistindo apenas de um arame de perfil retangular com as arestas arredondadas (Figura 2.8).

Sendo a única camada com função de resistir às tensões axiais trativas estáticas e principalmente dinâmicas durante a vida de serviço do duto flexível. A ruptura desses arames, normalmente próximo à interface com o conector, é um dos principais modos de falha do flexível. Tensões axiais residuais provenientes do processo de fabricação e do processo de montagem do conector em uma linha de duto flexível contribuem para uma falha prematura dessa estrutura.



Figura 2.7 - Armadura de tração sendo assentada durante a fabricação [11]



Figura 2.8 - Seção transversal do arame da armadura de tração [1]

A camada plástica externa é uma camada polimérica que impede que a água provinda do oceano entre em contato com as camadas metálicas mais internas impedindo que possíveis danos de corrosão na linha flexível ocorram. Sua outra função é proteger as camadas mais internas a fim de evitar possíveis danos durante a instalação ou durante a vida em serviço.

Conector ou *End fitting*

O conector (Figura 2.9), também chamado de *end fitting*, tem por função servir de interface entre os tramos de dutos flexíveis, desde a superfície marinha até o navio responsável por receber o fluido transportado.

Os esforços axiais suportados pelos arames da armadura de tração são transferidos de um tramo para o conector através da aderência dos arames da armadura de tração e do conector com a resina curada no interior do conector.

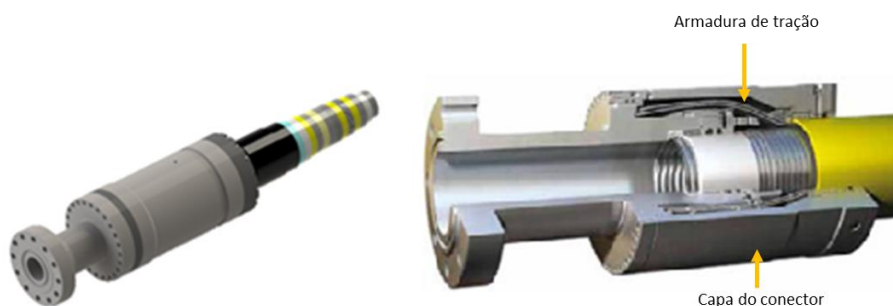


Figura 2.9 - Visão geral de um conector [1]

Além de suportar os esforços axiais da linha flexível, o conector também é projetado para garantir estanqueidade do fluido transportado e da água do mar através de vedações e garantir a vida em serviço sob as condições de grandes pressões hidrostáticas (para *flowlines*) e carregamentos variáveis no tempo (para *risers*).

Normalmente fabricado em aço AISI 4130, o conector é composto por um corpo metálico forjado e de diversas peças que auxiliam na vedação e montagem do conector. Na Figura 2.10, tem-se um desenho de corte longitudinal do conector, onde é demonstrado a interface das camadas do flexível com a parte interna do conector e suas peças.

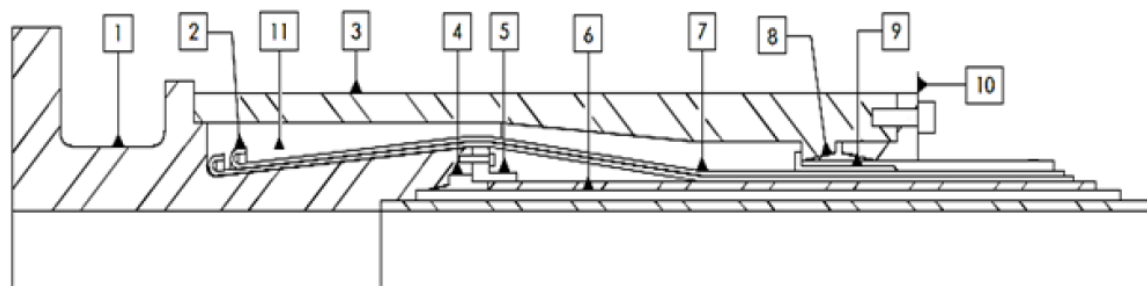


Figura 2.10 – Ilustração de um exemplo de conector e seus componentes [13]

Na Figura 2.10 as peças que compõem a interface do flexível com o conector estão enumeradas. tem-se:

- 1 – Flange de conexão: seu diâmetro interno acompanha o diâmetro da linha e seu diâmetro externo deve possuir um “pescoço” que permita o manuseio de ferramentas para aperto de parafuso e porcas no flange de conexão com acessórios da plataforma ou com outro conector quando se trata de um conector que conecta linhas de flexível.
- 2 – Sistema de Ancoragem: a ancoragem dos arames da armadura de tração é similar ao utilizado em concreto protendido nas construções civis, podendo possuir diferentes geometrias de ancoragem. A Figura 2.11 ilustra os tipos de ancoragem utilizados pelos principais fabricantes de duto flexível. A TechnipFMC faz uso do tipo gancho (Figura 2.11a), cuja extremidade do arame é dobrada em 180°, enquanto a Wellstream/GE tem seu arame conformado em forma de onda ou *crimping* (Figura 2.11b).

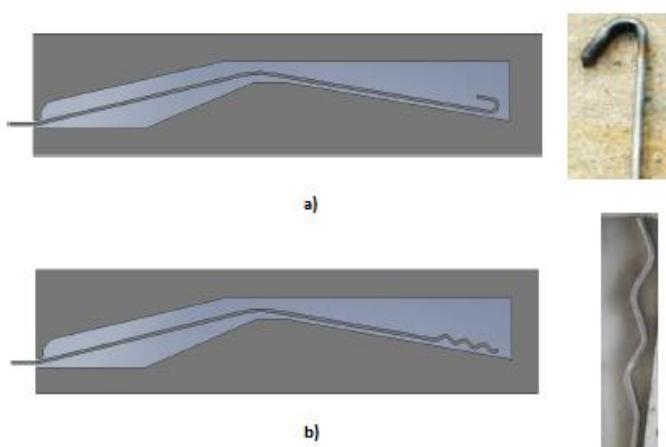


Figura 2.11 - Tipos de ancoragens utilizada pelos principais fabricantes de linhas flexíveis: (a) tipo gancho ou *hook*; (b) tipo ondulações ou *crimping*. [1]

- 3 – Capa do conector: é responsável por proteger a resina e todas as partes internas do conector e sua montagem é feita por parafusos.
- 4 – Anel de vedação interno: anel circular que realiza a vedação da camada plástica interna quando o flange dianteiro é comprimido contra o flange de conexão impedindo a saída de fluidos internos para dentro do conector.
- 5 – Flange dianteiro: é fixado na armadura de pressão e aparafusado no flange de conexão deformando o anel de vedação interno garantindo a assim a vedação.
- 6 – Armadura de pressão: camada metálica descrita no item 2.1.
- 7 – Região de dobramento: as armaduras de tração são dobradas manualmente para que o operador tenha acesso às camadas mais internas do flexível e assim realizar a operação de vedação na camada plástica interna.
- 8 – Anel de vedação externo: peça que veda a camada plástica externa contra a entrada de água para dentro do conector.
- 9 – Cunha de expansão: responsável por suportar os esforços compressivos do flange traseiro contra o anel de vedação externo.
- 10 – Flange traseiro: normalmente aparafusado na capa do conector, o flange traseiro é responsável pela ativação da vedação externa da camada plástica externa.
- 11 – Resina: preenche todo o interior do conector transmitindo os esforços axiais dos arames de tração para o conector.

2.3.

Montagem do conector em uma linha de duto flexível

O processo de montagem de um conector em uma linha de duto flexível geralmente é feito na fábrica, porém pode ser feito *offshore* caso seja necessário para realizar uma inspeção interna ou manutenção. Neste processo, se faz necessário dobrar manualmente os fios da armadura de tração (Figura 2.12) para que o conector possa ser acoplado às camadas mais internas e sua vedação interna realizada. O raio de curvatura a que o arame é submetido durante o processo de dobramento é definido

pelo colar de dobramento (Figura 2.13) montado na região de dobramento (item 7 da Figura 2.11) que pode possuir um raio de 10mm até 90mm, aproximadamente.

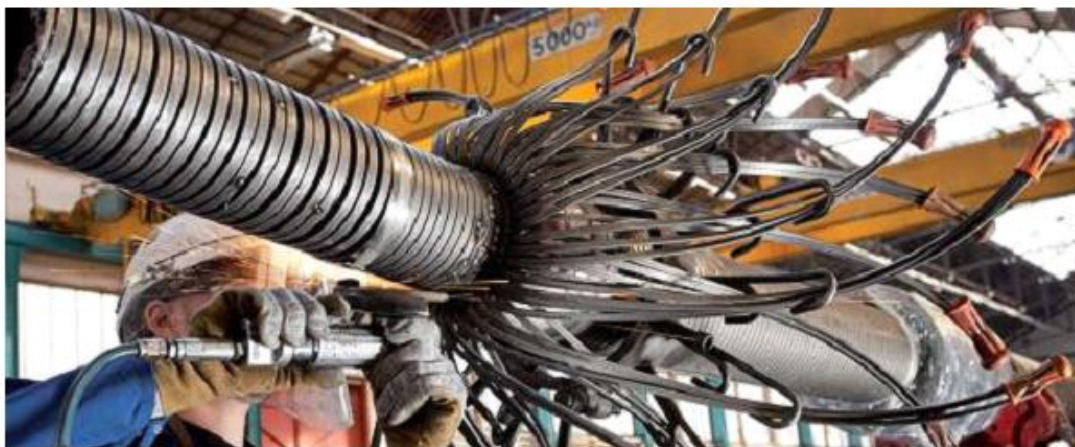


Figura 2.12 - Armadura de tração dobradas sob o colar de dobramento [2]



Figura 2.13 - Arames dobrados sobre o colar de dobramento [1]

Quando o acoplamento e a vedação do conector na linha são finalizados, se desdobra o fio da armadura de tração para que possa fixar a capa do conector na terminação (Figura 2.9). Após a montagem, os vazios dos conectores são preenchidos com uma resina que passará por um processo de cura para garantir que as cargas axiais serão transmitidas para a embarcação ou para o próximo tramo de duto flexível.

Devido à necessidade do dobramento no sentido contrário ao da sua conformação de fabricação para realizar a vedação interna, deformações plásticas são induzidas nos arames da armadura de tração, pois os mesmos são submetidos a uma curvatura maior que a curvatura de escoamento, e consequentemente, acumulam-se tensões axiais residuais consideráveis no fio de armadura no fim da montagem.

Desta forma, considerando que durante a operação estes sofrem esforços axiais alternados, podem falhar por fadiga no interior do conector nas regiões próximas às dobras. Como ilustra a Figura 2.14, as rupturas geralmente acontecem próximas à região de dobramento do arame de tração, onde ocorre deformação plástica durante a montagem.



Figura 2.14 - Ruptura dos arames de tração região próxima às dobras [1]

Solução Analítica

3. Como forma de ilustrar e justificar a fenomenologia dos esforços induzidos no arame de armadura de tração durante o processo de montagem do conector em um tramo de dutos flexíveis, será apresentado o desenvolvimento de um modelo analítico considerando o arame da armadura de tração como uma viga engastada e seu dobramento será realizado através da imposição de um momento na sua extremidade livre sob comportamento elástico, elástico-perfeitamente plástico e elastoplástico bilinear a fim de determinar o raio de curvatura (R) quando um momento é aplicado e o raio de curvatura residual (R_{res}) após a cessão da aplicação do momento.

Aplicação de momento em vigas

- 3.1. Uma viga reta quando submetida à flexão tem suas fibras externas sob tração enquanto as fibras internas sob compressão. As tensões longitudinais σ e as deformações ϵ neste caso variam de valores positivos para negativos ao longo da altura da seção transversal da viga.

Na Figura 3.1 um quadrilátero ABCD representa um elemento de viga que após sofrer flexão se deforma para a posição A'B'C'D'.

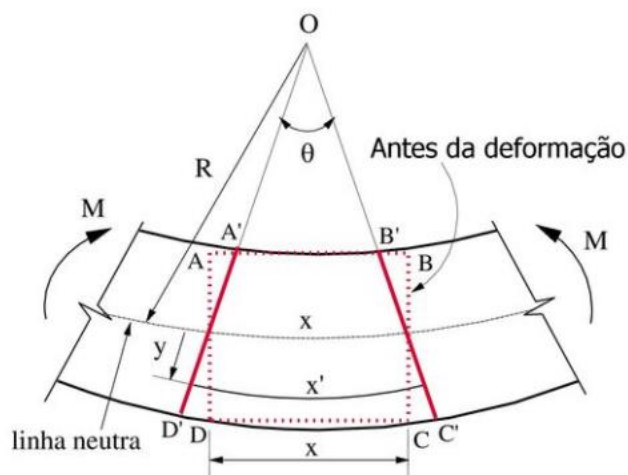


Figura 3.1 - Análise de uma viga sob flexão [15]

Sabendo que x é o comprimento inicial do elemento de viga, o ponto O representa o centro da curvatura, R o raio de curvatura e x' o comprimento do

elemento de viga em uma distância y para a linha neutra. Pode-se demonstrar que a deformação linear axial é igual a:

$$\varepsilon_x = \frac{(\text{Comprimento final} - \text{Comprimento inicial})}{\text{Comprimento inicial}} = \frac{x' - x}{x} \quad (3.1)$$

Da geometria considerada na Figura 3.1, tem-se que a deformação ε_x é expressa em função da distância para a linha neutra y e de acordo com a seguinte equação:

$$\varepsilon_x(y) = \frac{(R + y) \cdot \theta - R \cdot \theta}{R \cdot \theta} = \frac{y}{R} \quad (3.2)$$

Para valores de y positivos, tem-se deformações trativas e para valores de y negativos tem-se deformações compressivas.

Podendo a deformação ser dividida em elástica e plástica:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{plástico} + \varepsilon_{elástico} \quad (3.3)$$

Sabe-se que o raio de curvatura R é inversamente proporcional à curvatura k , logo, pode-se simplificar a equação 3.2 para:

$$\varepsilon_x = k \cdot y \quad (3.4)$$

Considerando cada arame da armadura de tração como uma viga de comprimento L , com seção transversal retangular de largura b e altura $2c$ com momento de inércia I , engastada em $x=0$ e sob efeito de um momento fletor M_0 aplicado na outra extremidade, como ilustra a Figura 3.2, tem-se que o momento fletor $M(x)$, deve satisfazer a equação:

$$\frac{dM(x)}{dx} = 0 \quad (3.5)$$

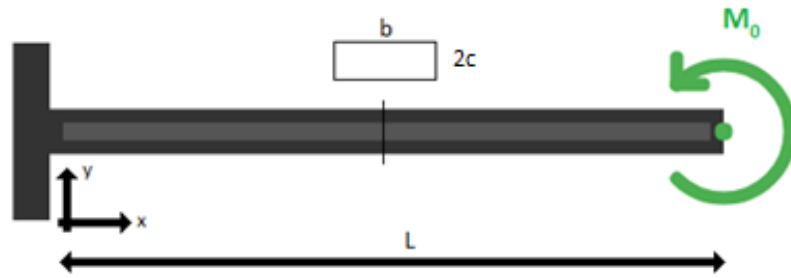


Figura 3.2 - Modelo de viga sob flexão pura

e o momento a ser aplicado em uma viga engastada para que se obtenha um determinado raio de curvatura R é obtido a partir da equação de equilíbrio aos momentos relativamente ao eixo baricêntrico da seção reta:

$$M(R) = \int_A \sigma(y) \cdot y \cdot dA \quad (3.6)$$

3.1.1. Material elástico

Materiais elásticos são caracterizados pela capacidade de retornar ao seu estado inicial após a cessão do esforço aplicado sob o corpo.

Para materiais elásticos a relação tensão-deformação é definida a partir do módulo de elasticidade (E) do material, expresso na seguinte equação:

$$\sigma(y) = E \cdot \varepsilon(y) = E \cdot \frac{y}{R} \quad (3.7)$$

O momento M a ser aplicado para que uma viga tenha um raio de curvatura R é obtido através substituição da equação 3.7 na equação 3.6. Desenvolvendo-a, tem-se:

$$M(R) = 2 \cdot b \int_0^c E \cdot \frac{y}{R} \cdot y \cdot dy = \frac{2 \cdot b \cdot c^3 \cdot E}{3 \cdot R} \quad (3.8)$$

Pode-se simplificar a equação 3.8 para:

$$M(R) = \frac{E \cdot I}{R} = k \cdot E \cdot I \quad (3.9)$$

A relação momento-raio de curvatura é linear e depende simplesmente do módulo de elasticidade do material (E) e momento de inércia (I) da seção transversal do arame.

Material elástico-perfeitamente plástico

3.1.2. Materiais elastoplásticos caracterizam-se por possuir uma comportamento inicialmente elástico e após uma certa condição seu comportamento é plástico gerando deformações permanentes, que não retornam ao estado inicial após a cessão dos esforços.

Para a condição de material com o comportamento elástico-perfeitamente plástico, a relação tensão-deformação é apresentada pelo conjunto das equações 3.10 e 3.11 e também ilustrada na Figura 3.3:

$$\sigma(y) = E \cdot \varepsilon(y) = E \cdot \frac{y}{R} \quad \text{para} \quad \sigma \geq \sigma_E \quad (3.10)$$

$$\sigma(y) = \sigma_E \quad \text{para} \quad \sigma < \sigma_E \quad (3.11)$$

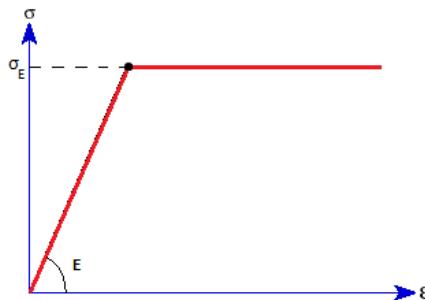


Figura 3.3 - Curva tensão x deformação de material elástico-perfeitamente plástico [4]

O σ_E representa a tensão de escoamento, ou seja, a tensão em que o material deixa de se comportar como um material elástico e inicia sua plastificação.

A deformação de escoamento, analogamente a tensão de escoamento, é o valor de deformação que inicia o regime plástico, sendo representado como:

$$\varepsilon_E = \frac{\sigma_E}{E} \quad (3.12)$$

Como consequência, o raio de curvatura no escoamento é dado por:

$$R_E = \frac{c}{\varepsilon_E} \quad (3.13)$$

O perfil de tensões ao longo da seção transversal da viga varia de acordo com as deformações impostas. Para deformações menores que a deformação elástica a equação 3.10 é a equação que define o perfil de tensões, quando as deformações ultrapassam a deformação elástica as tensões se comportam de acordo com a equação 3.11.

A distância y_e da linha neutra em que a deformação ultrapassa a deformação elástica ε_e é:

$$y_E = \varepsilon_E \cdot R \quad \text{para} \quad \varepsilon_E < \varepsilon(c) \quad (3.14)$$

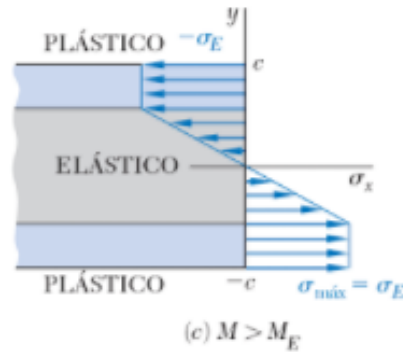


Figura 3.4 - Perfil de tensão de materiais elástico-perfeitamente plástico [5]

O momento fletor M necessário para que uma viga de seção reta retangular alcance a posição com um raio de curvatura R , utilizar-se-á a equação de momento estático. Substituindo as equações 3.10, 3.11, 3.12 e 3.14 na equação 3.6, reasulta:

$$M = 2 \cdot b \left[\int_0^{\varepsilon_E \cdot R} E \cdot \frac{y}{R} \cdot y \cdot dy + \int_{\varepsilon_E \cdot R}^c \sigma_E \cdot y \cdot dy \right] \quad (3.15)$$

Ou ainda:

$$M(R) = b \cdot c^2 \cdot \sigma_E \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{(\varepsilon_E \cdot R)^2}{c^2}\right) \quad (3.16)$$

Material elastoplástico (relação constitutiva bilinear)

Em materiais elastoplásticos bilineares o seu comportamento plástico é definido por um módulo tangente E_p , que representa a relação tensão-deformação para tensões maiores que a tensão de escoamento σ_E (Figura 3.5). A sua relação tensão-deformação está apresentada pelas equações 3.17 e 3.18:

$$\sigma(y) = E \cdot \varepsilon(y) = E \cdot \frac{y}{R} \quad \text{para} \quad \sigma \geq \sigma_E \quad (3.17)$$

$$\sigma(y) = \sigma_E + E_p \cdot \left(\frac{y}{R} - \frac{y_E}{R}\right) \quad \text{para} \quad \sigma < \sigma_E \quad (3.18)$$

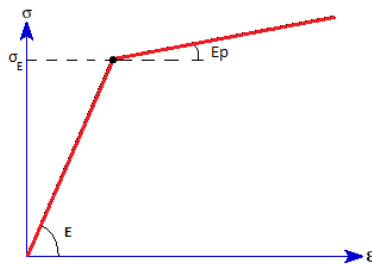


Figura 3.5 - Curva tensão x deformação de material elastoplástico bilinear [4]

Pode-se concluir que para E_p nulo, o comportamento é igual ao de um material elástico-perfeitamente plástico. Substituindo as equações 3.14, 3.17 e 3.18, na equação 3.6, a equação de momento para materiais elastoplásticos bilinear resulta em:

$$M(R) = 2 \cdot b \left[\int_0^{\varepsilon_E \cdot R} E \cdot \frac{y}{R} \cdot y \cdot dy + \int_{\varepsilon_E \cdot R}^c \left(\sigma_E + E_p \cdot \left(\frac{y}{R} - \frac{\varepsilon_E \cdot R}{R} \right) \right) \cdot y \cdot dy \right] \quad (3.19)$$

Ou ainda:

$$M(R) = 2 \cdot b \cdot \left[R^2 \cdot \left[\frac{\varepsilon_e^3}{6} \cdot (E_p - E) \right] + R^{-1} \left(\frac{E_p \cdot c^3}{12} \right) + \left[\frac{\varepsilon_e \cdot c^2}{4} \cdot (E - E_p) \right] \right] \quad (3.20)$$

Retorno elástico

Quando o momento aplicado na viga é cessado, as deformações elásticas se tornam nulas ocorrendo assim um relaxamento da viga, assumindo um raio de curvatura residual R_{res} . Esse processo de relaxamento, após cessar o carregamento, é conhecido como retorno elástico.

Para um dado momento M_0 aplicado em uma viga sob comportamento elastoplástico, uma curvatura k_0 é alcançada e após a cessão do momento M_0 , uma curvatura $k_{residual}$ é obtida. A relação momento fletor (M) e curvatura (k) no processo de carregamento e de retorno elástico pode ser vista na Figura 3.6.

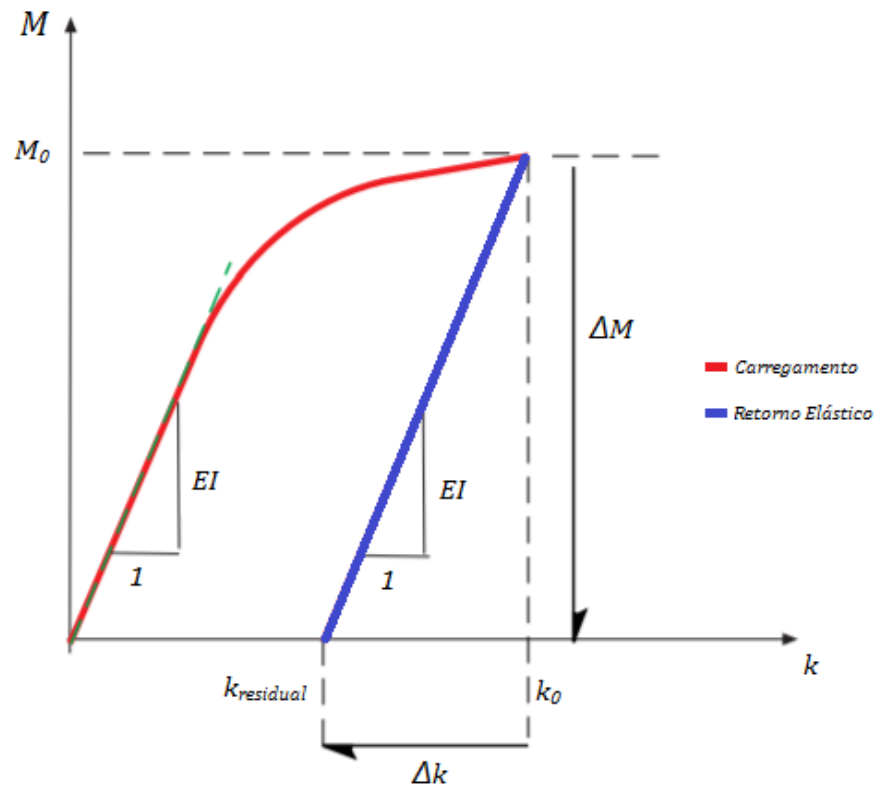


Figura 3.6 - Gráfico de Momento x Curvatura durante carregamento e retorno elástico [16]

Logo, a curvatura residual $k_{residual}$ pode ser obtida da equação:

$$k_{residual} = k_0 - \frac{M_0}{E \cdot I} \quad (3.21)$$

e para o raio de curvatura residual $R_{residual}$ tem-se:

$$R_{residual} = \frac{1}{\frac{1}{R_0} - \frac{M_0}{E \cdot I}} \quad (3.22)$$

Modelo Numérico de Viga sob Flexão Pura

4. Neste capítulo estão apresentadas as principais características do modelo numérico de elementos finitos desenvolvido para avaliar a curvatura e a curvatura residual das armaduras de tração. Esse modelo consiste na simulação de uma viga engastada sob flexão pura, grandes deslocamentos e grandes ângulos de rotação da seção reta como primeira forma de representar o dobramento dos arames da armadura de tração durante o processo de montagem do conector.

Para o comportamento do material, são considerados comportamentos lineares (material elástico) e não lineares (elástico-perfeitamente plástico e elastoplástico bilinear) e os resultados serão comparados com os dos modelos analíticos apresentados no Capítulo 3.

Premissas

4.1.

Uma das premissas simplificadoras desse modelo consiste na planificação do formato helicoidal dos arames da armadura de tração em um modelo 2D de viga de seção retangular, ilustrado na Figura 4.1. Além disso, se assume que o arame está sem tensão residual resultante do processo de fabricação e que não há rotação da seção retangular ao longo do comprimento do arame.

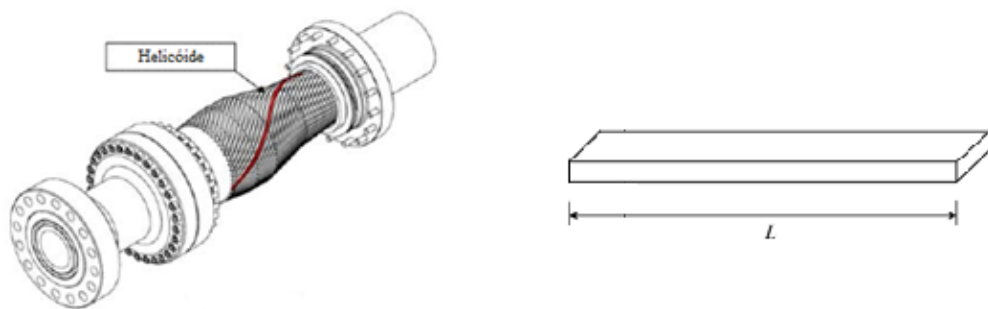


Figura 4.1 - Simplificação do arame de armadura de tração para uma viga reta de seção retangular [1]

O modelo assume, ainda como premissa, um colar de dobramento com raio de 60mm e uma rotação máxima da seção reta da viga (φ) de 135° durante o processo de dobramento dos arames, exemplificados na Figura 4.2.

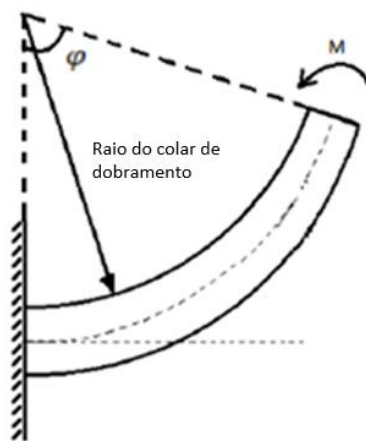
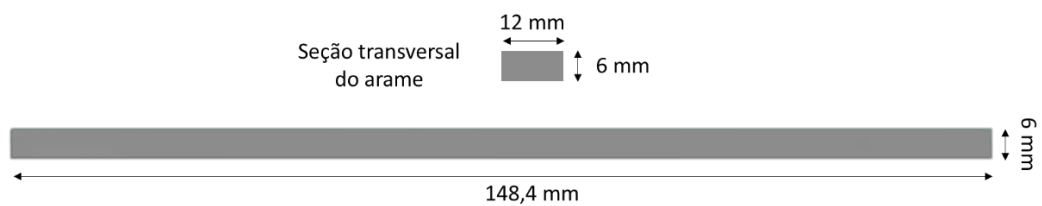


Figura 4.2 - Imagem Adaptada de uma viga sob flexão pura [4]

Parâmetros geométricos do modelo

- 4.2. Os valores utilizados para as grandezas geométricas do modelo estão apresentados na Figura 4.3, atendendo à premissa de rotação máxima da seção reta da viga.



- 4.3. Figura 4.3 – Dimensões do arame utilizadas no modelo de viga sob momento

Características da malha de elementos finitos

Os arames da armadura de tração foram modelados com elementos bidimensionais de primeira ordem do tipo PLANE182 (Figura 4.4), quadriláteros compostos de quatro nós. Apresentando dois graus de liberdade por nó (translação em direção nodais x e y).

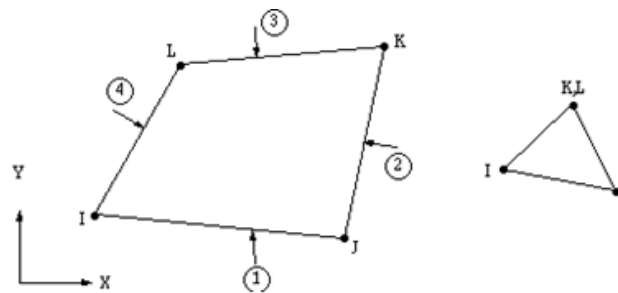
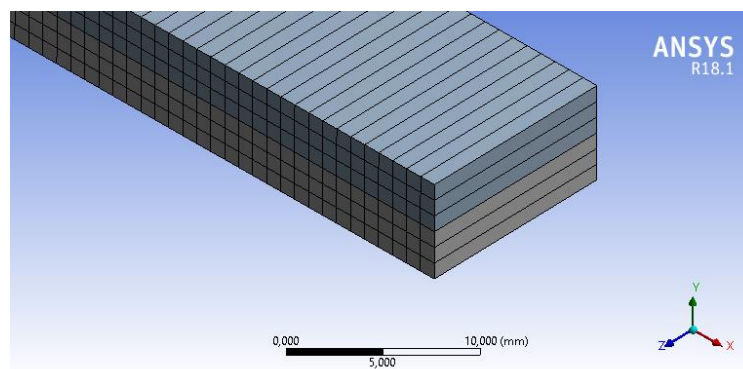


Figura 4.4 - Representação do Elemento PLANE182 [17]

Os elementos bidimensionais utilizados possuem dimensões de 1mm x 1mm resultando na malha apresentada na Figura 4.5 com a quantidade de elementos e nós descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Número de elementos e nós do modelo viga sob flexão pura

Número de Nós	1050
Número de Elementos	894



4.4.

Figura 4.5 – Visão detalhada dos elementos do modelo proposto

Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no modelo

Neste modelo são realizadas três simulações com materiais de comportamentos distintos apresentados no Capítulo 3: elástico, elástico-perfeitamente plástico e elastoplástico bilinear.

Na representação das propriedades mecânicas similares a de um arame da armadura de tração, foi utilizado como referência o ensaio de tração com amostras de arames de armadura de tração realizado por CAMPELLO [1] com as propriedades mecânicas obtidas apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração das amostras de arame da armadura de tração [1]

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Limite de Escoamento [MPa]	Limite de Resistência [MPa]	Coefficiente de Poisson
Aço (armadura de tração)	200	1331,5	1550	0,3

Baseado nestes valores, a tabela 4.3 apresenta as propriedades mecânicas escolhidas para cada tipo de material que será utilizado neste modelo numérico.

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no modelo de viga sob momento

Grandezas	Comportamento do Material		
	I*	II*	III*
Módulo de Elasticidade (E)	200 GPa	200 GPa	200 GPa
Tensão de Escoamento (σ_E)	-	1331,5 MPa	1331,5 MPa
Módulo Tangente (E_p)	-	0	3 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3	0,3

*I – Elástico; II – Elástico-Perfeitamente Plástico; III – Elastoplástico Bilinear

A Figura 4.6 ilustra o gráfico de tensão x deformação experimental do ensaio de tração realizado por CAMPELLO [1] e as curvas de tensão x deformação dos modelos elásticos (I), elásticos-perfeitamente plásticos (II) e elastoplástico bilinear (III) de acordo com as grandezas da Tabela 4.3.

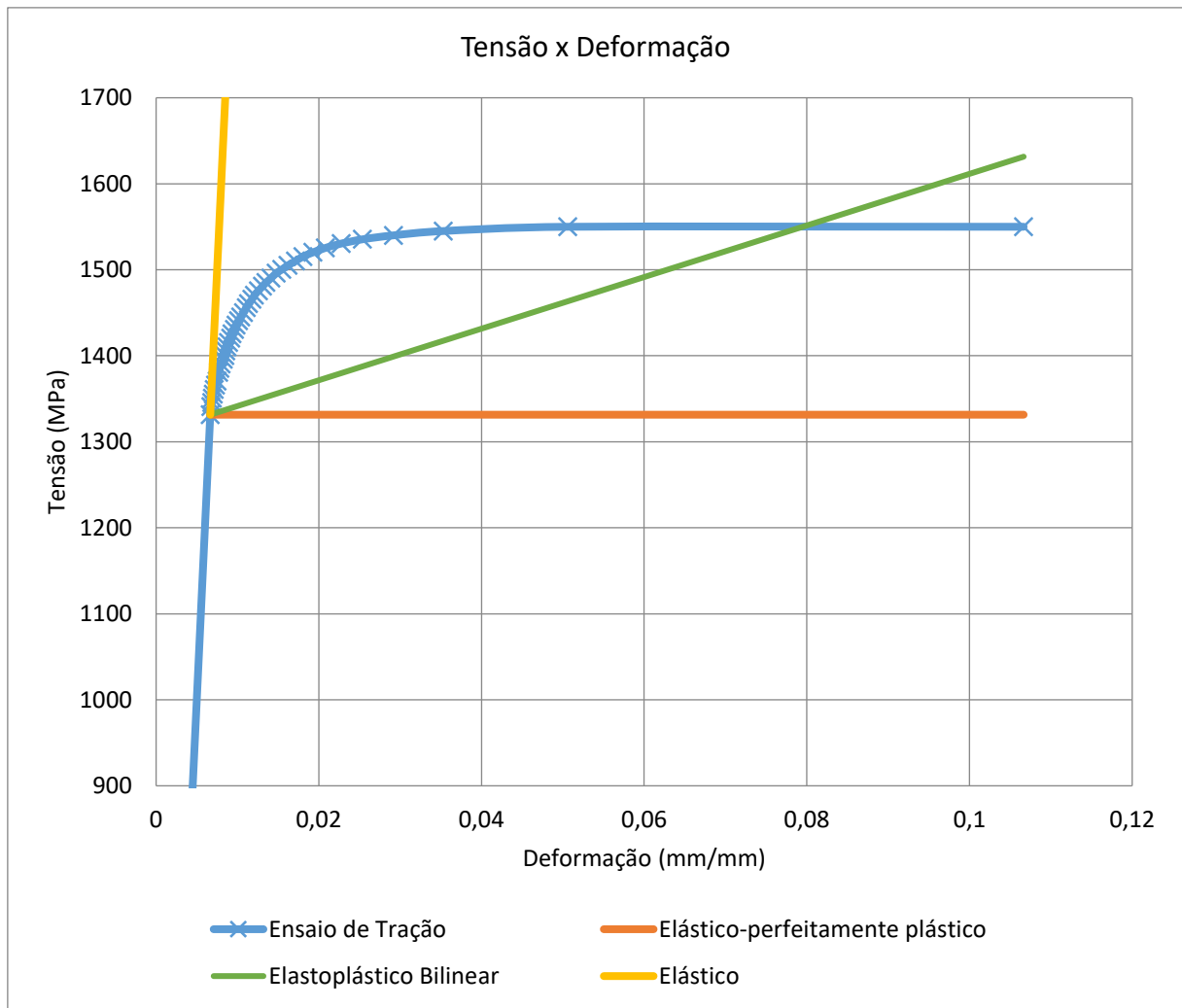


Figura 4.6 - Gráfico de tensão x deformação dos materiais que serão utilizados no modelo de viga sob flexão pura e do ensaio de tração apresentado por Campello

Definidas as premissas, a geometria e as propriedades mecânicas do modelo, o momento fletor necessário a ser aplicado na extremidade da viga para cada comportamento constitutivo do material é obtido através do modelo analítico apresentado no Capítulo 3. O histórico de carregamento por curvatura a que o arame deve ser submetido estão apresentados nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9.

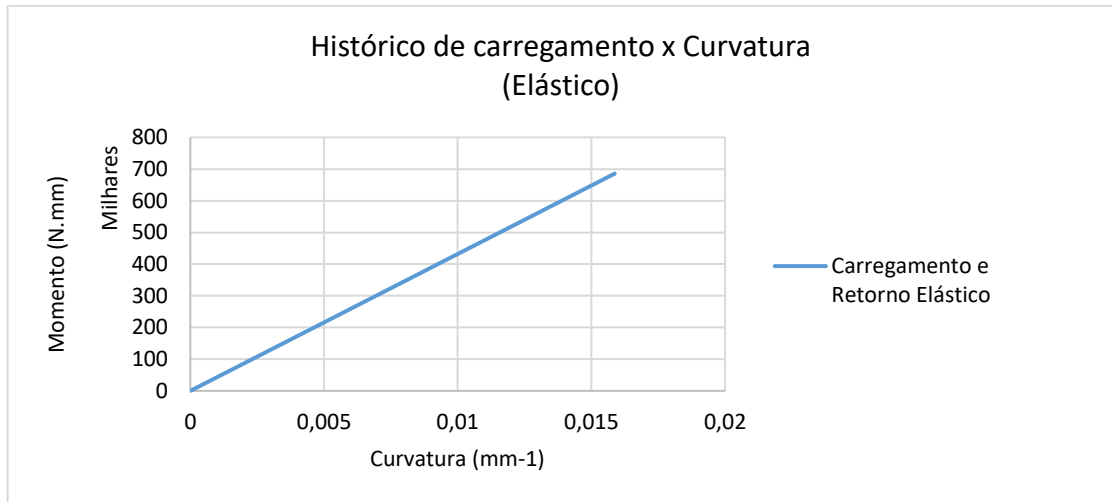


Figura 4.7 - Histórico de carregamento para o comportamento Elástico

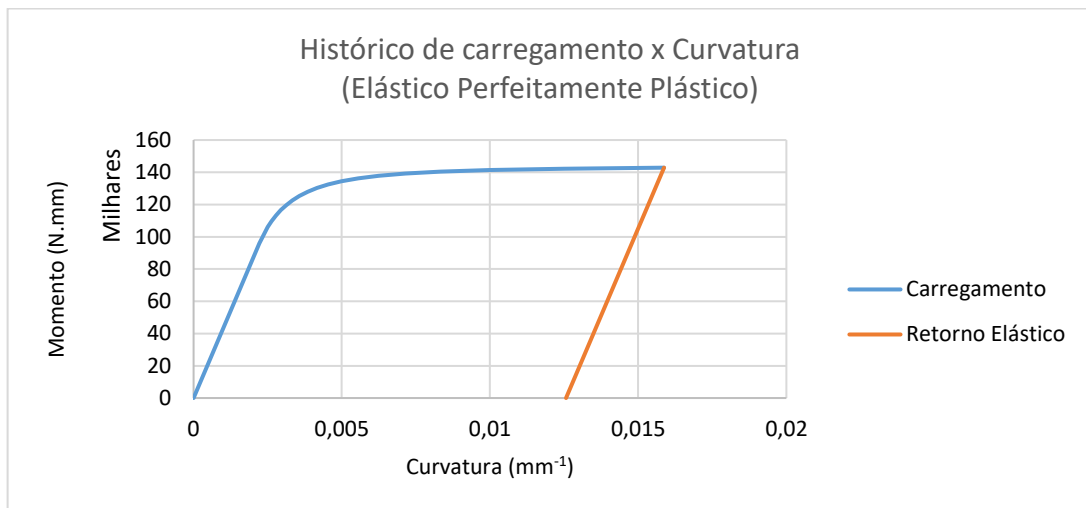


Figura 4.8 - Histórico de carregamento para o comportamento Elástico Perfeitamente Plástico

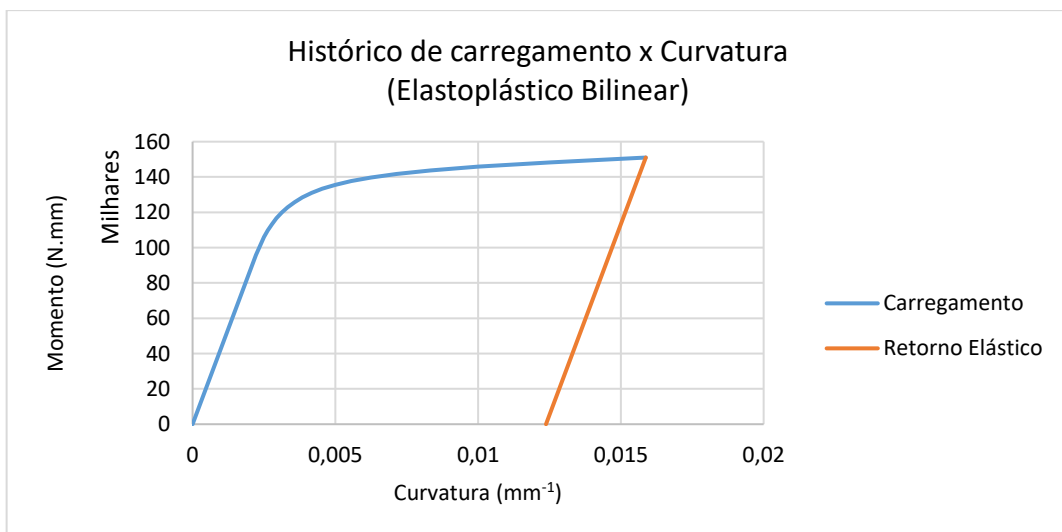


Figura 4.9 - Histórico de carregamento para o comportamento Elastoplástico Bilinear

Metodologia

A metodologia adotada neste modelo foi dividida em dois passos: o 1º considera-se a aplicação progressiva da carga momento e no 2º considera-se o retorno elástico da viga cessada a ação do momento aplicado. Seguindo as premissas estabelecidas na seção 4.1, as condições de contorno aplicadas ao modelo estão apresentadas na Figura 4.10, sendo:

- Condição de contorno A – Os nós da extremidade da viga fixos, impossibilitados de se deslocarem, configuração “*Fixed Support*” do ANSYS.

- Condição de contorno B – Momento aplicado aos nós da extremidade livre da viga, configuração “*Moment*” do ANSYS.

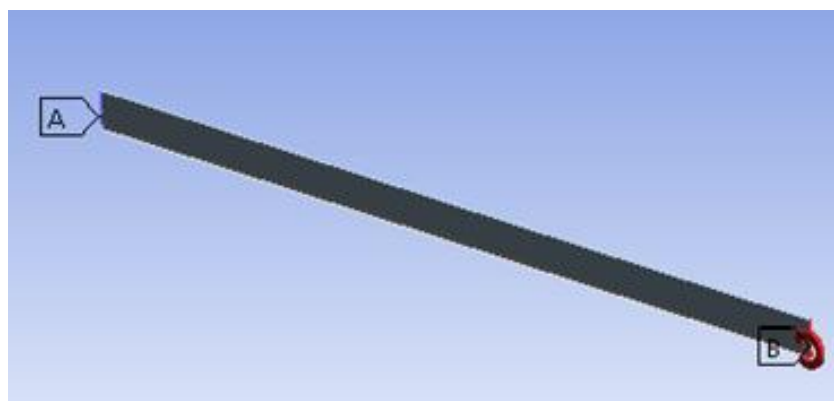


Figura 4.10 - Condições de contorno do modelo de viga sob momento

O momento a ser aplicado na extremidade livre da viga no 1º passo para atender as premissas adotadas de raio de curvatura para os comportamentos elásticos, elástico-perfeitamente plástico e elastoplástico bilinear foram calculados através das equações 3.9, 3.16 e 3.20, respectivamente. A tabela 4.4 apresenta o resultado dos cálculos de momento utilizados para cada comportamento do material neste modelo.

Tabela 4.4 - Momento aplicado para cada comportamento do material

Comportamento do material	Momento Aplicado no 1º passo	Momento Aplicado no 2º passo
Elástico	685714 N.mm	0
Elástico-perfeitamente plástico	142865 N.mm	0
Elastoplástico bilinear	151008 N.mm	0

Os parâmetros relativos a convergência e a não-linearidade do modelo foram definidos para cada simulação de acordo com os valores apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros de convergência e não-linearidade dos modelos de viga sob flexão pura

Parâmetros de convergência	I*		II*		III*	
	1º passo	2º passo	1º passo	2º passo	1º passo	2º passo
Número inicial de Subpassos	50	10	100	10	100	10
Número mínimo de Subpassos	10	10	10	10	100	10
Número máximo de Subpassos	1000	10	10 ⁶	1000	10 ⁵	100
<i>Large Deflections</i>	On		On		On	

*I – Elástico; II – Elástico-Perfeitamente Plástico; III – Elastoplástico Bilinear

Para avaliação da curvatura e da curvatura residual, foram definidos como *saída* das simulações em cada modelo, os seguintes parâmetros:

- Coordenadas x dos nós da linha neutra da viga no passo 1;
- Coordenadas y dos nós da linha neutra da viga no passo 1;
- Coordenadas x dos nós da linha neutra da viga no passo 2;
- Coordenadas y dos nós da linha neutra da viga no passo 2;
- Histórico do carregamento por *subpassos* dos passos 1 e 2.

A curvatura no carregamento e a curvatura residual ao longo da viga foram avaliadas discretizando-se a seguinte equação contínua de curvatura:

$$R = \frac{(x'^2 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}{|x'y'' - x''y'|} \quad (4.1)$$

E como resultado desta discretização, tem-se:

$$R_i = \frac{[(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2]^{\frac{3}{2}}}{|(x_i - x_{i-1})(y_{i+1} - 2 \cdot y_i + y_{i-1}) - (y_i - y_{i-1})(x_{i+1} - 2 \cdot x_i + x_{i-1})|} \quad (4.2)$$

Sendo R_i , o raio de curvatura em relação ao nó i da linha neutra, x_i , a coordenada x do nó i , y_i , a coordenada y no nó i .

Os valores de raio de curvatura ao longo da viga foram aproximados para uma equação de 1º grau e seu valor médio foi utilizado como critério de avaliação dos resultados de curvatura.

As figuras 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 mostram a deformação total do nós, a média geométrica da deformação, obtida das simulações realizadas.

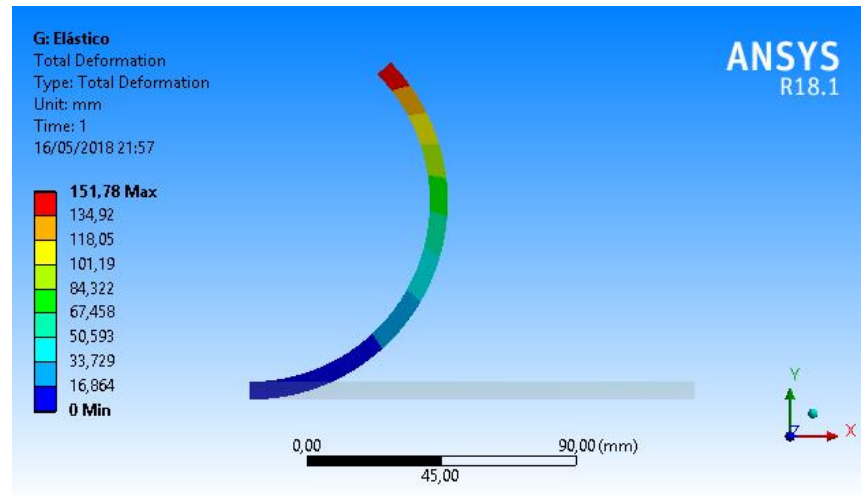


Figura 4.11- Comportamento Elástico: Deflexão do arame após carregamento

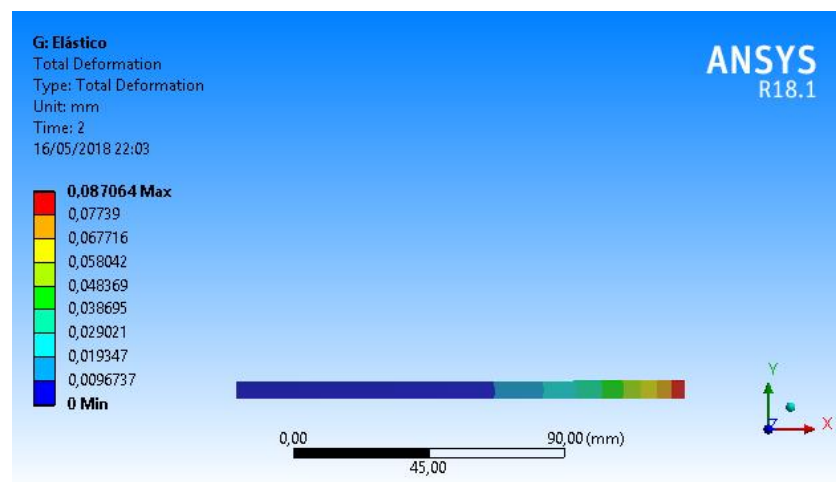


Figura 4.12 - Comportamento Elástico: Deflexão do arame após retorno elástico

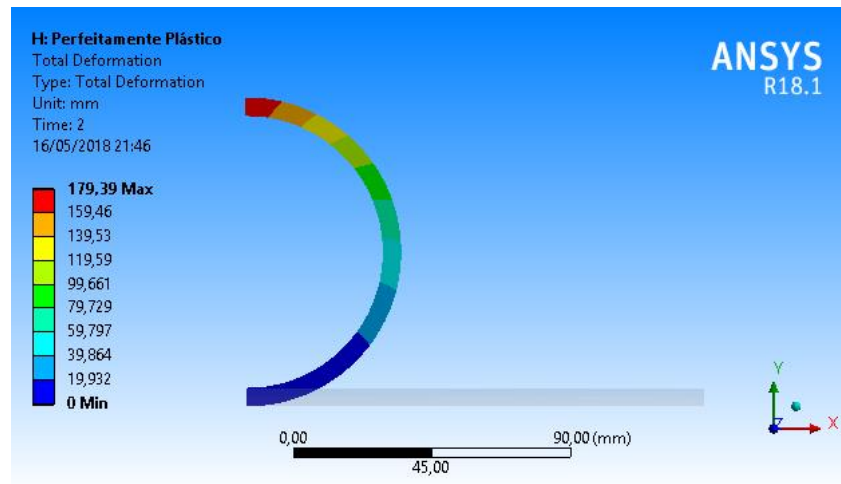


Figura 4.13 - Comportamento elástico perfeitamente plástico: Deflexão do arame após carregamento

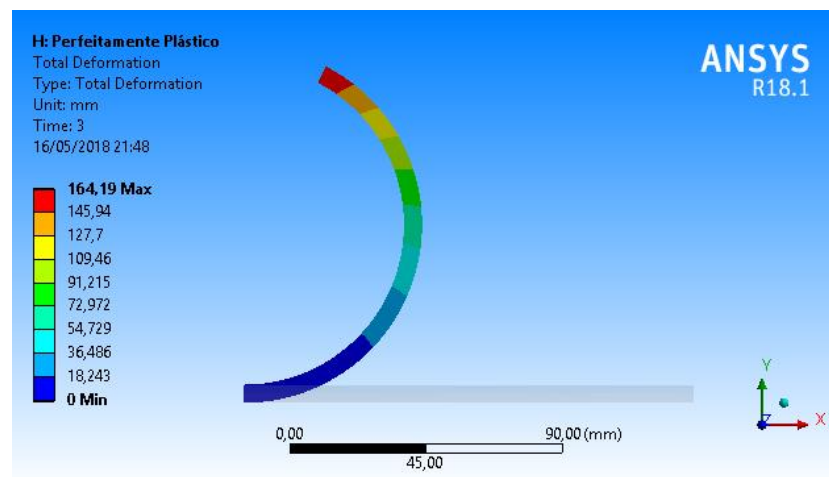


Figura 4.14 - Comportamento elástico perfeitamente plástico: Deflexão do arame após retorno elástico

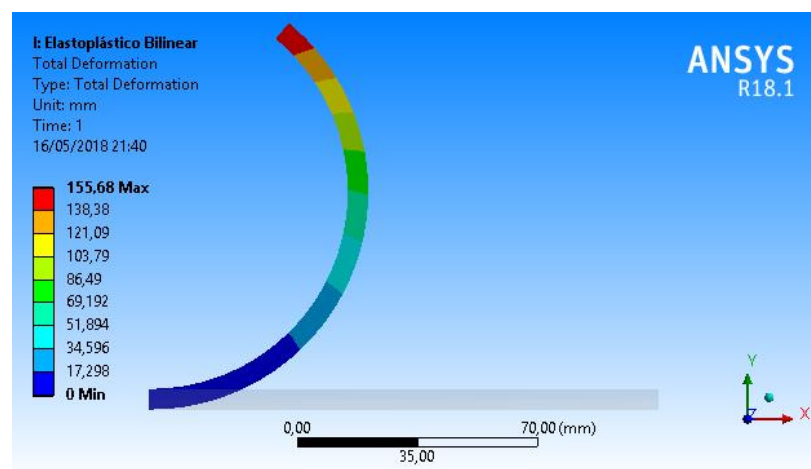


Figura 4.15 - Comportamento elastoplástico bilinear: Deflexão do arame após carregamento

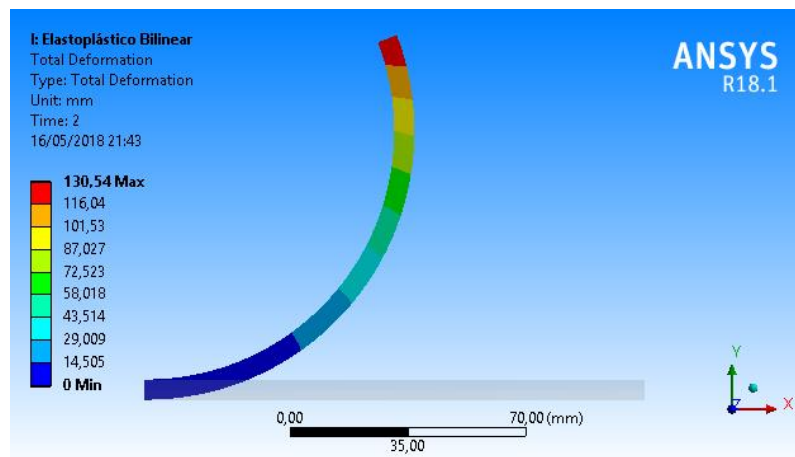


Figura 4.16 - Comportamento elastoplástico bilinear: Deflexão do arame após retorno elástico

Resultados

- 4.6. Os resultados dos raios de curvatura no carregamento e após retorno elástico da linha neutra do arame obtidos analiticamente sob as premissas do modelo de viga sob flexão pura estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultado do raio de curvatura após carregamento e após retorno elástico obtidos analiticamente

Comportamento	Raio de curvatura analítico	
	Após carregamento	Após retorno elástico
Elástico	63 mm	Infinito
Elástico-perfeitamente plástico	63 mm	79,6 mm
Elastoplástico bilinear	63 mm	80,8 mm

O raio de curvatura após carregamento resulta do somatório do raio do colar de dobramento (60 mm) e a distância da fibra interna para a linha neutra (3 mm). O raio obtido após retorno elástico é menor no modelo elástico-perfeitamente plástico pois após a tensão de escoamento suas deformações são unicamente plásticas.

O modelo elastoplástico bilinear possui deformações elásticas e plásticas após a tensão de escoamento devido seu módulo tangente positivo, contribuindo assim para o retorno elástico do arame.

Comportamento Elástico

Para a convergência do modelo elástico um total de 24 subpassos foram necessários, sendo 14 subpassos associados ao primeiro passo (carregamento) e 10 subpassos associados ao segundo passo (descarregamento). O momento alcançado ao final do primeiro passo foi de 685210,00 N.mm, um erro de 0,736% em relação ao valor analítico. O histórico de carregamento utilizado por subpasso está apresentado na Figura 4.17.

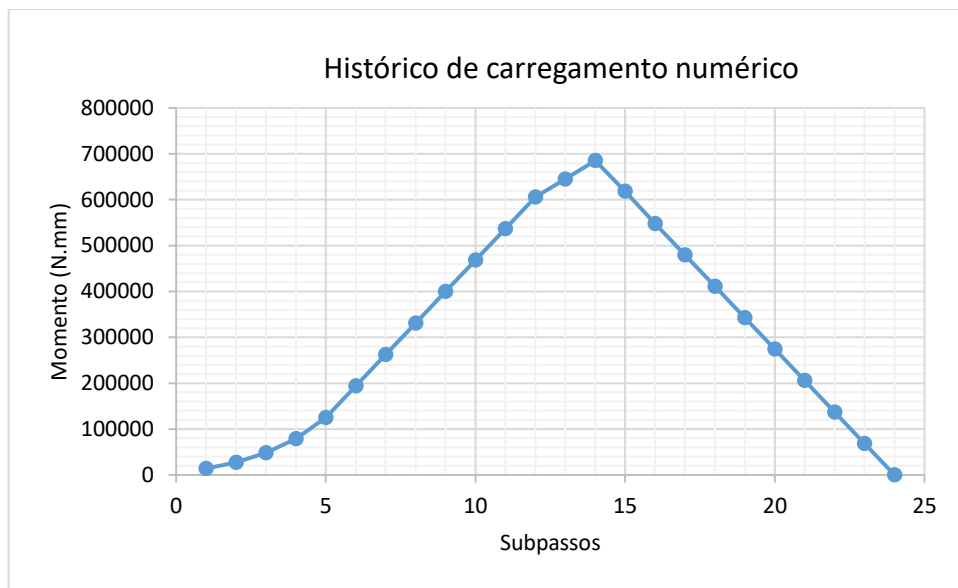


Figura 4.17 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elástica sob flexão pura

Para os resultados de carregamento (1º passo), os valores do raio de curvatura de cada nó da linha neutra do arame e a equação aproximada de 1º grau são ilustradas na Figura 4.19 com valor médio obtido de 64,094 mm e um erro de 1,74%, em relação ao raio de curvatura analítico.

Na Figura 4.18 a posição do arame deformado obtida numericamente após carregamento obtida numericamente é comparada com a solução fornecida pelo modelo numérico.

Uma maior amplitude na oscilação dos resultados de raio de curvatura em cada nó do arame é observada na extremidade livre ($x=148,4$ mm) e na extremidade fixa do arame ($x=0$ mm) devido sua proximidade às condições de contorno do modelo.

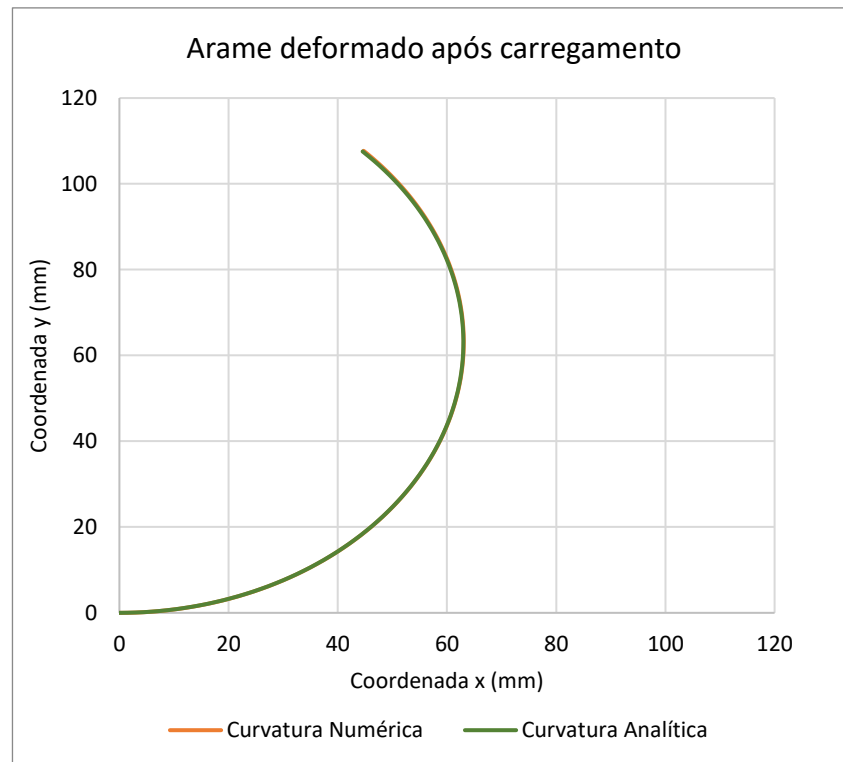


Figura 4.18 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após carregamento do modelo elástico de viga sob flexão pura.

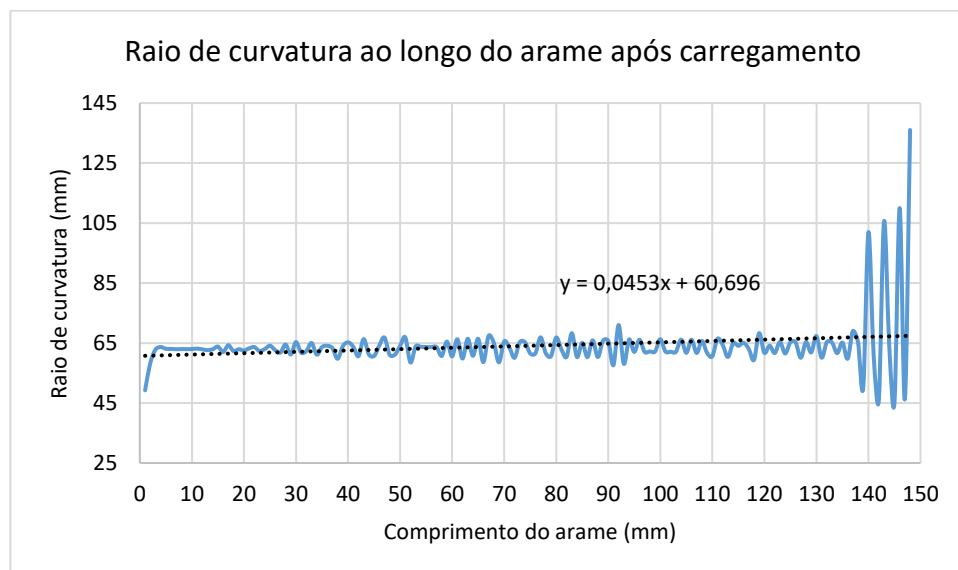


Figura 4.19 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após carregamento no modelo elástico numérico de viga sob flexão pura

Para o descarregamento (2º passo), as posições do arame obtidas numericamente e analiticamente estão ilustradas na Figura 4.20. Observa-se que na extremidade fixa do arame as posições são bem próximas enquanto na extremidade livre obteve-se uma deflexão máxima de 0,0867 mm. Devido a essa pequena variação na posição vertical entre os nós do modelo, os resultados dos raios de curvatura de cada nó possuem valores elevados, como ilustrado na Figura 4.21.

Pode-se observar que o raio de curvatura ao longo da linha neutra dos nós do arame (Figura 4.20) possuem variações consideráveis no seu resultado. Por se tratar de um arame praticamente sem variação na posição vertical, os valores do raio de curvatura dos nós próximos da extremidade fixa do arame tendem a infinito, adquirindo resultados com uma ordem de grandeza maior que os outros nós do arame.

Através do valor médio da curva aproximada de 1º grau, apresentada na Figura 4.22, obteve-se um raio de curvatura de 242375 mm enquanto que no modelo analítico este valor é infinito.

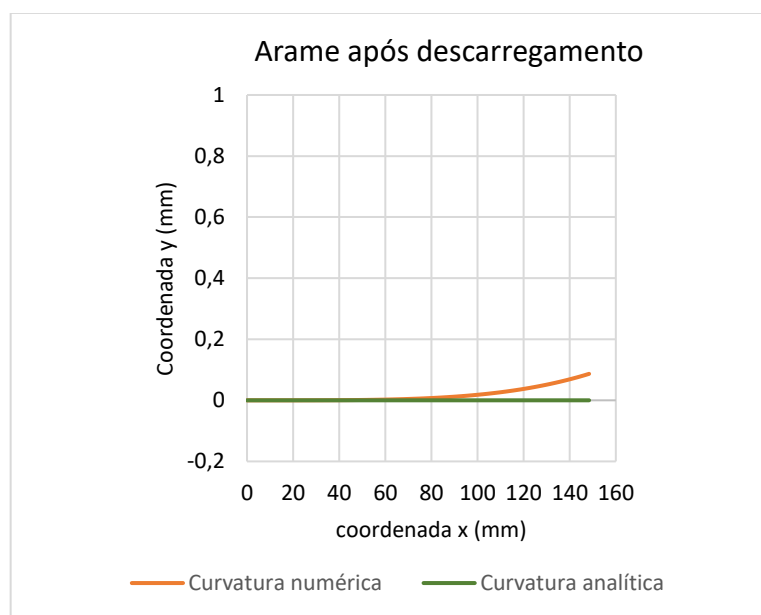


Figura 4.20 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elástico de viga sob flexão pura.

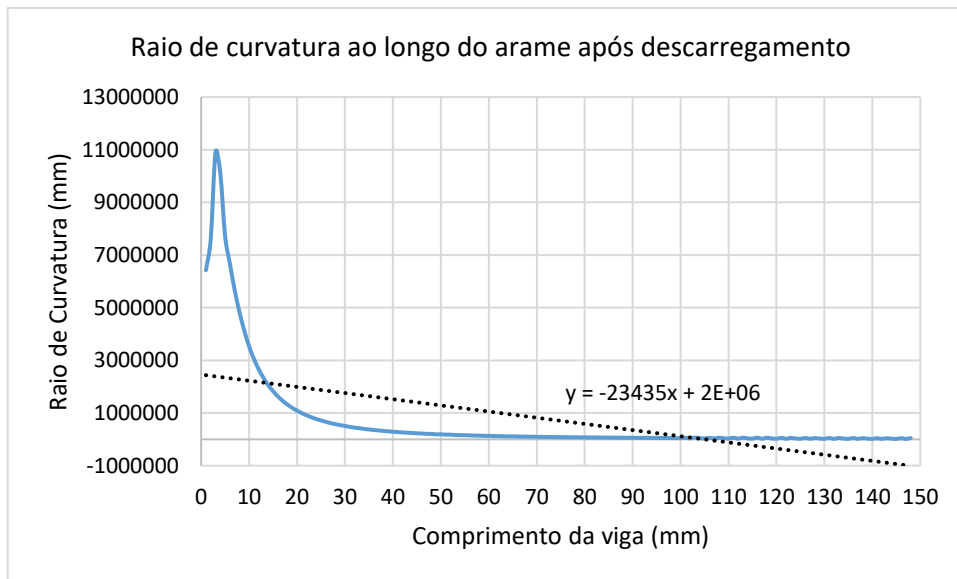


Figura 4.21 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após retorno elástico do modelo elástico numérico de viga sob flexão pura

Comportamento elástico-perfeitamente plástico

4.6.2.

O histórico de carregamento do modelo elástico-perfeitamente está apresentado na Figura 4.22. Neste histórico, foram necessários 117 subpassos para convergência, sendo 105 subpassos relacionados a convergência do primeiro passo e 12 subpassos relacionados a convergência do segundo passo. O momento alcançado pelo modelo ao fim do primeiro passo é igual a 142760 N.mm, um erro de 0,07% quando comparada com o valor analítico.

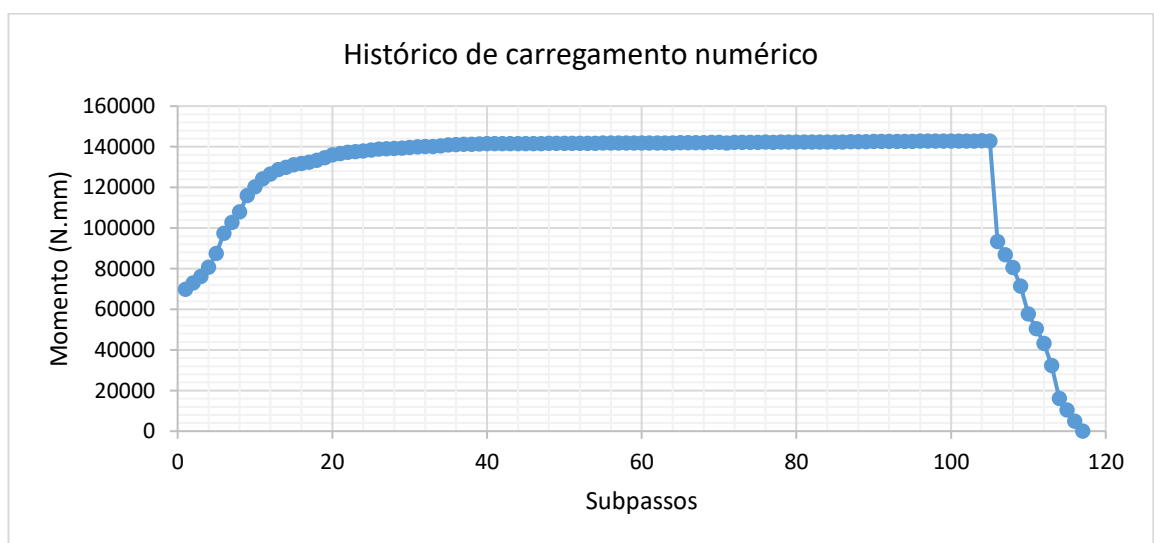


Figura 4.22 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elástica-perfeitamente plástica sob flexão pura

Para o carregamento (primeiro passo), o raio de curvatura obtido através do valor médio da curva aproximada de 1º grau do raio de curvatura dos nós da linha neutra do arame (Figura 4.24) foi de 47,12 mm, um erro de 25,1% do valor analítico previsto. A Figura 4.23 ilustra uma diferença considerável nos raios de curvatura do arame obtidos pelo modelo numérico e pelo modelo analítico.

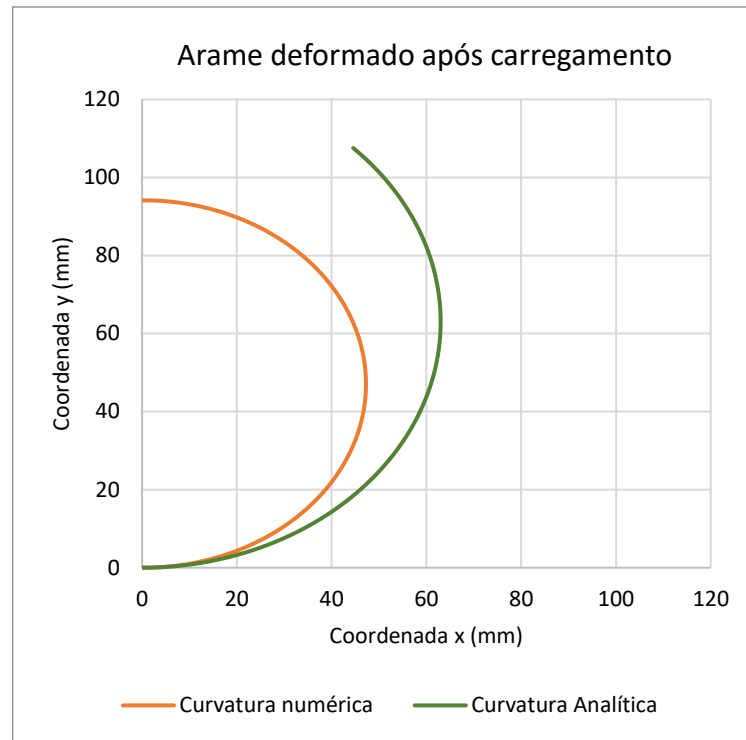


Figura 4.23 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após carregamento do modelo elástico-perfeitamente plástico de viga sob flexão pura.

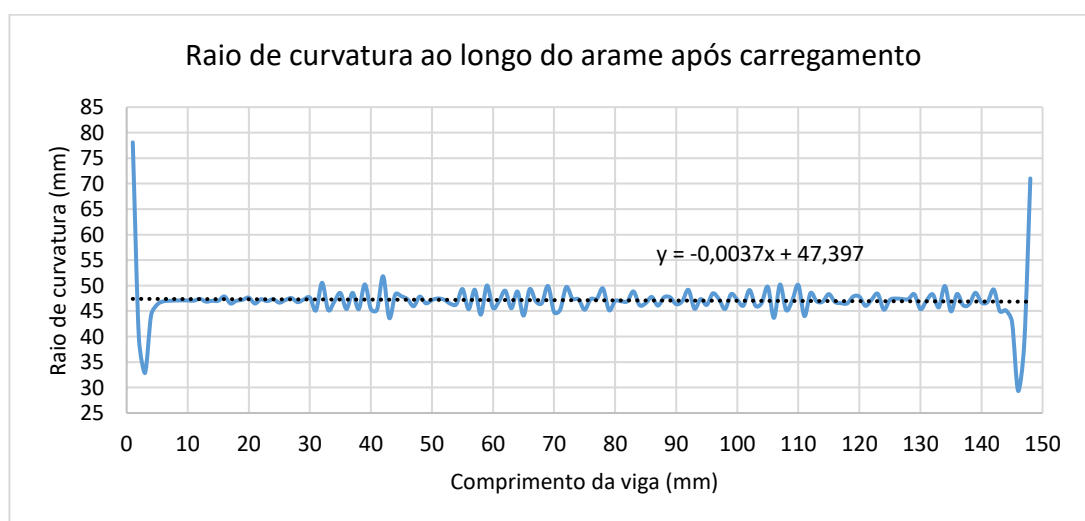


Figura 4.24 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após carregamento no modelo elástico-perfeitamente plástico numérico de viga sob flexão pura

Ao serem adotados valores maiores que zero para módulo tangente do material do arame, obteve-se uma redução considerável no erro entre o resultado do raio de curvatura do modelo numérico e o analítico, apresentados na Figura 4.25. Para um módulo tangente maior ou igual a 3000MPa, foi possível reduzir o erro para valores menores que 5%, sendo o menor erro obtido de 1,54% para módulo tangente com valor de 4200MPa.

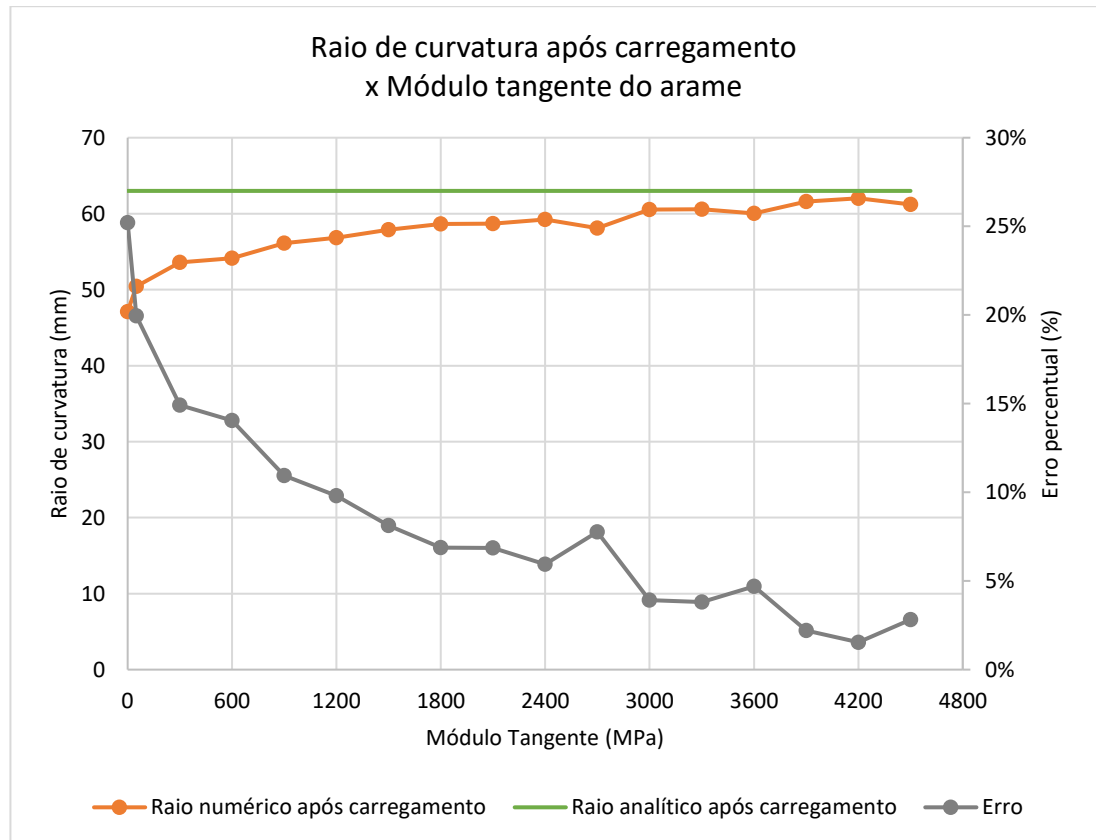


Figura 4.25 - Variação do raio de curvatura numérico após carregamento x módulo tangente no modelo elástico-perfeitamente plástico

Além disso, a Figura 4.26 apresenta o número de subpassos e no número acumulado de iterações necessário para a convergência do 1º passo (carregamento). Naturalmente quanto mais próximo de zero for o valor do módulo tangente, maior é o número de subpassos e o número acumulado de iterações necessários para a convergência do modelo.

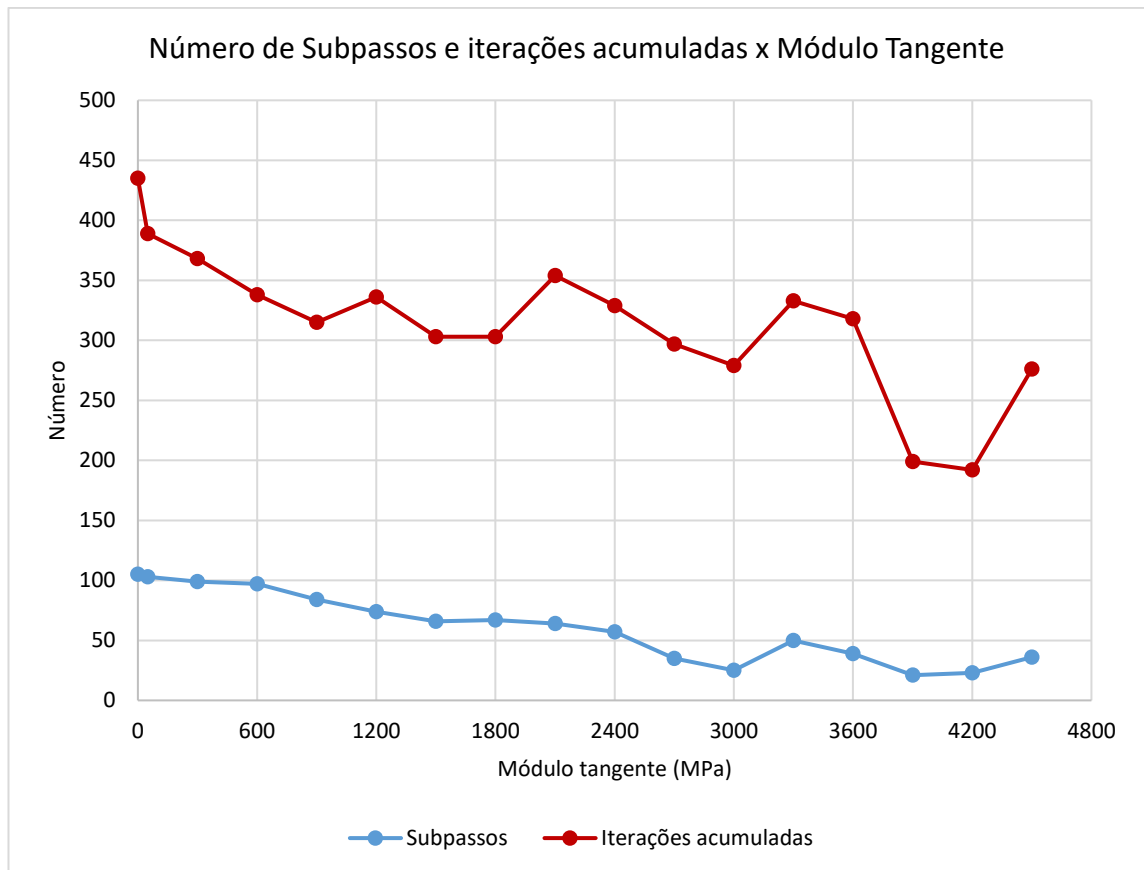


Figura 4.26 - Variação do raio de curvatura numérico após carregamento x módulo tangente no modelo elástico-perfeitamente plástico

Para o descarregamento (2º passo), o valor médio obtido através da equação aproximada de 1º grau apresentada na Figura 4.28 teve como resultado um raio de curvatura de 56,77 mm que comparado com o valor analítico (79,6 mm, obtido em 3.22 de retorno elástico) o erro é de 28,68%, um valor considerável e próximo ao obtido no carregamento (1º passo). A diferença na posição do arame do modelo analítico e numérico pode ser vista na Figura 4.27.

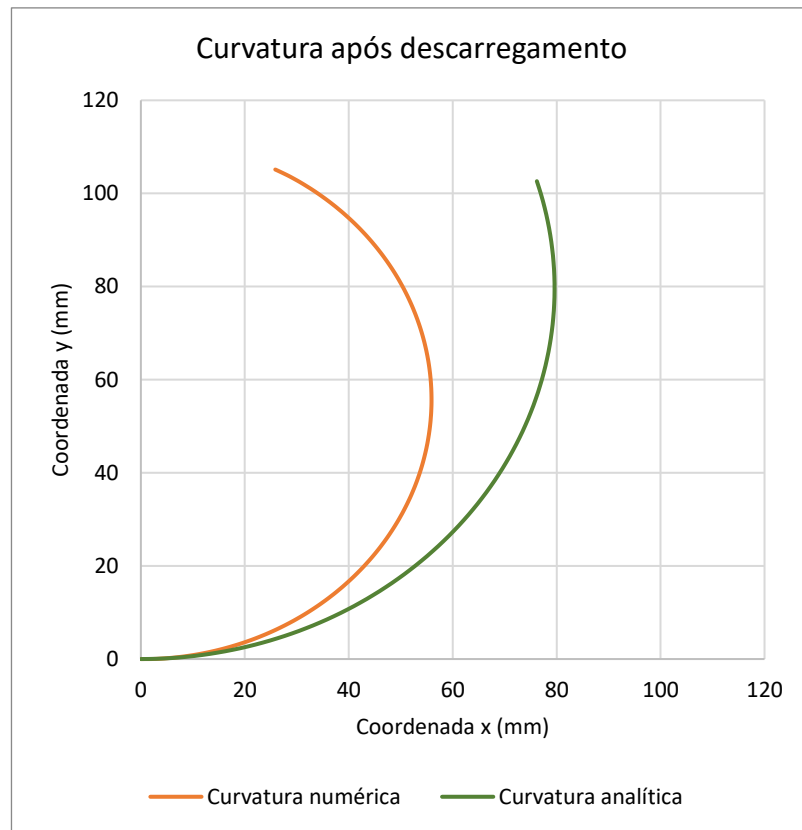


Figura 4.27 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elástico-perfeitamente plástico de viga sob flexão pura.

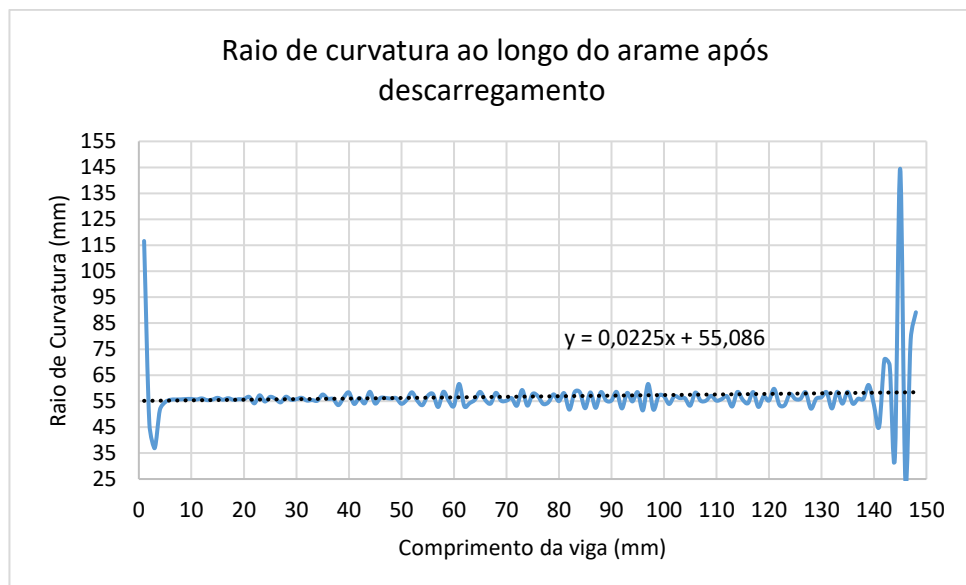


Figura 4.28 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após retorno elástico no modelo elástico-perfeitamente plástico numérico de viga sob flexão pura

Tanto para o carregamento e descarregamento, observa-se que os resultados de raio de curvatura dos nós da linha neutra do arame localizados próximos às condições de contorno de “*Fixed Support*” e “*Moment*” oscilam com maior amplitude.

Comportamento elastoplástico bilinear

Foram necessários 37 subpassos para a convergência do modelo elastoplástico bilinear, sendo distribuídas em 25 subpassos necessários para a convergência do 1º passo (carregamento) e 12 subpassos necessários para a convergência do 2º passo (descarregamento). O histórico de carregamento do modelo pode ser visto na Figura 4.29. O momento alcançado pelo modelo numérico ao terminar o 1º passo foi de 150330 N.mm (25º subpasso da Figura 4.29), seu erro é de 0,45%.

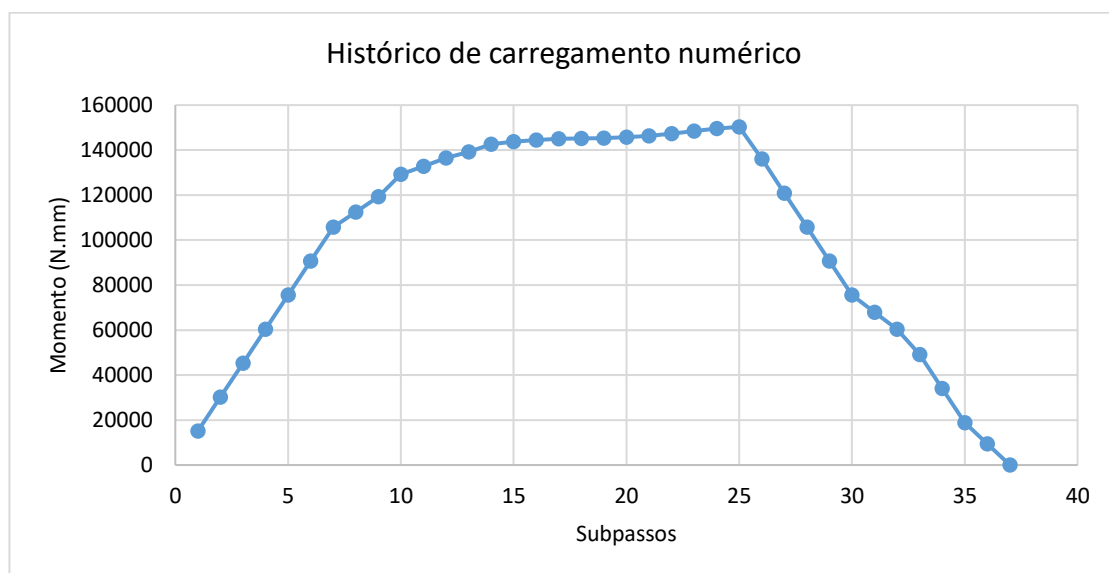


Figura 4.29 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elastoplástico bilinear sob flexão pura

Nos resultados de carregamento (1º passo), foi obtido um raio de curvatura de 60,5285mm (erro de 3,9%). A posição do arame e raio de curvatura dos nós da linha neutra após carregamento podem ser vistos, respectivamente, nas Figuras 4.30 e 4.31.

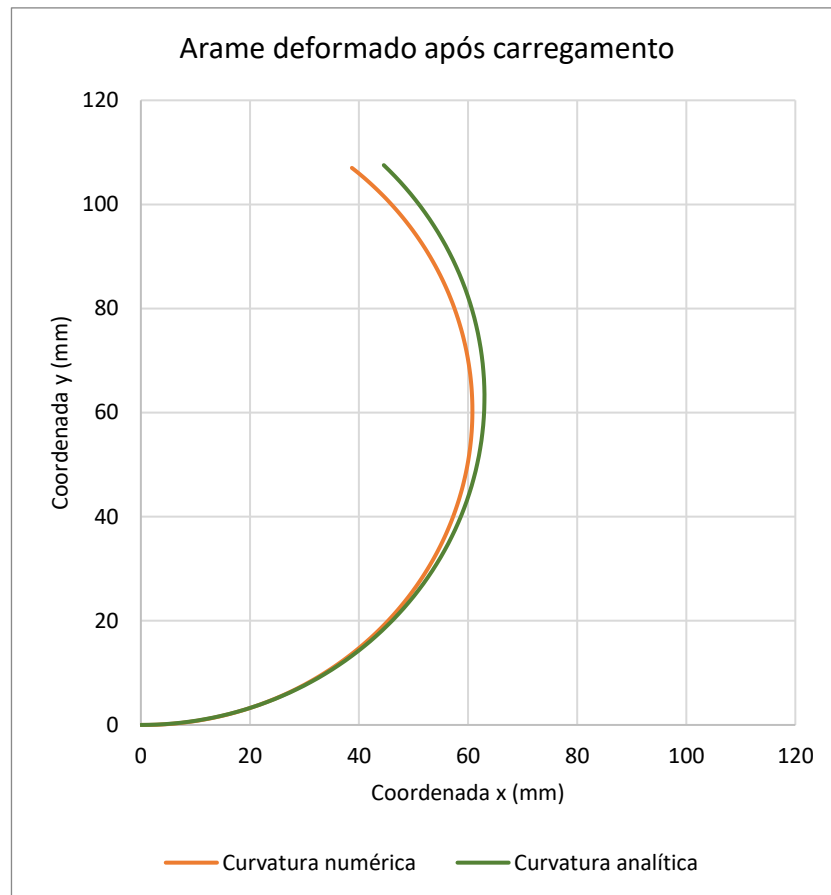


Figura 4.30 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após carregamento do modelo elastoplástico bilinear de viga sob flexão pura.

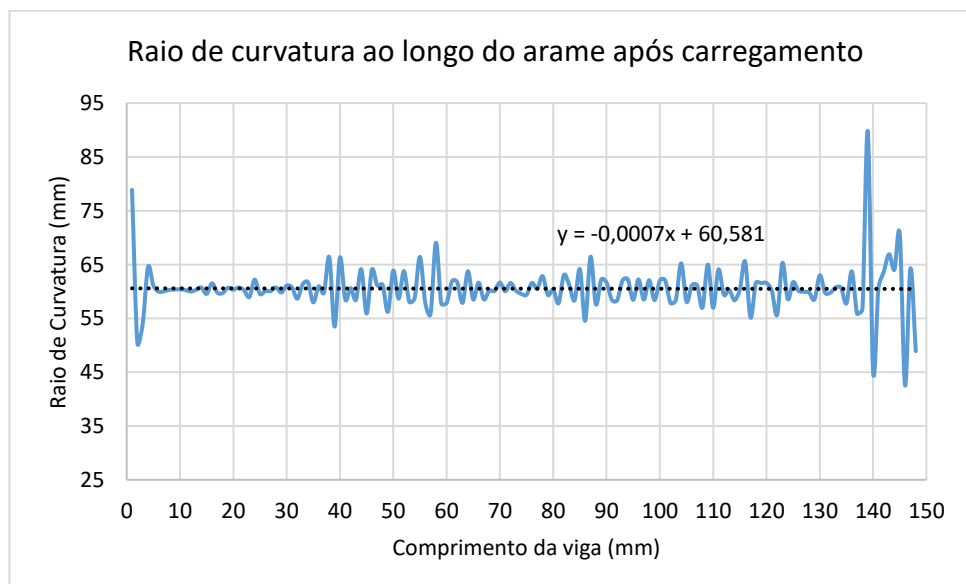


Figura 4.31 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após carregamento no modelo elastoplástico bilinear numérico de viga sob flexão pura

Já no descarregamento (2º passo), o raio de curvatura obtido foi de 77,4605 mm, equivalente a um erro de 4,13%. A posição do arame e raio de curvatura dos nós da linha neutra após retorno elástico podem ser vistos, respectivamente, nas Figuras 4.32 e 4.33.

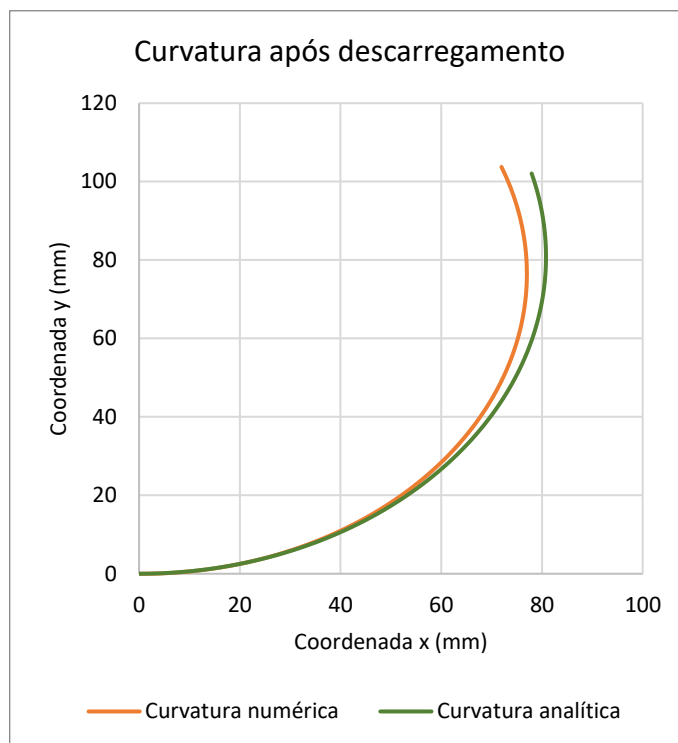


Figura 4.32 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elastoplástico bilinear de viga sob flexão pura.

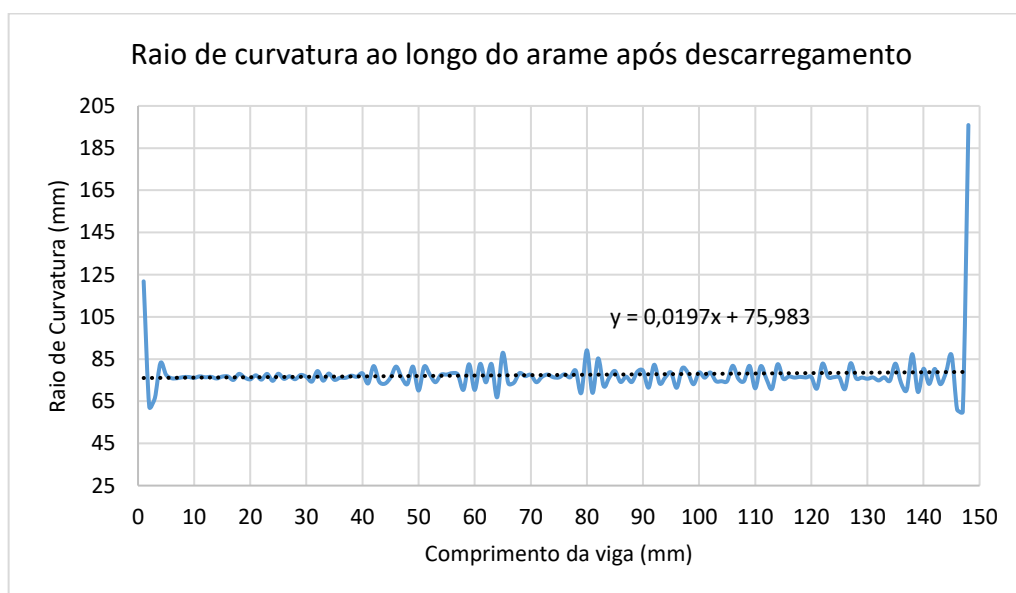


Figura 4.33 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após retorno elástico no modelo elastoplástico bilinear numérico de viga sob flexão pura

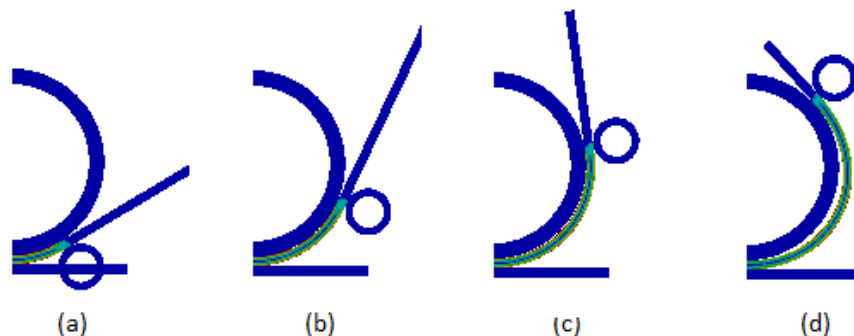
Modelo Numérico de Viga sob Conformação em Gabarito

5. A fim de melhor representar o processo de dobramento dos arames da armadura de tração e avaliar o raio de curvatura ao longo do arame de armadura de tração, um novo modelo numérico é proposto neste Capítulo 5.

Este modelo consiste na simulação de uma viga sob efeito não-lineares geométricos, de contato e de grandes ângulos de rotação da seção reta. A viga engastada é conformada, através do deslocamento de um cilindro, em torno de gabarito de raio fixo.

Os mesmos materiais com comportamento linear (material elástico) e não linear (elástico-perfeitamente plástico e elastoplástico bilinear) do Capítulo 4 são representados neste modelo.

A figura 5.1 ilustra de maneira geral um passo a passo do modelo de conformação do arame no gabarito desenvolvido no *software* comercial ANSYS® versão 18.1.



5.1. Figura 5.1 - Visão geral do modelo numérico de viga sob conformação em gabarito: (a) cilindro deslocado em 30°, (b) cilindro em 60°, (c) cilindro em 90° e (d) cilindro em 135°.

Geometria do Modelo

O modelo é formado pelos componentes colar de dobramento, arame de tração, base e cilindro, ilustrados na Figura 5.2. Suas dimensões estão apresentadas na Figura 5.3.

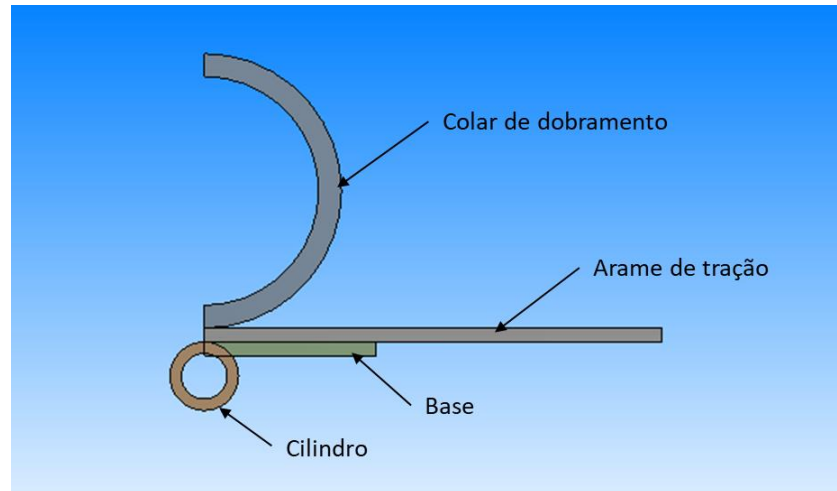
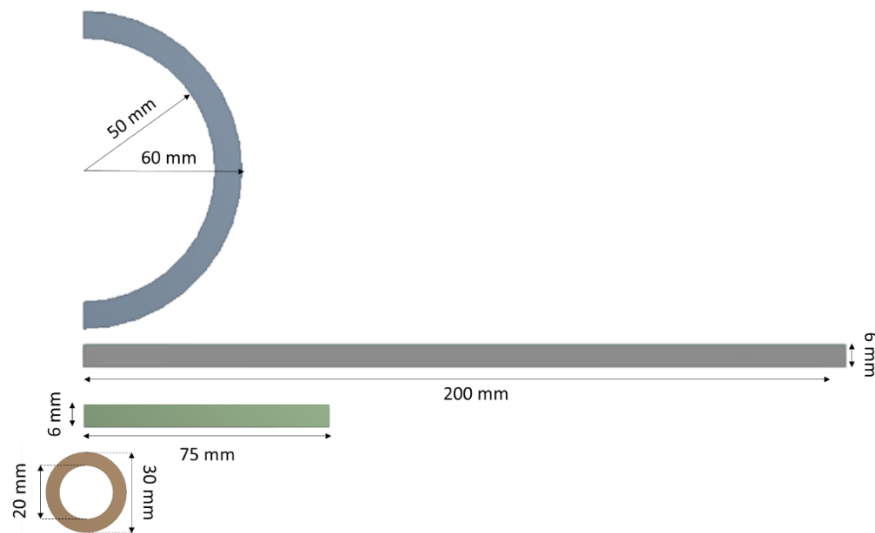


Figura 5.2 - Componentes do modelo de viga sob conformação em gabarito



5.2. Figura 5.3 - Dimensões geométricas do colar de dobramento, arame de tração, base e cilindro

Premissas

As camadas do duto flexível abaixo dos arames da armadura de tração foram simplificadas para uma base fixa com uma relação de contato com a face externa do arame de tração, representado pelo componente nomeado base.

O colar de dobramento é representado por um gabarito de raio fixo igual a 60 mm e o cilindro rotacionará em torno do centro do colar de dobramento para que o arame se conforme em torno do gabarito durante o processo de dobramento.

As premissas de planificação do formato helicoidal dos arames da armadura de tração e do colar de dobramento, inexistência de tensão residual após processo de

fabricação e não rotação da seção reta no arame apresentadas no Capítulo 4 também são adotadas neste modelo do Capítulo 5.

Características da malha de elementos finitos

O elemento estrutural utilizado para todos os componentes é o PLANE182, o mesmo que foi utilizado no Capítulo 4. Um importante aspecto deste modelo são os 5.3. elementos de contato utilizados para definir a interface entre as superfícies dos componentes do modelo.

Todos os contatos são modelados pelos pares de elemento de contato 2-D TARGET172 e CONTA169 e definidos como contato com coeficiente de atrito zero permitindo deslizamento (contato tipo *frictionless*).

Os três pares de contato utilizados neste modelo são:

- Arame x colar de dobramento: Contato responsável pelo assentamento do arame no colar de dobramento. A Figura 5.4 ilustra a superfície interna do arame de tração, representado em vermelho, que faz um par de contato com a superfície externa do colar de dobramento, representada em azul.
- Arame x base: Contato que garante que o arame não ultrapasse a base. A Figura 5.5 representa a superfície externa do arame, destacado em vermelho e seu par de contato é a superfície superior da base, destacada em azul.
- Arame x cilindro: Sua função é garantir a conformação do arame através do deslocamento do cilindro. O arame pode ser visto na Figura 5.6 junto com as superfícies de contato entre o arame de tração e o cilindro, ilustrado pela linha vermelha e a linha azul, respectivamente.



Figura 5.4 - Contato entre o arame de tração e o colar de dobramento



Figura 5.5 - Contato entre o arame de tração e a base



Figura 5.6 - Contato entre o arame de tração e o cilindro

O número total de nós e elementos deste modelo pode ser visto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Número de elementos e nós do modelo de viga sob conformação em gabarito

Número de Nós	2370
Número de Elementos	1970

5.4. Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no modelo

As propriedades mecânicas utilizadas neste modelo são as mesmas apresentadas no Capítulo 4 e aplicadas a todos os componentes do modelo. Os parâmetros definidos dos materiais elásticos, elástico-perfeitamente plástico e elastoplástico bilinear estão na Tabela 4.4.

5.5.

Metodologia

Este modelo está dividido em 2 passos ilustrados na Figura 5.7: o 1º passo representa a rotação de 135º do cilindro em torno do centro do colar de dobramento no sentido anti-horário conformando o arame no colar de dobramento; e o 2º passo se trata do retorno do cilindro a posição inicial rotacionando 135º em torno do colar de dobramento no sentido horário permitindo o retorno elástico do arame.

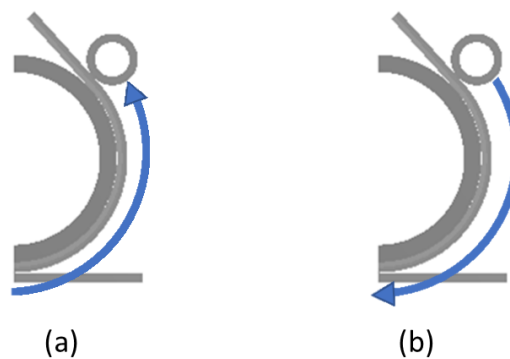


Figura 5.7 - Passos do modelo de viga sob conformação em gabarito: (a) primeiro passo, (b) segundo passo.

Alinhado com as premissas descritas na seção 4.2, as condições de contorno aplicadas ao modelo podem ser vistas na Figura 5.8 e descritas abaixo:

- Condição de contorno A - Todos os nós dos componentes base e colar de dobramento fixos, impedindo deslocamentos e deformações, configuração “*Fixed Support*” do ANSYS.
- Condição de contorno B - Os nós da extremidade da viga fixos, impossibilitados de se deslocarem, configuração “*Fixed Support*” do ANSYS.
- Condição de contorno C – Todos os nós do componente cilindro giram em 135° no sentido anti-horário em torno do centro do colar de dobramento no 1º passo e no 2º passo 135° no sentido horário, configuração “*Remote Displacement*” do ANSYS.

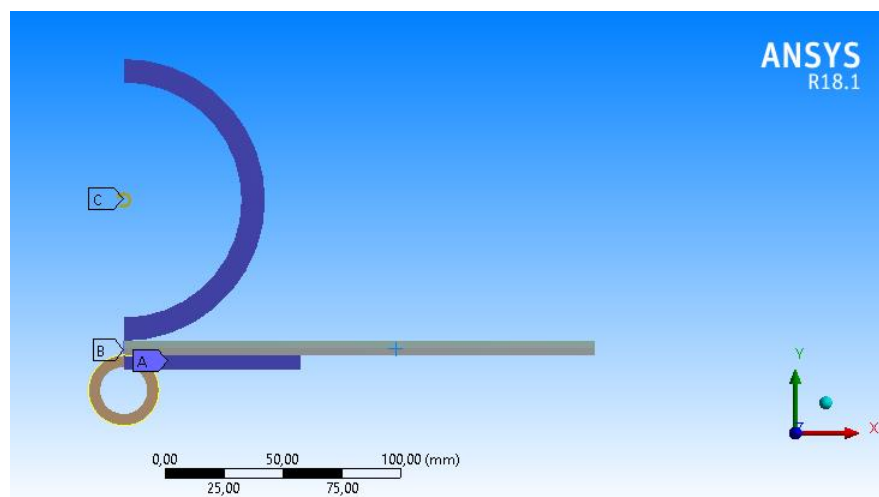


Figura 5.8 - Condições de contorno do modelo de viga sob conformação em gabarito

Tabela 5.2 - Parâmetros de convergência e não-linearidade dos modelos de viga sob conformação em gabarito

Parâmetros de convergência	I*		II*		III*	
	1º passo	2º passo	1º passo	2º passo	1º passo	2º passo
Número inicial de Subpassos	10	10	100	100	100	100
Número mínimo de Subpassos	10	10	10	10	100	10
Número máximo de Subpassos	1000	1000	10 ⁶	1000	10 ⁵	100
<i>Large Deflections</i>	<i>On</i>		<i>On</i>		<i>On</i>	

*I – Elástico; II – Elástico-Perfeitamente Plástico; III – Elastoplástico Bilinear

Os mesmos resultados do modelo de Capítulo 4 são utilizados para avaliar a curvatura após 1º passo e após 2º passo.

A metodologia de cálculo e critério para avaliar o raio de curvatura utilizada no Capítulo 4, neste capítulo contemplará apenas os nós entre a extremidade fixa do arame ($x=0$) até os nós que sofreram conformação ($x=148,4$ mm) pois os demais nós não foram conformados no gabarito. Assim, os resultados analíticos obtidos para esse modelo são os mesmos apresentados na tabela 4.6 e seus valores serão comparados com os resultados obtidos numericamente.

5.6.

5.6.1. Resultados

Comportamento Elástico

O modelo de viga elástica sob conformação em gabarito se utilizou de 104 subpassos para a convergência total do modelo (Figura 5.9), distribuídos em 48 subpassos para o 1º passo (conformação) e 56 subpassos para o 2º passo (retorno elástico).

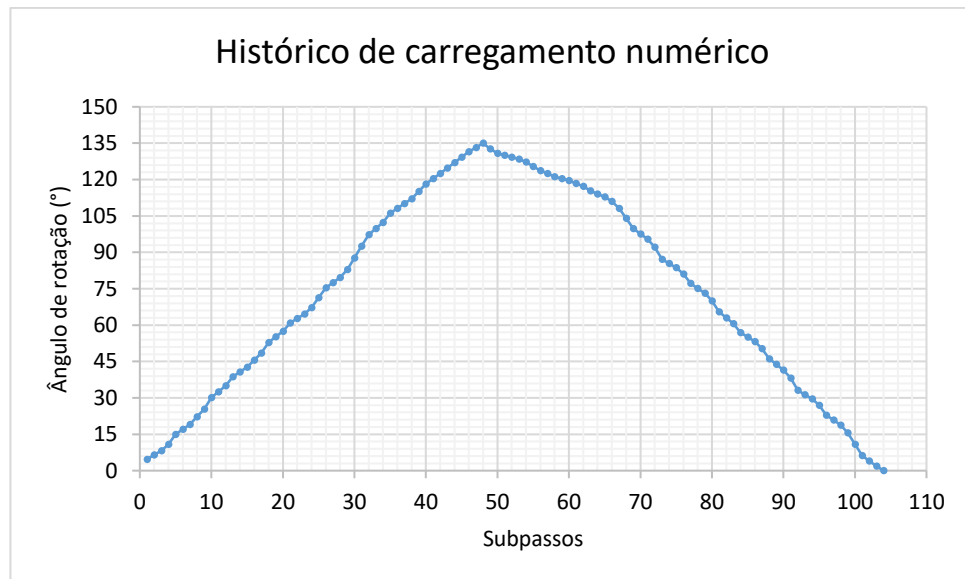


Figura 5.9 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elástica sob conformação em gabarito

Sobre os resultados após conformação o valor do raio de curvatura obtido através do valor médio da equação aproximada de 1º grau do raio de curvatura que leva em consideração apenas os nós da linha neutra do arame que sofreram conformação (Figura 5.11) foi de 66,03 mm e seu erro foi de 4,8%.

Sobre a curvatura obtida numericamente, pode-se observar um formato oval quando comparado com a curvatura analítica de raio constante, ambas apresentadas na Figura 5.10.

A Figura 5.11 suporta a constatação de uma curvatura do arame em formato ovalado, pois os resultados de raio de curvatura são menores nos nós localizados no meio do arame quando comparado com os nós mais distantes.

O tipo de contato escolhido para os contatos arame x cilindro e arame x colar de dobramento é a causa desse resultado pois são contatos sem atrito podendo assim permitindo que ocorra um deslizamento do arame durante a conformação.

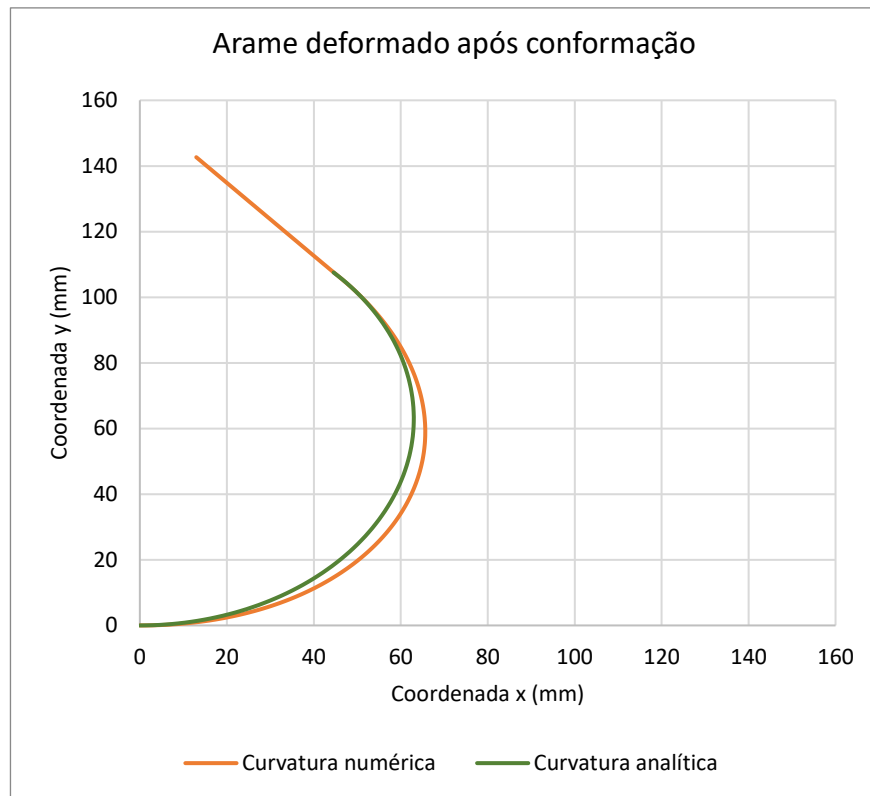


Figura 5.10 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após conformação do modelo elástico de viga sob conformação em gabarito

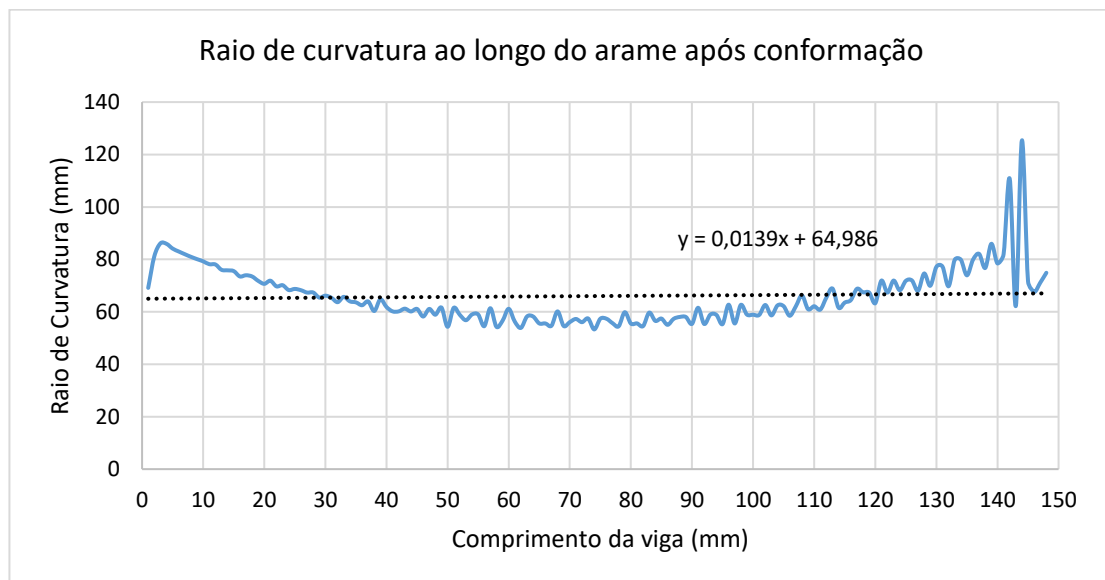


Figura 5.11 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após conformação no modelo elástico numérico de viga sob conformação em gabarito

A curvatura do arame após o retorno elástico possui uma deflexão máxima de 0,12993 mm na extremidade livre da viga e uma deflexão de 0,082 mm a 148,4 mm de distância da extremidade fixa (Figura 5.12).

Devido ao comportamento unicamente elástico do modelo, todos os nós do modelo analítico retornam para sua posição inicial após o retorno elástico. Os erros de deflexão ao longo da parte conformada do arame acabam sendo propagados até a extremidade livre do arame que não sofreu conformação.

Os resultados de raio de curvatura dos nós do modelo numérico oscilaram com amplitudes consideráveis (Figura 5.13) devido o resultado analítico possuir raio de curvatura infinito. O valor médio de raio de curvatura obtido para o retorno elástico considerando apenas os nós do arame que sofreram conformação foi de 308,618 m.

O fato de o número de subpassos do 2º passo ser maior que o do 1º passo pode ser consequência do formato oval do arame após conformação, fazendo com que o 2º passo realize uma segunda conformação no arame na região ovalizada, exigindo maiores esforços numéricos durante essa etapa.

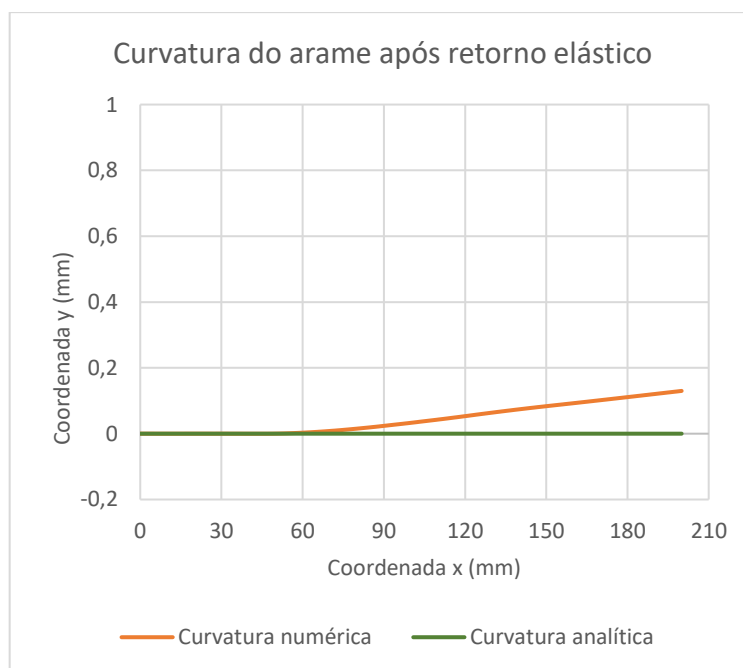


Figura 5.12 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elástico de viga sob conformação em gabarito

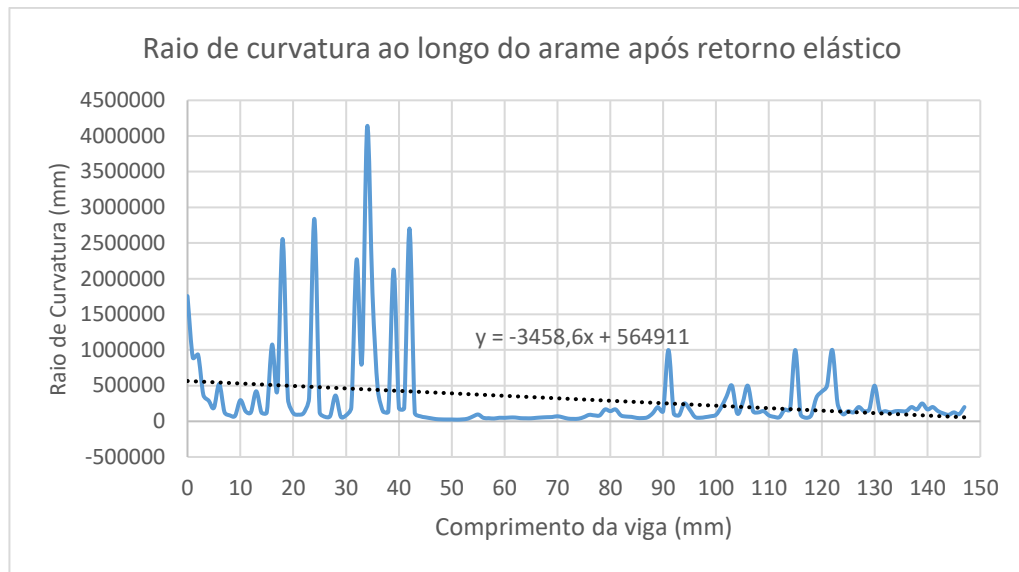


Figura 5.13 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após retorno elástico no modelo elástico numérico de viga sob conformação em gabarito

Comportamento elástico-perfeitamente plástico

5.6.2.

Devido à dificuldade de convergência do programa com modelos elásticos-perfeitamente plásticos, necessitando realizar subpassos cada vez menores para alcançar o carregamento necessário, um total de 832 subpassos foram executados para convergência do modelo, sendo 481 subpassos necessários para a convergência do 1º passo (conformação) e 351 subpassos para a convergência do 2º passo (retorno elástico), ilustrados na Figura 5.14.

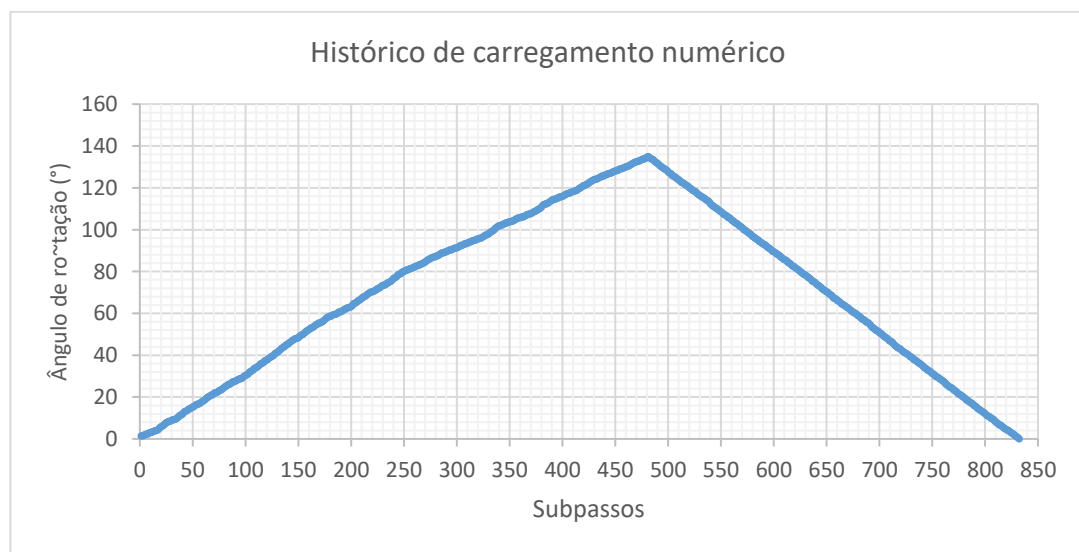


Figura 5.14 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elástico-perfeitamente plástico sob conformação em gabarito

Após a conformação (1º passo), os resultados de curvatura foram bem próximos e a similaridade entre as curvaturas pode ser vista na Figura 5.15.

O resultado de raio de curvatura médio ao longo do arame após conformação levando em consideração os nós que sofreram conformação (Figura 5.16) tiveram um erro de 0,34% (valor obtido de 63,21 mm), que pode ser considerado desprezível.

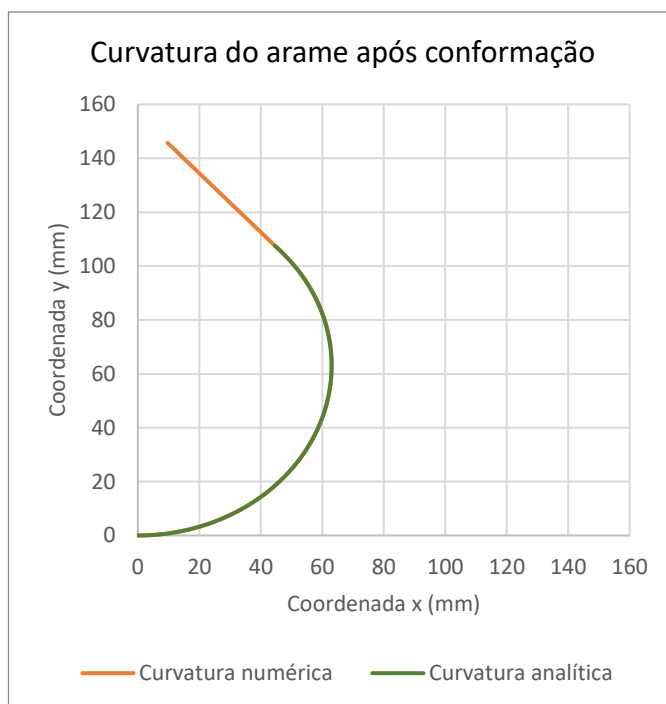


Figura 5.15 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após conformação do modelo elástico-perfeitamente plástico de viga sob conformação em gabarito

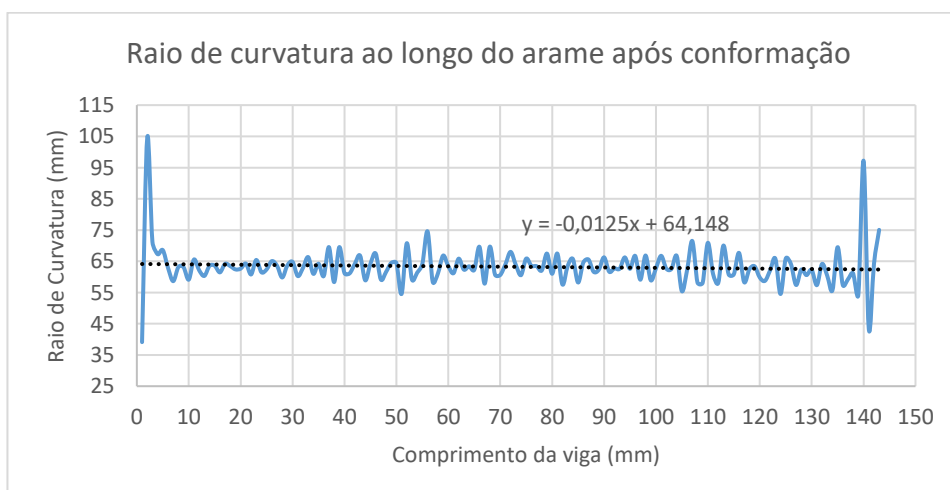


Figura 5.16 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após conformação no modelo elástico-perfeitamente plástico numérico de viga sob conformação em gabarito

Após o retorno elástico, o erro do raio de curvatura, de 6,4% (74,54 mm), obtido numericamente aumentou em relação ao resultado após a conformação.

Pode-se observar uma oscilação com maior amplitude do raio de curvatura dos nós próximos da condição de contorno na transição entre os nós que sofreram conformação e os nós que não sofreram conformação pelo cilindro.

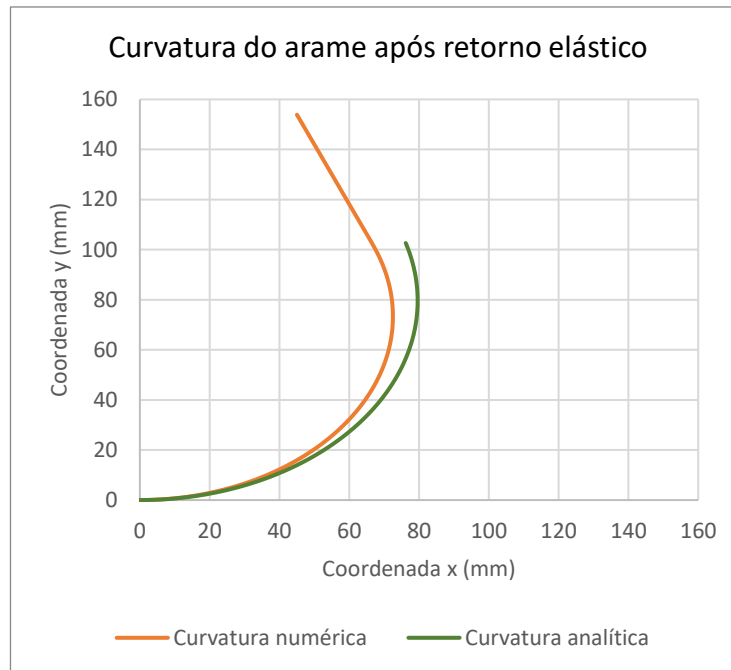


Figura 5.17 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elástico-perfeitamente plástico de viga sob conformação em gabarito

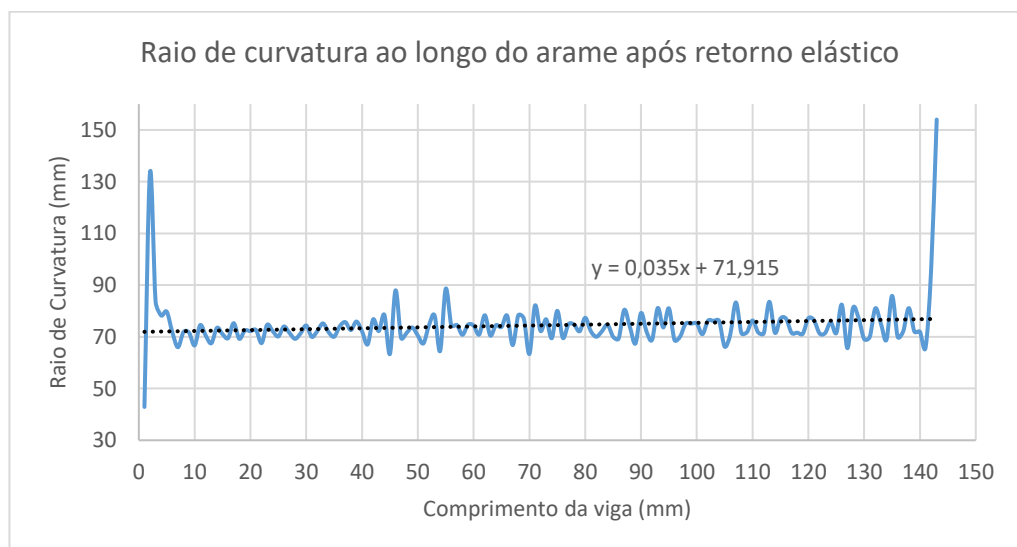


Figura 5.18 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após retorno elástico no modelo elástico-perfeitamente plástico numérico de viga sob conformação em gabarito

Comportamento elastoplástico bilinear

O número de subpassos necessários foi de 189, sendo 136 subpassos para a convergência do 1º passo (conformação) e 53 subpassos para a convergência do 2º passo (retorno elástico).

5.6.3.

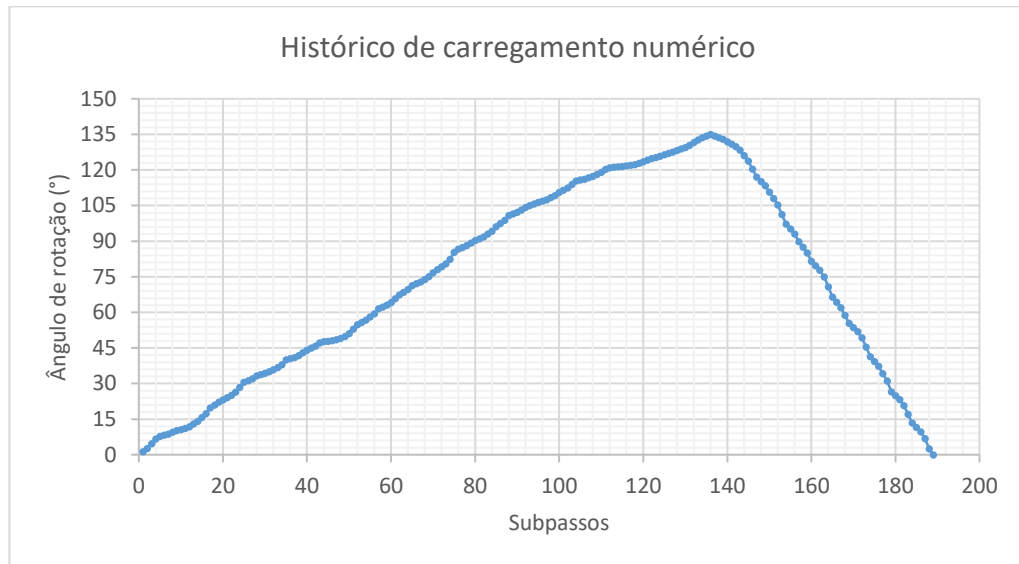


Figura 5.19 - Histórico de carregamento numérico do modelo de viga elastoplástico bilinear sob conformação em gabarito

A curvatura numérica média obtida após conformação foi de 64,54 mm (erro de 2,44%). A variação do raio de curvatura ao longo do arame pode ser vista na Figura 5.21 e sua curvatura analítica e numérica na Figura 5.20.

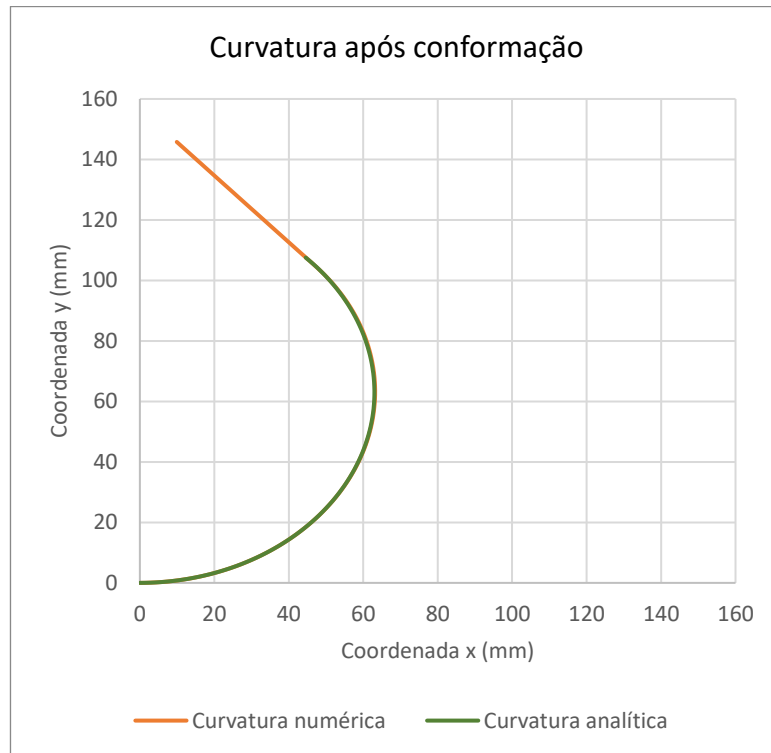


Figura 5.20 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após conformação do modelo elastoplástico bilinear de viga sob conformação em gabarito

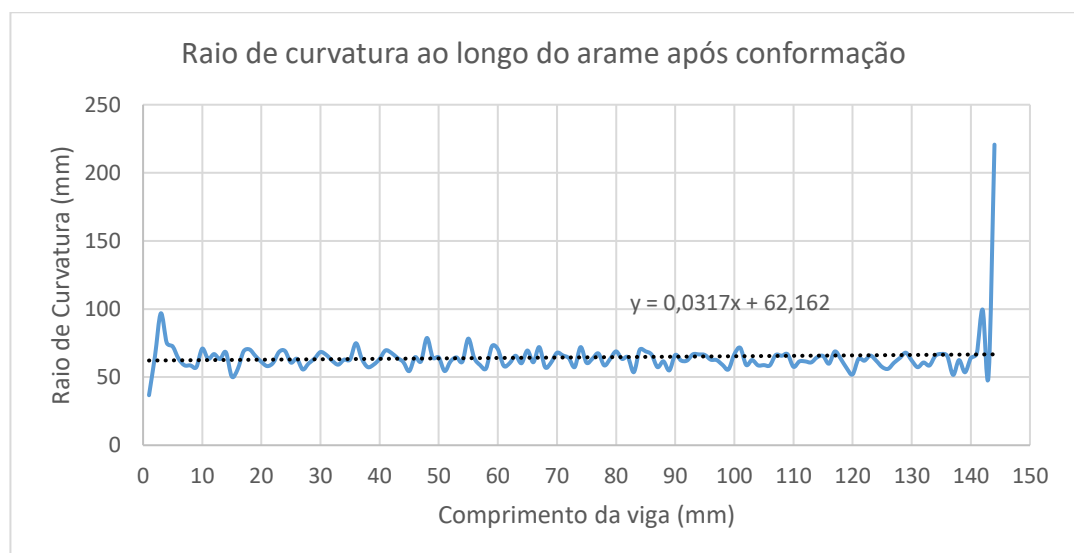


Figura 5.21 - Raio de curvatura ao longo dos nós da linha neutra após conformação no modelo elastoplástico bilinear numérico de viga sob conformação em gabarito

As curvaturas do arame obtidas numericamente e analiticamente após retorno elástico estão apresentadas na Figura 5.22. Observa-se uma diferença entre essas curvaturas. O valor médio do raio de curvatura de 76,62 mm representa um erro de 5,17%. A variação da curvatura ao longo dos nós da linha neutra podem ser vistas na Figura 5.23.

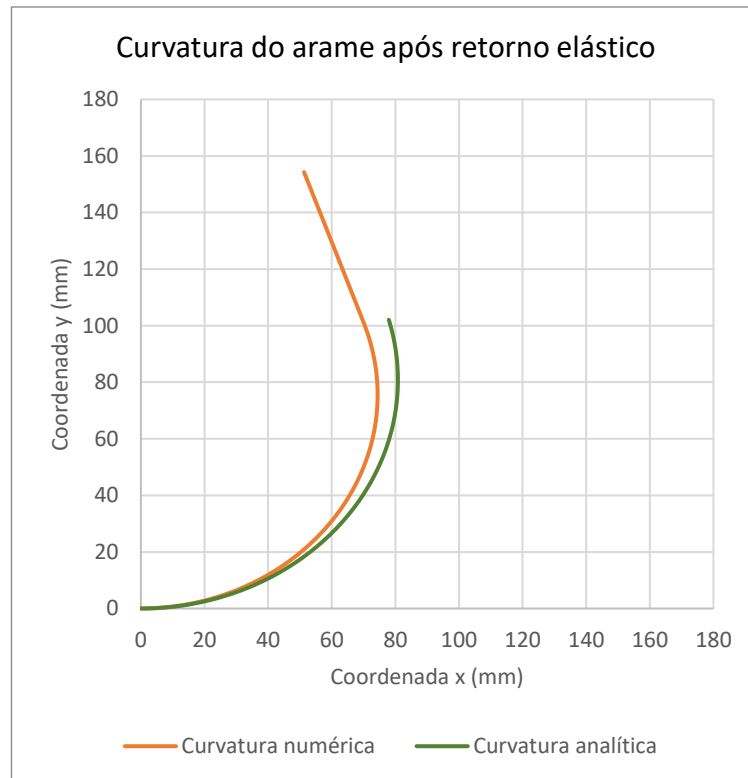


Figura 5.22 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elastoplástico bilinear de viga sob conformação em gabarito

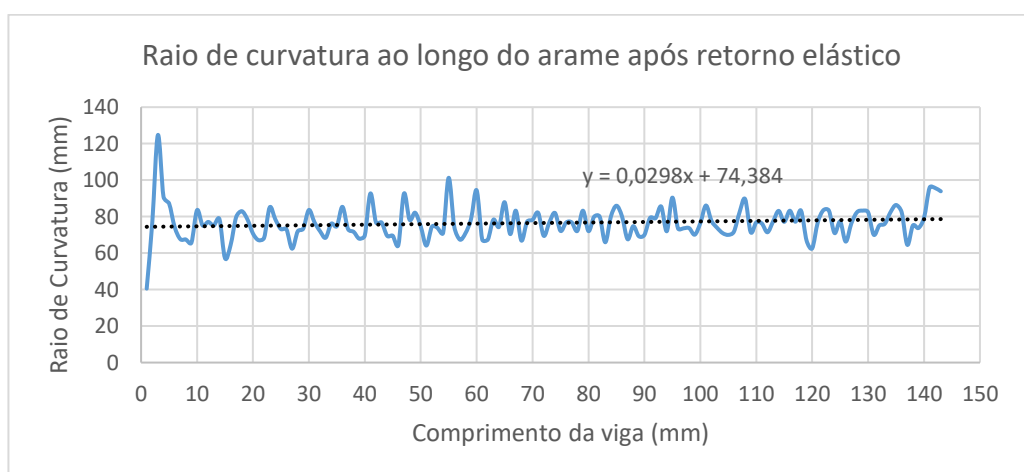


Figura 5.23 - Comparação da posição numérica e analítica do arame após retorno elástico do modelo elastoplástico bilinear de viga sob conformação em gabarito

Conclusões

6. Uma maior dificuldade de convergência foi observada para os modelos que possuem comportamento plástico (elástico-perfeitamente plástico e elastoplástico bilinear) devido à não-linearidade do seu comportamento, exigindo maiores esforços computacionais. O valor do módulo tangente escolhido impacta significativamente na quantidade de subpassos necessários para a convergência e nos resultados de curvatura, quanto mais próximo de zero for seu valor, mais esforço computacional é exigido e maiores são os erros obtidos.

O modelo de viga sob conformação em gabarito exige mais esforço computacional que o modelo de viga sob flexão pura devido à utilização de nós de contato, adicionando mais uma não-linearidade ao modelo. Para os modelos elástico, elástico-perfeitamente plástico e elastoplástico bilinear, foram necessários quatro vezes, sete vezes e cinco vezes mais subpassos, respectivamente.

Uma variação considerável no raio de curvatura ao longo do arame ocorre apenas no modelo elástico de viga sob conformação devido ao deslizamento que ocorre entre o arame e o cilindro. Nos demais modelos, este fenômeno não foi observado.

Os erros elevados de curvatura do modelo elástico-perfeitamente plástico sob flexão pura foram reduzidos em mais de 98% no 1º passo e em mais de 75% no 2º passo quando comparado com os erros do modelo de viga sob conformação em gabarito. Esta redução se deve ao fato da metodologia utilizada no modelo de viga sob conformação em gabarito utilizar nós de contato entre os componentes para garantir a conformação do arame sob o gabarito. Logo, pode-se concluir que para comportamentos com módulo tangente próximos de zero, o modelo de conformação sob gabarito gera resultados mais satisfatórios.

Para simulações elásticas, o modelo de flexão pura, além de exigir menos esforço computacional, gera resultados de curvatura mais constantes ao longo do arame. Para simulações que contemplem plasticidade é recomendado o modelo de viga sob conformação em gabarito pois o mesmo apresenta erros menores que 7% enquanto que o modelo de flexão pura apresenta erros de até 28,6%.

Para futuros trabalhos relacionados a esse assunto, os seguintes temas são sugeridos:

- Análise numérica das tensões durante e após a conformação em gabarito, variando-se o coeficiente de atrito utilizado nos contatos do modelo.
- Análise numérica da distribuição de tensões ao longo do arame quando posicionado no conector, após retorno elástico sob comportamento elastoplástico.
- Análise experimental das tensões e curvatura obtidas através do dobramento de arame da armadura de tração de forma controlada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CAMPELLO, G. C., 2014, Metodologia de Projeto para o Sistema de Ancoragem de Conectores de Dutos Flexíveis e Proposição de Nova Tecnologia. Tese* de D.Sc., COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

[2] MIYAZAKI, M. N. R., 2015, STRESS ANALYSIS OF A FLEXIBLE PIPE TENSILE ARMOR WIRE DURING AND AFTER THE END-FITTING MOUNTING. Dissertação* de M.Sc, COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

[3] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) - Balanço Energético Nacional 2017, disponível em https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf, consultado em 18/10/2017.

[4] GODINHO, G. A. Estrutura esbelta unidimensional sob grandes deslocamentos e condições de plastificação - solução analítica. 2016.

[5] BEER, Ferdinand P.; E. JOHNSTON, Russell Jr., DEWOLF, John T.; MAZUREK, David. F.. Mecânica dos Materiais. 7. ed. McGraw-Hill, 2015.

[6] MARINHO, M. G., CAMERINI, C. S., DOS SANTOS, J. M., PIRES, G. P., "Surface Monitoring Techniques for a Continuous Flexible Riser Integrity Assessment", Offshore Technology Conference, 18946, Houston, Texas, USA, 30 April-3 May 2007.

[7] Imagem modificada do link <https://www.4subsea.com/solutions/flexible-risers/>, consultado em 10/11/2017.

[8] CHANDWANI, R., LARSEN, I; "Design of flexible pipes", Workshop on Subsea Pipelines, COPPE/UFRJ-Federal University of Brazil, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.

[9] CAMPELLO, G. C., SOUSA, J, R, M., ELLWANGER, G. B., 2006, Numerical Model to Study the Tensile Armour Behavior of a Bent Flexible Pipe, XXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Belém, Brasil.

[10] BUENO, A. F. B., 2010, Avaliação das Armaduras de Tração de Riser Flexível Durante Ensaios Axiais de Tração e Fadiga. Tese de D.Sc., PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

[11] XAVIER, Flávio Galdino; “Avaliação da vida em fadiga de um novo modelo de terminal conector para dutos flexíveis”, dissertação de doutorado, - Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre – RS, 2009.

[12] LAMBERT, A., FELIX-HENRY, A., GILBERT, P., GAINVILLE, M., “Experimental and Numerical Study of a Multi-layer Flexible Pipe Depressurization”, 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 83127, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 1-6 July 2012.

[13] BOUN, E., AIGNAN M., S., BERTON, H., APPLECROSS, 2005, End-fitting for flexible pipe, US6923477B2, 16 May 2002, 2 August 2005, United States Patent, USA.

[14] TECHNIP, Coflexip® Product Division - Engineering Solutions for the Petrochemical and Refining Industry, 2013. Disponível em: http://www.technip.com/sites/default/files/technip/page/attachments/Refining_Draps_July%202013_Web.pdf. Acessado em: 18/02/2018.

[15] Notas de Aula do Prof. Ricardo Silveira (UFOP) de Análise Inelástica de Estruturas Metálicas, disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Ricardo_Silveira/publication/317589370_C_AASS_Part5/links/5941ab4baca272a873fc35a6/C-AASS-Part5 Acessado em: 18/02/2018.

[16] MARCO A. J., < 2.31 Project 6 Getting ready for nonlinearity >. Disponível em:

<http://web.mit.edu/2.31/www/fall01/Project6.pdf>. Acesso em: 10/02/2018.

[17] ANSYS, 2018, manual de referência (versão 18.1), ANSYS Inc.