



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JOÃO LUCAS AUSTREGÉSILO NEPOMUCENO**

**A INFLUÊNCIA DA CURVATURA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE DUTOS  
CURVOS A QUENTE**

Recife

2019

JOÃO LUCAS AUSTREGÉSILO NEPOMUCENO

**A INFLUÊNCIA DA CURVATURA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE DUTOS  
CURVOS A QUENTE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Siqueira Motta.

Recife  
2019

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

N442i Nepomuceno, João Lucas Austregésilo.  
A influência da curvatura na resistência mecânica de dutos curvos a quente /  
João Lucas Austregésilo Nepomuceno. - 2019.  
44 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Siqueira Motta.  
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.  
Inclui Referências e Anexo.

1. Engenharia Civil. 2. Dutos curvos. 3. Defeito de corrosão. 4.  
Método dos elementos finitos. 5. Fator de Lorenz. I. Motta, Renato de  
Siqueira. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-394



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA  
CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL**

**CANDIDATO:** João Lucas Austregésilo Nepomuceno

**BANCA EXAMINADORA:**

**Orientador:** Renato de Siqueira Motta

**Examinador 1:** Silvana Maria Bastos Afonso da Silva

**Examinador 2:** Adriano Dayvson Marques Ferreira

**Examinador 3:** Paulo Fernando Silva Sousa

**TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:**

A influência da curvatura na resistência mecânica de dutos curvos a quente

**LOCAL:** LITPEG – Universidade Federal de Pernambuco

**DATA:** 02/08/2019 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 11h.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA:9,5 (deixar ‘Exame Final’, quando for o caso).

**1) ( ) aprovado(s) (nota  $\geq 7,0$ ),** pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo,  **$3,0 \leq \text{nota} < 7,0$** , será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

**2) ( ) reprovado(s). (nota  $< 3,0$ )**

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo candidato.

Recife, 02 de agosto de 2019

Orientador: .....

Avaliador 1: .....

Avaliador 2: .....

Avaliador 3: .....

Candidato 1: .....

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu professor orientador, Renato Motta, por me aceitar como seu aluno, me guiar e contribuir na minha caminhada como engenheiro e pesquisador.

À professora Silvana Bastos por me aceitar no grupo de pesquisa PADMEC e me dar a oportunidade de mostrar que sou capaz.

Ao Paulo Sousa, que conheci como professor e hoje é meu amigo, por todas as instruções, lições e apoio dado dentro e fora de sala, sendo um dos responsáveis por fazer eu me apaixonar pela área de estruturas.

A todos os integrantes do grupo de pesquisa PADMEC por todas as orientações, trocas de conhecimentos e boas conversas.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, por seus ensinamentos e contribuições na minha formação de engenheiro civil. Um obrigado especial para os professores Antônio Nunes, Leidjane Oliveira e Mauricio Pina por terem me mostrado o quão bonita a docência pode ser.

Aos meus incríveis amigos do “cangaço”, que são como irmãos para mim, por todos os momentos de felicidade e descontração, pelas sessões de RPG, pelas risadas, pelas viagens pra Tamandaré e pela compreensão com relação aos meus momentos de estudos. Um obrigado especial a Caio Cavalcanti, Guilherme Sá, Reinaldo Lira e Victor Cavalcanti, por sempre estarem do meu lado quando mais precisei.

Aos meus amigos da graduação, em especial Felipe Filgueiras, Matheus Paraíso, Jesya Lima, Riadny Sousa, Maria Hortência e Igor Albuquerque, por todos os momentos de estudos, de desabafo, pelos momentos memoráveis nas nossas sessões de RPG e de BG, por estarem ao meu lado sempre que precisei. Obrigado por compartilharem todos esses momentos comigo.

Às duas garotas que me guiaram e ajudaram ao longo da minha graduação: Adriana Araújo e Luciana Bezerra. Suas contribuições na minha vida acadêmica são imensuráveis e, sem vocês, o caminho seria infinitamente mais árduo. Obrigado por me puxarem e me forçarem a estudar, especialmente quando eu estava desmotivado e desacreditado, por estudarem comigo até de madrugada ou no carro a caminho da prova.

A Amanda Gonçalves por estar ao meu lado desde o colégio, por me mostrar que sou capaz e que não devo desistir, por ter sido companheira nos momentos fáceis e difíceis, por todos os momentos juntos, por gostar de mim por quem eu sou e por aturar minhas chatices. Obrigado pelo tempo que estivemos juntos e pelo que aprendi contigo.

À minha família, por me apoiarem, me escutarem, me darem tudo que vocês puderam, por tudo que fizeram por mim. Agradeço especialmente por propiciarem um ambiente de carinho e amor e terem paciência comigo.

## RESUMO

No presente trabalho estudou-se a influência da curvatura do eixo de dutos curvos na resistência mecânica de dutos curvos com defeitos de corrosão simples. Enquanto que o estudo de dutos retos é um dos mais explorados e realizados, o estudo de dutos curvos ainda é escasso e há poucos materiais, especialmente nacionais, que tratem da temática. A sua aplicação é diversa, presente em conexões hidráulicas, como joelhos de 90°, e em trechos de topografia complicada, fazendo-se necessário o uso desse tipo de duto. A modelagem e análise foram realizadas através do Método dos Elementos Finitos (MEF), método indicado por ter reduzido conservadorismo e alto grau de precisão na obtenção de resistência residual de dutos corroídos. O software utilizado, PIPEFLAW, foi responsável pela modelagem automática de dutos retos, cujos comprimentos variam de 1500mm até 4500mm, os quais foram encurvados em 90° através da realocação dos nós dos elementos das malhas dos modelos gerados, procedimento este que fora realizado automaticamente por código produzido em Python. Fez-se necessário calcular um comprimento auxiliar do defeito para assegurar a conservação de seu volume, evitando assim resultados equivocados. Além dessa correção, fez-se necessário também corrigir a direção das condições de contorno, manualmente, que, inicialmente, estavam configuradas para o caso de um duto reto. Foram gerados cinco casos para dutos com defeitos intrados, cinco para dutos com defeitos extrados e um caso para um duto reto, para servir de referência. Todos os 11 modelos gerados e analisados mantiveram os mesmos parâmetros geométricos da seção transversal e do defeito, variando apenas o comprimento do duto e, conseqüentemente, a curvatura. Os resultados obtidos mostraram um decréscimo na resistência mecânica para dutos com defeitos intrados (perda máxima de 12%) e um acréscimo para dutos com defeitos extrados (ganho máximo de 9%). O método utilizado foi comparado com o método do Fator de Lorenz e obteve resultados similares, porém menos conservadores, ratificando assim a influência da curvatura na resistência mecânica de dutos curvos corroídos.

Palavras-chave: Dutos curvos. Defeito de corrosão. Método dos elementos finitos. Fator de Lorenz.

## ABSTRACT

In the present work, the influence of the curvature of curve pipes' axis on the mechanical strength of curve pipes with simple corrosion defects was studied. While the study of straight ducts is one of the most explored and performed, the study of curve pipes is still scarce and there are few materials, especially national, that address the subject. Its application is diverse, present in hydraulic connections, such as 90° elbows, and in stretches of complicated topography, requiring the use of this type of pipe. The modeling and analysis were performed using the Finite Element Method (MEF), a method indicated for having reduced conservatism and high degree of accuracy in obtaining residual strength of corroded pipes. The software used, PIPEFLAW, was responsible for the automatic modeling of straight pipes, which lengths range from 1500mm to 4500mm, which were bent by 90° by relocating the knots of the elements of the generated models, a procedure that was performed automatically by a code. produced in Python. It was necessary to calculate an auxiliary length of the defect to ensure the conservation of its volume, thus avoiding mistaken results. In addition to this correction, it was also necessary to correct the direction of the boundary conditions manually, which were initially set for a straight pipe. Five cases for pipes with intrados defects, five cases for pipes with extrados defects and one case for a straight pipe, as a reference, were generated. All 11 models generated and analyzed maintained the same geometric parameters of the cross section and defect, varying only the length of the pipe and, consequently, the curvature. The obtained results showed a decrease in residual strength for pipes with intrados defects (maximum loss of 12%) and an increase for pipes with extrados defects (maximum gain of 9%). The method used was compared with the Lorenz Factor method and obtained similar but less conservative results, thus confirming the influence of curvature on the mechanical strength of corroded curved pipes.

Keywords: Curve pipes. Corrosion defect. Finite element method. Lorenz factor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Parâmetros geométricos de um defeito simples de corrosão.....	16
Figura 2 -	Duto curvo com defeito intrados.....	19
Figura 3 -	Duto curvo com defeito extrados.....	20
Figura 4 -	Distribuição de tensões e variáveis do fator de Lorenz.....	21
Figura 5 -	Deformação devido à curvatura.....	24
Figura 6 -	Conservação do volume do defeito: Vista transversal de defeitos pré e pós-encurvamento.....	24
Figura 7 -	Janelas de inserção de dados do defeito e do duto.....	26
Figura 8 -	Sólido e malha de $\frac{1}{4}$ de um duto reto utilizando dados da figura 7.....	27
Figura 9 -	Aplicação das condições de contorno no duto da figura 8.....	27
Figura 10 -	Parâmetros geométricos da seção transversal.....	28
Figura 11 -	Parâmetros geométricos do duto encurvado.....	28
Figura 12 -	Duto antes e depois de ser encurvado.....	30
Figura 13 -	Código em Python para encurvar duto em $90^\circ$ .....	31
Figura 14 -	Condições de contorno necessárias antes e depois de encurvar.....	32
Figura 15 -	Substituição dos travamentos translacionais.....	33
Figura 16 -	Gráfico Pressão de Falha x Curvatura.....	36
Figura 17 -	Gráfico Pressão Relativa x Raio Relativo.....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Dados utilizados na modelagem.....	23
Tabela 2 -	Dados utilizados na obtenção de $LL_{aux}$ .....	25
Tabela 3 -	Curva tensão x deformação do material.....	34
Tabela 4 -	Curvatura x Pressão de Falha.....	35
Tabela 5 -	Variação da pressão entre os métodos de LF e AEF.....	37

## LISTA DE SÍMBOLOS

BBD	Espessura de cada elemento na região do defeito
d	Profundidade do defeito
FR	<i>Front fillet Radius</i>
LC	Largura do defeito
LF	Fator de Lorenz
LL	Comprimento do defeito
$LL_{aux}$	Comprimento auxiliar do defeito
$L_p$	Comprimento do duto
$R_b$	<i>Bend radius</i>
$R_c$	Raio de curvatura
$R_e$	Raio externo da seção transversal
$R_i$	Distância do ponto A até o centro da seção transversal
$R_m$	<i>Pipe radius</i>
t	Espessura da parede do duto
TNE	Número de elementos ao longo da espessura
TR	<i>Top fillet Radius</i>
$\alpha$	<i>circumferential angle measured from the crown of the elbow</i>
$\theta_c$	Posição angular do ponto na curva
$\theta_i$	Posição angular do ponto na seção transversal
$\sigma_{avg}$	Tensão média
$\sigma_{max}$	Tensão máxima
$\sigma_{min}$	Tensão mínima

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa e motivação.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos gerais e específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Método dos Elementos Finitos.....</b>	<b>15</b>
2.1.1	Modelagem de Elementos Finitos.....	16
<b>2.2</b>	<b>A corrosão e seus tipos principais.....</b>	<b>17</b>
2.2.1	Corrosão em dutos.....	17
<b>2.3</b>	<b>Curvas em Dutos com Defeito.....</b>	<b>18</b>
2.3.1	Posição do defeito em relação à curvatura do duto.....	19
<b>2.4</b>	<b>Fator de Lorenz.....</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Abordagem e Tipo de Pesquisa.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelagem e Análise.....</b>	<b>22</b>
3.2.1	Correção do comprimento do defeito.....	23
3.2.2	Modelagem de duto reto com defeito.....	25
3.2.3	Encurvamento do duto.....	28
3.2.4	Correção das condições de contorno.....	31
3.2.5	Análise não linear.....	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>
	<b>ANEXO A – ETAPAS DO PIPEFLAW_A.....</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos motivos que provocam perda de resistência mecânica e danos a oleodutos, destaca-se a ocorrência de defeitos de corrosão locais em suas paredes, que podem surgir em diferentes etapas, tais como fabricação, transporte, construção, operação, manutenção e outras. Os métodos empíricos, utilizados em normas internacionais, em alguns casos podem ter baixa precisão ao tentar obter a resistência residual de um oleoduto devido ao seu conservadorismo, presente ao utilizarem-se avaliações aproximadas das medidas reais dos defeitos (TIMASHEV; BUSHINSKAYA, 2016). Dessa forma, o Método dos Elementos Finitos (MEF) propõe uma resposta mais acurada e precisa do cálculo dessas resistências mecânicas, visto que a modelagem da malha de elementos gera um modelo mais preciso e a análise não linear utilizada é mais próxima da realidade.

A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir o integral sobre um domínio complexo (de volume  $V$ ) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (de volume  $V_i$ ). Esta técnica é ilustrada com o seguinte exemplo, que corresponde ao integral de volume de uma função  $f$ :  $\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV$  (AZEVEDO, 2003, p.4)

O uso de dutos curvos surge da necessidade de superar obstáculos topológicos, sendo uma solução comumente utilizada para implementar ajustes a trechos de oleodutos. Para acelerar o processo de instalação, os dutos são geralmente encurvados *in-loco* com a utilização de *pipe-bending machine*. Esse tipo de encurvamento (a frio) pode apresentar problemas como ondulações locais e ovalização excessiva da seção transversal, fatores que reduzem a resistência da seção, podendo gerar inconsistências no estudo do parâmetro geométrico do duto. Outra possibilidade é o encurvamento durante o processo de fabricação (a quente) dos dutos, onde não há tensões iniciais, presenças de ondulações e ovalização. À vista disso, serão levados em conta apenas dutos encurvados a quente, possibilitando assim uma análise mais íntegra do parâmetro geométrico em questão (RIAGUSOFF et al, 2010).

Nessa perspectiva, já existem estudos de dutos encurvados, tais como a determinação da carga limite em dutos curvos submetidos a carregamentos

independentes e combinados de pressão interna e momento fletor. Essa determinação já foi feita de forma analítica (CALLADINE, 1974; GOODALL, 1978), de forma experimental (KYRIAKIDES; JU, 1992) e através de métodos numéricos (SHALABY; YOUNAN, 1998; ROBERTSON et al., 2005; YUN-JAE et al., 2007; YUN-JAE; CHANG-SIK, 2007; MICHAEL et al., 2011). Há também estudos de cotovelos de 90° com defeitos internos e externos variando a posição do defeito ao longo da circunferência da seção transversal, cuja pressão de falha foi calculada utilizando o Fator de Lorenz aplicado a métodos empíricos, sob o qual falaremos adiante (LEE, 2015).

A importância da análise de confiabilidade de dutos com defeitos de corrosão está no tempo de operação destes antes de serem substituídos. O uso do MEF propõe resultados mais precisos e adequados podendo assim estender o uso de um duto, evitando uma troca desnecessária, reduzindo custos indevidos. Para tal estudo, o grupo de pesquisa PADMEC, com o apoio da Petrobras, desenvolveu um *software* de modelagem e análise automáticas nomeado PIPEFLAW.

Nesta pesquisa, serão analisados de forma numérica dutos com defeitos de corrosão em curvas. Assim, pretende-se responder o seguinte problema de pesquisa: Qual a influência da curvatura do eixo de dutos corroídos encurvados a quente na resistência à pressão interna destes dutos?

## **1.1 Justificativa e motivação**

No cenário atual, observa-se que a presença de dutos é um elemento comumente utilizado em diversos tipos de indústrias. Dadas as exigências rigorosas de segurança e eficiência dos mesmos, o monitoramento de quaisquer tipos de falhas ou defeitos de natureza química, de temperatura ou de pressão, torna-se essencial na análise da integridade dos dutos, tanto do ponto de vista operacional, quanto financeiro. Além disso, é preciso considerar que a integridade destes dutos tem ainda um impacto ambiental e, conseqüentemente, social que precisa ser considerado. Conforme aponta Wyszomirska (2014, p.01) o vazamento de dutos pode “provocar problemas de saúde e danos ao meio ambiente, estas falhas geram grandes prejuízos financeiros à indústria”.

Desta forma, a análise de confiabilidade de dutos com defeitos de corrosão se mostra deveras importante, visto que o uso de uma análise mais adequada e precisa

pode estender o uso, de forma segura, de um duto corroído e, conseqüentemente, reduzir gastos desnecessários.

Assim, justifica-se a realização deste estudo cuja proposta consiste em contribuir para as melhorias a serem adotadas nos processos de análise de distribuição de tensões, pressões de falha e confiabilidade em dutos.

Registre-se, ainda, que o autor desta pesquisa se motivou a desenvolvê-la a partir de sua participação como aluno voluntário de Iniciação Científica no Grupo de Pesquisa “Padmec: Processamento de Alto Desempenho na Mecânica Computacional” sob a orientação do Professor Doutor Renato de Siqueira Motta.

## **1.2 Objetivos gerais e específicos**

O presente trabalho tem como objetivo geral:

- Estudar de que modo a influência da curvatura do eixo de dutos curvos a quente corroídos interfere na modelagem e na resistência à pressão interna destes dutos.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- Explicitar a complexidade do processo de modelagem de dutos curvos usando o PIPEFLAW.
- Realizar um estudo paramétrico avaliando o efeito da curvatura da linha/eixo de dutos corroídos na pressão interna de ruptura (pressão de falha).
- Analisar a influência da posição da corrosão, para que se possa estabelecer um critério geral para a correção da pressão de falha de dutos corroído devido à curvatura do seu eixo.
- Comparar a Análise por Elementos Finitos (AEF) com a aplicação do fator de Lorenz.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Visando superar a intratabilidade de muitos problemas contínuos, engenheiros e matemáticos propuseram diversos métodos de discretização, envolvendo aproximações que, ao crescer da quantidade de variáveis discretas, aproximam-se no limite da verdadeira solução contínua.

### 2.1 Método dos Elementos Finitos

Define-se o MEF como um procedimento geral de discretização e aproximação de problemas contínuos para a sua solução utilizando procedimentos numéricos, em geral com o uso de computadores, consistindo, essencialmente, em subdividir o sistema estudado em componentes individuais de comportamento conhecido (chamados elementos) e então reconstruir o sistema original a partir dos componentes para estudar seu comportamento na sua forma natural, (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2000).

O uso do MEF é um dos mais eficientes métodos para uma acurada análise da integridade estrutural dos dutos com defeitos. O seu uso é menos conservador que o de métodos semi-empíricos, já que estes implicam numa grave simplificação na geometria dos defeitos reais, levando a resultados imprecisos (CABRAL, 2007). Entretanto, a modelagem através do MEF exige experiência e conhecimento de softwares específicos e de engenharia altamente especializada. Além disso, o processamento de defeitos é repetitivo e pode demorar semanas, sendo assim um processo propenso a erros (MOTTA, 2010).

Em síntese, o uso do MEF propõe resultados mais adequados pois, ao contrário dos métodos empíricos, analisa modelos e calcula suas pressões de falha diretamente, enquanto que os métodos empíricos baseiam-se em resultados anteriores, estando sujeito a modificações sempre que um novo resultado surge. Dessa forma, o MEF se torna uma opção quando há a necessidade de resultados mais precisos.

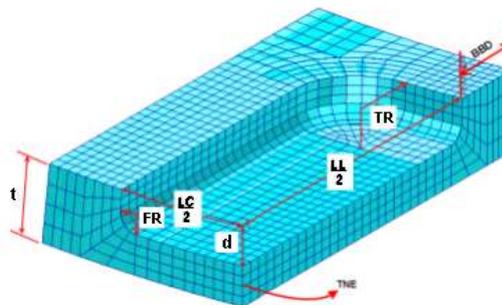
O PIPEFLAW, *software* desenvolvido pelo grupo de pesquisa PADMEC com apoio da Petrobras, surge como uma ferramenta de modelagem e análise automática de modelos de dutos, com defeitos de corrosão, pelo MEF (CABRAL, 2007). O seu uso permite o estudo do comportamento de dutos corroídos visto que se torna possível a modelagem e análise de uma amostra grande e repetitiva.

### 2.1.1 Modelagem de Elementos Finitos

O processo de modelagem de elementos finitos ocorre através do uso de softwares específicos, que exigem do usuário experiência e conhecimentos especializados, elevando assim a complexidade deste método. O uso do PIPEFLAW\_M<sup>1</sup> facilita o procedimento ao automatizar a modelagem para dutos retos com defeitos, reduzindo a ocorrência de erros humanos dado a repetitividade do processo de modelagem manual. Os modelos gerados nesse *software* são analisados no PIPEFLAW\_A<sup>2</sup> para assim obter a pressão de falha do duto.

O modelo gerado pelo PIPEFLAW\_M pode ser completo, metade ou apenas um quarto do duto corroído devido às condições de simetria. O defeito gerado nesse modelo é uma versão simplificada e conservadora da geometria corroída real, onde aproxima-se a sua geometria a um formato retangular. Para gerar o defeito no modelo, são necessários alguns parâmetros geométricos. A figura 1 indica número de elementos ao longo da espessura (TNE), espessura de cada elemento da região do defeito (BBD), *front fillet radius* (FR), *top fillet radius* (TR), largura do defeito (LC), comprimento do defeito (LL), espessura da parede do duto (t) e profundidade do defeito (d).

Figura 1 - Parâmetros geométricos de um defeito simples de corrosão



Fonte: Motta, 2019.

Apesar da praticidade oferecida pelo PIPEFLAW\_M, a modelagem disponível nesse *software* não abrange a ocorrência de dutos curvos, o que leva à necessidade de adaptar o processo de modelagem.

<sup>1</sup> PIPEFLAW\_M é um *software* de modelagem automática de dutos com defeitos, desenvolvido no grupo de pesquisa PADMEC com apoio da Petrobras.

<sup>2</sup> PIPEFLAW\_A é um *software* de análise de modelos de dutos gerados pelo PIPEFLAW\_M, desenvolvido no grupo de pesquisa PADMEC com apoio da Petrobras.

## 2.2 A corrosão e seus tipos principais

A corrosão é a deterioração causada por processos químicos ou eletroquímicos, ocorrendo majoritariamente na área de contato do metal com o meio corrosivo. Conforme Silva (2016, p.24), a corrosão surge no decorrer de reações químicas irreversíveis “acompanhada da dissolução de um elemento químico do material para o meio corrosivo ou da dissolução de uma espécie química do meio no material”.

Dentre os diferentes tipos de corrosão, destacam-se: corrosão uniforme, corrosão por placas, corrosão alveolar, corrosão puntiforme ou por pites, intergranular e intragranular, sendo classificadas essencialmente pela fisionomia e morfologia da região corroída (SILVA, 2016). Os defeitos podem ser classificados também por suas causas, sendo eles defeitos de corrosão, danos mecânicos e defeitos de soldagem (CABRAL, 2007).

### 2.2.1 Corrosão em dutos

Os dutos são infraestruturas fixas de superfície, subterrâneas ou submarinas, as quais unem locais de produção ou extração aos pontos de distribuição, refino ou embarque, como terminais de portos (SILVA, 2016). Segundo dados do Anuário Estatístico 2018 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2018), a malha dutoviária brasileira possui atualmente 19.768 km, contando com 618 dutos destinados à movimentação de petróleo, derivados, gás natural e outros produtos.

A construção dos dutos se dá sob normas internacionais de segurança, visando minimizar a ocorrência de defeitos e, conseqüentemente, de acidentes. Entretanto, apesar dos procedimentos adotados, corrosões são inevitáveis devido a processos erosivos, manutenção inadequada e falhas de produção. Isto posto, o estudo de avaliação de dutos com defeitos de corrosão se torna crucial. A detecção de defeitos pode ser realizada utilizando-se *pigs* instrumentados, robôs utilizados para identificar disfunções estruturais, dotados de sensores que detectam e informam o estado do duto, assim como as dimensões e a localização dos defeitos (SILVA, 2016).

Como citado anteriormente, a análise do impacto de defeitos causados por corrosão pode ser feita através de diversos métodos semi-empíricos, porém seus conservadorismos reduzem a precisão e eficácia da análise. Isto posto, recomenda-se o uso da análise computacional pelo MEF, quando necessário, pois, apesar de ser mais complexa e demorada, oferece resultados melhores.

Aplicação de revestimentos e uso de técnicas de proteção catódica são os métodos predominantes de proteção de dutos contra corrosão, funcionando de forma complementar. Devido às diferenças de potencial entre o duto e o solo, de um ponto para outro do próprio solo ou mesmo embaixo d'água, correntes elétricas subterrâneas percorrem a tubulação que, a depender da intensidade, pode gerar corrosões violentas, perfurando completamente o duto. Para isto devem ser aplicados revestimentos internos e/ou externos que podem ser de materiais como esmalte de alcatrão de hulha (coal-tar), asfaltos, fitas plásticas (PVC, poliéster, polietileno), entre outros. Simultaneamente, devem-se utilizar sistemas de proteção catódica que faz uso de uma corrente elétrica induzida visando tornar toda a estrutura de aço (duto) em uma área catódica ao invés de anódica (CABRAL, 2007).

### **2.3 Curvas em Dutos com Defeito**

Para as análises comparativas realizadas neste trabalho, serão estudados dutos retilíneos e curvos. Os parâmetros a serem analisados incluem dados geométricos do defeito presente no duto e condições de contorno aplicadas.

O duto retilíneo com defeito tem sido amplamente estudado na literatura. Sua modelagem computacional é mais simples e diversos estudos têm sido feitos nessa área (PEREIRA; SILVA, 2015). Além disso, pode ser modelado automaticamente via PIPEFLAW-M que acelera o processo de modelagem de dutos com defeitos, levando em conta que as condições de contorno permitem o uso de simetria e planos de travamento de deslocamento. Seu estudo é de extrema importância pois funciona como base para quaisquer estudos futuros de dutos curvos.

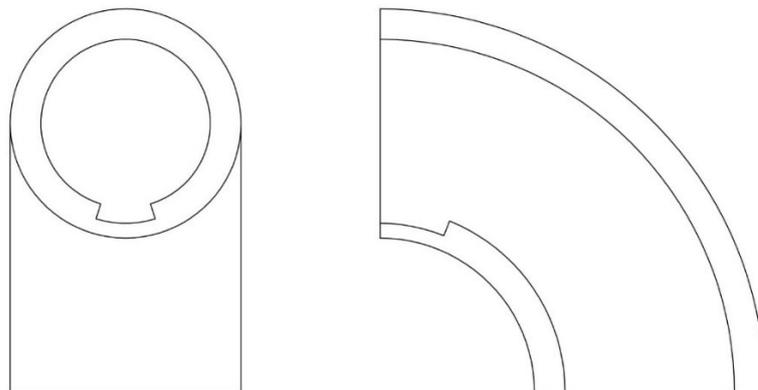
O estudo do duto curvo é mais escasso, ocorrendo sob perspectivas específicas como o estudo de escoamento de fluidos (OLIVEIRA; LOURES, 2016) e de carga de colapso em dutos sem defeito (WYSZOMIRSKA, 2014). Atualmente, o software de geração de modelos de dutos com defeitos PIPEFLAW-M não abrange dutos curvos. Para esse tipo de duto, os planos de restrição de deslocamentos (condições de contorno) variam em função do ângulo de curvatura do eixo do duto, precisando então formular as condições de contorno em função desse ângulo, deixando inalterados apenas os deslocamentos na direção radial e na secção transversal inicial, a partir da qual se inicia a aplicação da curvatura. Além da dificuldade das condições de contorno, há também a necessidade de gerar um código à parte do PIPEFLAW-M para encurvar o duto em si, através da mudança das coordenadas dos nós dos

elementos da malha, e de corrigir as dimensões do defeito que, após o encurvamento ser aplicado, tem suas dimensões distorcidas. Isto posto, observa-se que as pequenas, porém muitas etapas adicionais para se realizar a modelagem automática de um duto curvo, tornam o processo mais complexo e, conseqüentemente, propenso a erros.

### 2.3.1 Posição do defeito em relação à curvatura do duto

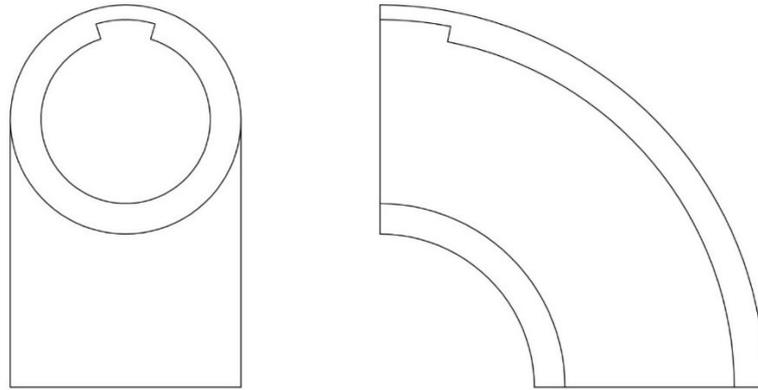
Para simplificar o estudo de dutos curvos com defeitos em diferentes posições, serão adotadas as nomenclaturas: defeitos intrados, para defeitos localizados na região interna da curvatura, e defeitos extrados, para defeitos localizados na região externa da curvatura. As figuras 2 e 3 abaixo evidenciam a diferença entre defeitos intrados e extrados.

Figura 2 - Duto curvo com defeito intrados



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 3 - Duto curvo com defeito extrados



Fonte: O Autor, 2019.

Essa nomenclatura já foi adotada previamente por Lee (2015) em seu estudo sobre pressão de falha em cotovelos com defeitos e seu uso facilita a descrição dos métodos e resultados obtidos.

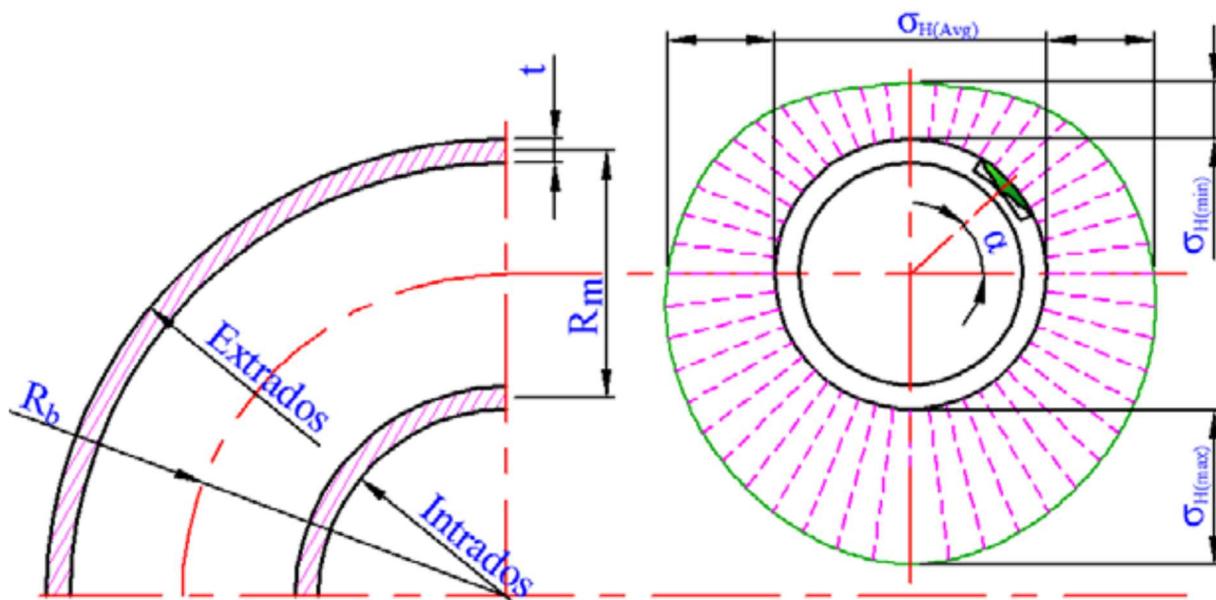
#### 2.4 Fator de Lorenz

A distribuição de tensão da pressão interna em um duto curvo de 90° varia na direção circunferencial, cuja formulação é definida na ASME B31.3. No estudo de Bubenik e Rosenfeld (1993), foram feitos testes de ruptura em cotovelos de 90°. É um trabalho de suma importância, já que os testes fornecem validação para os procedimentos de avaliação de dutos curvos. No NG-18, relatório nº 206, as equações para distribuições teóricas de tensão elástica são apresentadas como o Fator de Lorenz (ESCOE, 2006). A formulação desse fator é dada por:

$$LF = \left[ \frac{\frac{R_b + \sin\alpha}{R_m} + \frac{\sin\alpha}{2}}{\frac{R_b + \sin\alpha}{R_m}} \right] \quad (1)$$

onde LF é o fator de Lorenz,  $R_b$  é o *bend radius*,  $R_m$  é o *pipe radius* e  $\alpha$  é o *circumferential angle measured from the crown of the elbow* (+90° para extrados, -90° para intrados). A figura 4 abaixo mostra quem são essas variáveis, assim como a tensão máxima ( $\sigma_{max}$ ), presente na região intrados, a tensão média ( $\sigma_{avg}$ ), presente na região lateral do duto, e a tensão mínima ( $\sigma_{min}$ ), presente na região extrados:

Figura 4 - Distribuição de tensões e variáveis do fator de Lorenz



Fonte: Lee, 2015.

O Fator de Lorenz serve como indicador de acréscimo ou decréscimo, a depender da posição do defeito, das tensões nominais. Por exemplo, para dutos curvos, onde  $R_b/R_m = 3$ , a formulação do Fator de Lorenz tem valores:

$$LF = \left[ \frac{3-0,5}{3-1} \right] = 1,250 \text{ (Intrados)} \quad (2)$$

$$LF = \left[ \frac{3+0,5}{3+1} \right] = 0,875 \text{ (Extrados)} \quad (3)$$

A pressão máxima permitida é determinada pela aplicação do inverso do Fator de Lorenz à pressão de ruptura de um duto reto com defeito, que pode ser obtido utilizando as equações da ASME, DNV, PCORRC e do design baseado em código industrial *Shell* 92. Neste estudo, aplicou-se o Fator de Lorenz a pressões de falha obtidas pelo uso da AEF de dutos retos com defeito de corrosão simples, visando comparar com os resultados obtidos pelo uso da AEF de dutos curvos corroídos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando a dimensão de um trabalho de conclusão de curso de uma graduação e o tempo disponível para a realização desta pesquisa, segue a descrição dos materiais e métodos empregados neste trabalho.

#### 3.1 Abordagem e Tipo de Pesquisa

Desenvolveu-se uma pesquisa exploratória com a finalidade de apresentar informações introdutórias relevantes que permitam sua ampliação em estudos futuros.

Explorar é tipicamente fazer a primeira aproximação de um tema e visa criar maior familiaridade em relação a um fato, fenômeno ou processo. Quase sempre se busca essa familiaridade pela prospecção de materiais que possam informar ao pesquisador sobre a real importância do problema, o estágio em que se encontram as informações já disponíveis a respeito do assunto, e até mesmo revelar ao pesquisador novas fontes de informação. (SANTOS, 2004, p. 25)

#### 3.2 Modelagem e Análise

Os processos de modelagem e análise de dutos curvos podem ser feitos manualmente nos *softwares* MSC Patran e Ansys 18.1, respectivamente. Porém, devido à repetitividade do procedimento, à complexidade dos programas e ao tempo levado para modelar e analisar cada modelo, o seu uso direto se torna inadequado. Isto posto, o uso do PIPEFLAW\_M e do PIPEFLAW\_A é essencial para realizar a análise da pressão de falha dada a necessidade de modelar e analisar diversas malhas de elementos finitos diferentes.

Entretanto, apesar de ser prático, o uso do PIPEFLAW\_M é limitado a modelagem de dutos retos. Como a malha de elementos finitos desenvolvida no PIPEFLAW\_M não leva em consideração a ocorrência de dutos curvos, fez-se necessário o uso de artifícios que permitissem a modelagem e análise adequada. Dito isto, o processo de modelagem e análise de cada caso de duto curvo seguiu esta ordem:

- i. Cálculo da correção do comprimento do defeito devido ao encurvamento;
- ii. Modelagem de duto reto com defeito através do PIPEFLAW\_M, utilizando valor do comprimento auxiliar do defeito;

- iii. Encurvamento, utilizando coordenadas cilíndricas, dos nós dos elementos em  $90^\circ$ ;
- iv. Correção manual das condições de contorno em  $90^\circ$  (UZ $\rightarrow$ UY e UY $\rightarrow$ UZ);
- v. Processamento do modelo curvo através do PIPEFLAW\_A.

Os dados utilizados na modelagem foram mantidos constantes para todos os casos gerados, alterando apenas o comprimento do duto ( $L_p$ ) e o comprimento auxiliar do defeito ( $LL_{aux}$ ). A tabela 1 a seguir mostra os dados adotados:

Tabela 1 - Dados utilizados na modelagem

$D_e$ (mm)	t (mm)	d (mm)	FR (mm)	TR (mm)
355,6	6,35	3,81	2,286	6,858

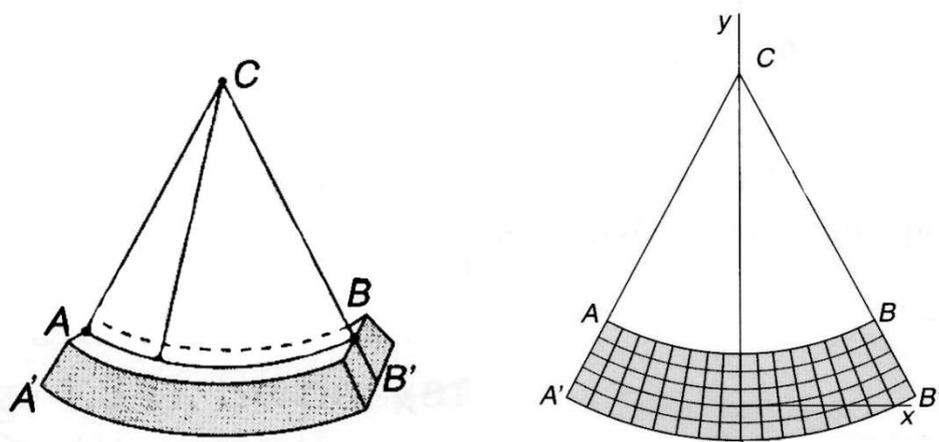
Fonte: O Autor, 2019.

onde  $D_e$  é o diâmetro externo da seção transversal.

### 3.2.1 Correção do comprimento do defeito

No processo de encurvamento, o comprimento do defeito é distorcido, pois o procedimento utilizado altera os valores das coordenadas dos nós de cada elemento transformando o defeito prismático retangular num defeito, aproximadamente, prismático trapezoidal cujo comprimento difere do original. Isto posto, a grandeza desse erro deve ser prevista e corrigida previamente, através do uso de um comprimento auxiliar ( $LL_{aux}$ ) para o modelo reto.

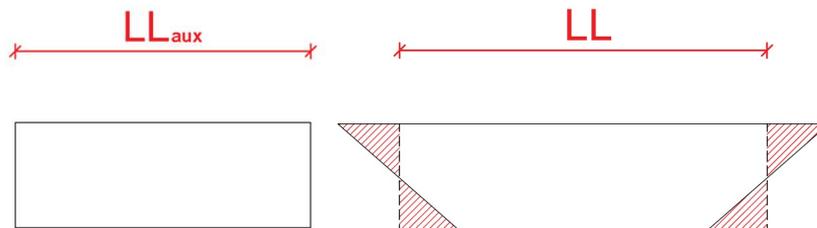
Figura 5 - Deformação devido à curvatura



Fonte: Martha, 2017.

Visando assegurar a conservação do volume do defeito, foram inseridos valores auxiliares do comprimento do defeito ( $LL_{aux}$ ) no PIPEFLAW\_M para que, após a deformação, o volume do defeito deformado seja igual ao do defeito real. Os valores inseridos foram tais que o comprimento da região intermediária do defeito, no sentido da espessura, fosse igual ao do defeito real:

Figura 6 - Conservação do volume do defeito: Vista transversal de defeitos pré e pós encurvamento.



Fonte: O Autor, 2019.

A deformação do defeito ocorre de formas distintas para defeitos intrados e extrados, sendo o primeiro encolhido e o segundo alongado. Dessa forma, são necessárias duas formulações diferentes para o cálculo do  $LL_{aux}$ :

$$LL_{aux}(intrados) = \frac{R_c \times LL}{(R_c - R_e + t - \frac{d}{2})} \quad (4)$$

$$LL_{aux}(extrados) = \frac{R_c \times LL}{(R_c + R_e + t - \frac{d}{2})} \quad (5)$$

onde  $R_e$  é o raio externo da seção transversal, obtido ao dividir  $D_e$  por dois.

Tabela 2 - Dados utilizados na obtenção de  $LL_{aux}$ 

$L_P$ (mm)	LL (mm)	$R_c$ (mm)	$LL_{aux}$ (Intrados)	$LL_{aux}$ (Extrados)
1500	92	955	112	78
2250	92	1432	104	82
3000	92	1910	101	84
3750	92	2387	99	86
4500	92	2865	98	87

Fonte: O Autor, 2019.

Na tabela 2, o raio de curvatura ( $R_c$ ) foi calculado fixando-se o ângulo total de curvatura em  $90^\circ$  para defeitos extrados e  $-90^\circ$  para defeitos intrados, respectivamente:

$$R_c = \frac{L_P}{\pi/2} \text{ ou } -\frac{L_P}{\pi/2} \quad (6)$$

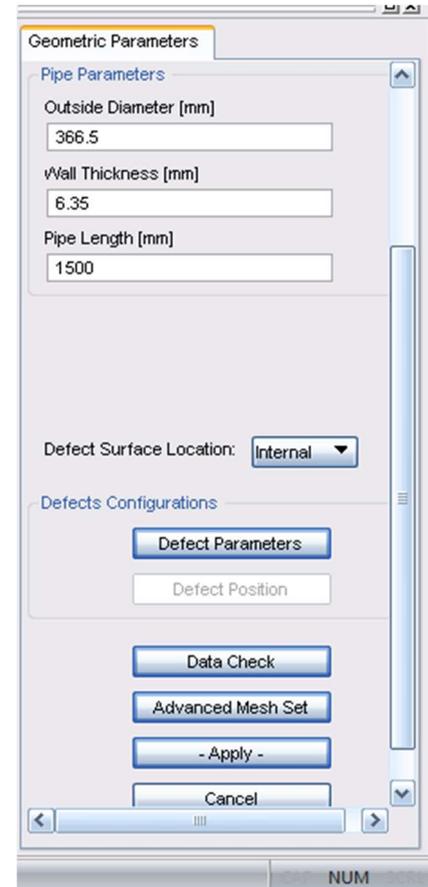
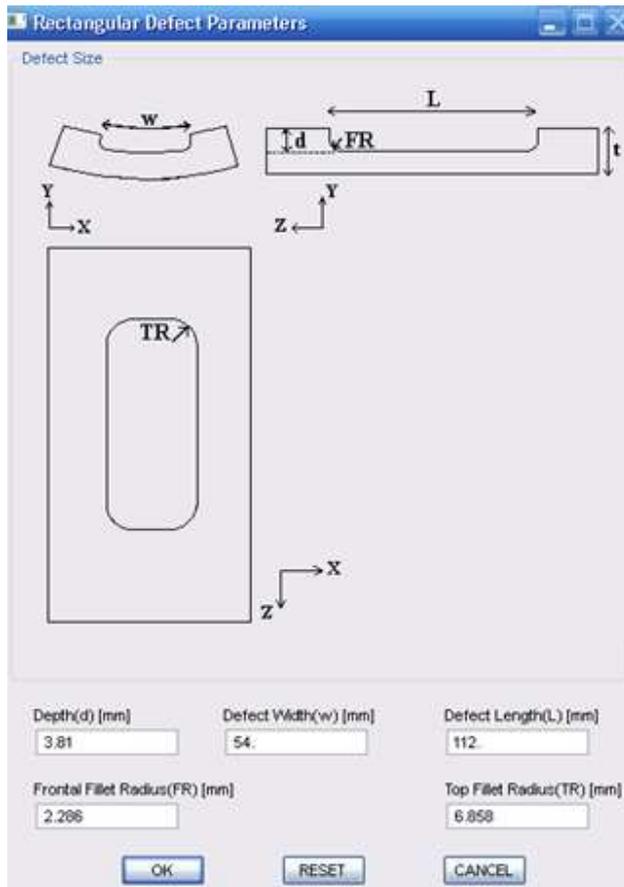
Foi escolhido utilizar apenas dutos curvos de  $90^\circ$  para facilitar a aplicação das condições de contorno no PIPEFLAW.

### 3.2.2 Modelagem de duto reto com defeito

Para analisar o comportamento de um duto curvo é preciso gerar um modelo retilíneo, através de elementos finitos, e em seguida encurvar a posição dos nós dos elementos deste modelo utilizando coordenadas cilíndricas. O modelo retilíneo é gerado automaticamente através do *software* PIPEFLAW\_M (CABRAL, 2007), necessitando apenas de dados dos parâmetros geométricos do duto, comprimento, espessura e raio da seção transversal, e do defeito, conforme descrito no item 2.1.1.

Visando modelar um duto curvo, na figura 7, na janela de dados do defeito, onde há *Defect Length(L)* [mm], deve-se colocar o valor de  $LL_{aux}$  respectivo ao comprimento do duto.

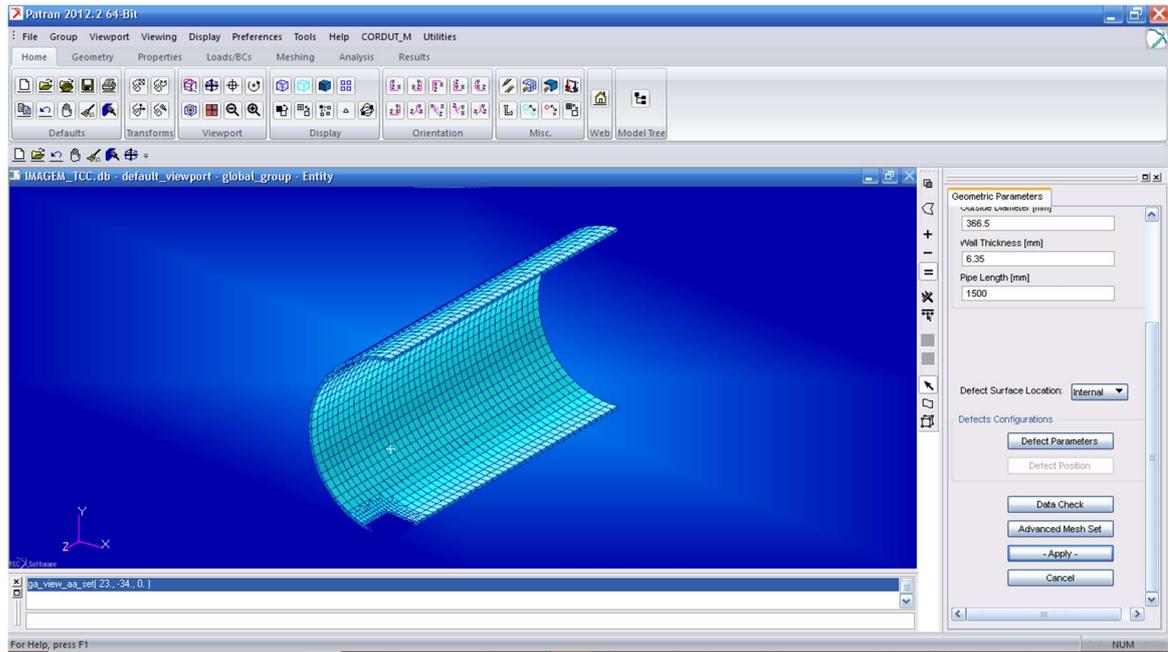
Figura 7 - Janelas de inserção de dados do defeito e do duto.



Fonte: O Autor, 2019.

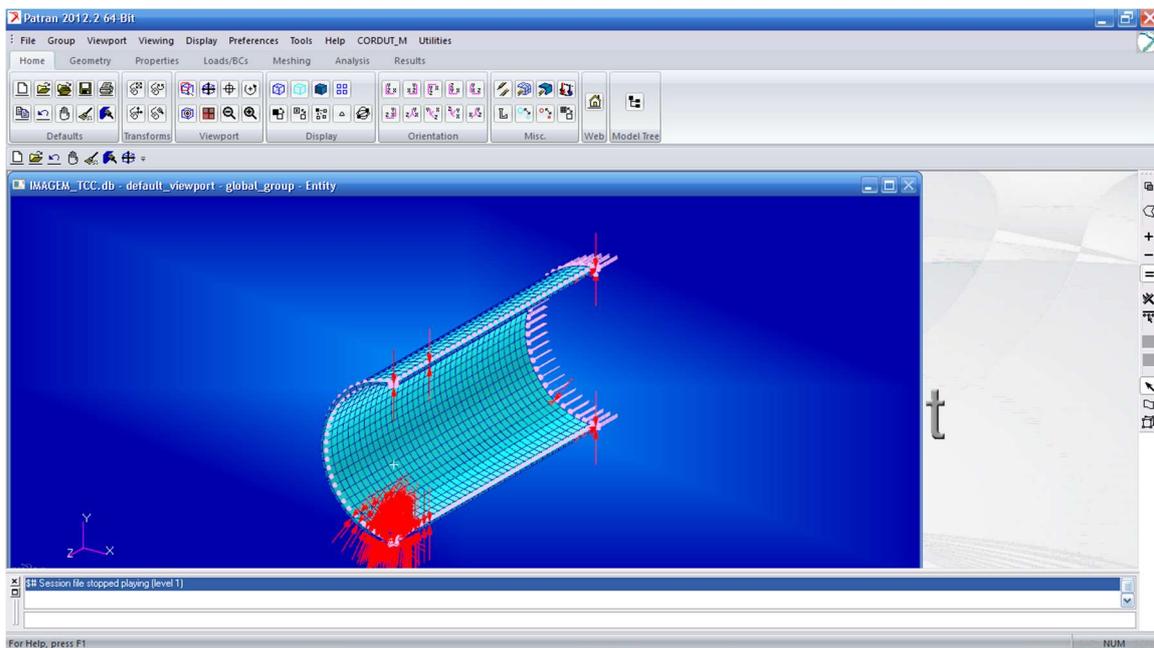
Além da geração automática da malha de elementos finitos, exemplificada na figura 8, o PIPEFLAW\_M gera também, automaticamente, as condições de contorno, como mostra a figura 9.

Figura 8 - Sólido e malha de  $\frac{1}{4}$  de um duto reto utilizando dados da figura 7.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 9 - Aplicação das condições de contorno no duto da figura 8.

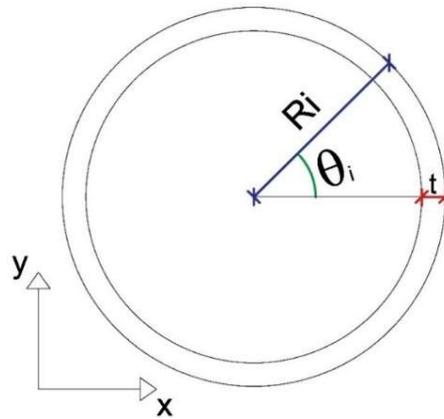


Fonte: O Autor, 2019.

### 3.2.3 Encurvamento do duto

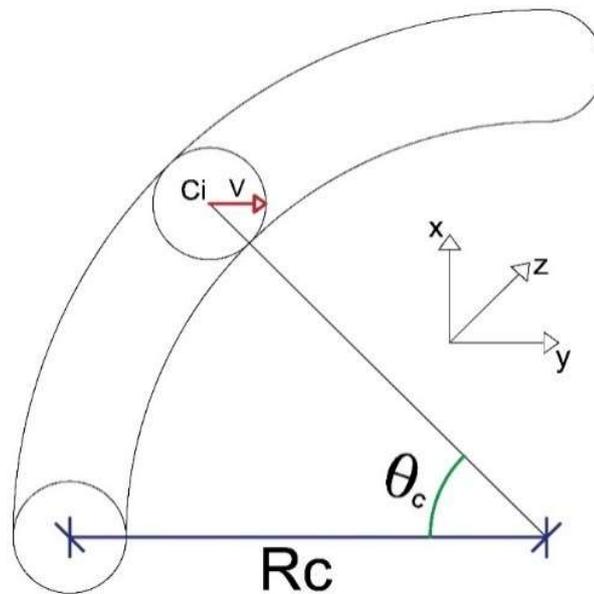
O processo de encurvamento baseou-se na realocação dos nós dos elementos da malha a partir de novas coordenadas obtidas utilizando transformações cilíndricas. A posição de um dado ponto A ( $X, Y, Z$ ) do duto reto, ao ser encuvado, tem suas coordenadas alteradas para ( $X_n, Y_n, Z_n$ ). O processo de realocação utiliza a posição do centro da seção transversal do duto somado a um vetor posição para cada nó de cada elemento da malha do duto:

Figura 10 - Parâmetros geométricos da seção transversal.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 11 - Parâmetros geométricos do duto encuvado.



Fonte: O Autor, 2019.

A posição do centro da seção transversal do duto, contendo A, antes do encurvamento é dada por:

$$C = (0, 0, Z) \quad (7)$$

A nova posição do centro do duto na seção transversal contendo A, após o encurvamento, é dada por:

$$C_i = (0, Y_i, Z_i) \quad (8)$$

onde  $Y_i$  e  $Z_i$  são dados por:

$$Y_i = R_c \times (1 - \cos(\theta_c)) \quad (9)$$

$$Z_i = R_c \times \sin(\theta_c) \quad (10)$$

onde  $\theta_c$  é a posição angular do ponto na curva, mostrado na figura 11.

O vetor posição em função da posição angular do ponto na seção transversal ( $\theta_i$ ) e da posição angular do ponto na curva ( $\theta_c$ ) é dado por:

$$V = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) \quad (11)$$

onde  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  e  $\Delta Z$  são dados por:

$$\Delta X = X \quad (12)$$

$$\Delta Y = R_i \times \sin(\theta_i) \times \cos(\theta_c) \quad (13)$$

$$\Delta Z = -R_i \times \sin(\theta_i) \times \sin(\theta_c) \quad (14)$$

onde  $\theta_i$  é a posição angular do ponto na seção transversal e  $R_i$  é a distância do ponto A ao centro da seção transversal, mostradas na figura 10.

Dessa forma, as novas coordenadas do ponto A, após o encurvamento, são calculadas somando o novo centro da seção transversal ao vetor posição, conforme a equação 15:

$$A = C_i + V = (X_n, Y_n, Z_n) \quad (15)$$

onde  $X_n$ ,  $Y_n$  e  $Z_n$  são dados por:

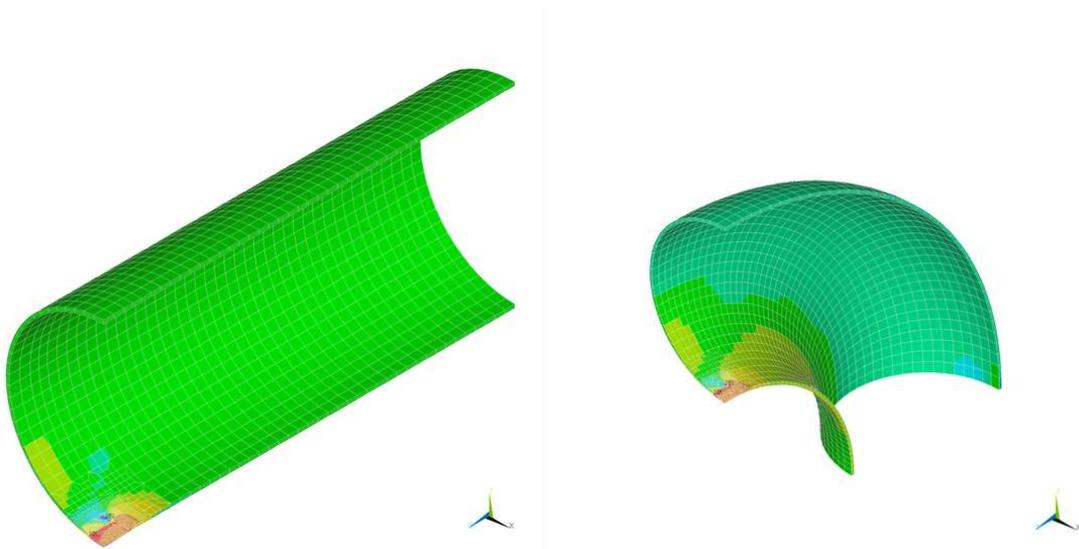
$$X_n = 0 + X \quad (16)$$

$$Y_n = R_c \times (1 - \cos(\theta_c)) + R_i \times \sin(\theta_i) \times \cos(\theta_c) \quad (17)$$

$$Z_n = R_c \times \sin(\theta_c) - R_i \times \sin(\theta_i) \times \sin(\theta_c) \quad (18)$$

A figura a seguir mostra a distribuição de tensões, obtida na AEF, de um duto antes e depois de ser encurvado:

Figura 12 - Duto antes e depois de ser encurvado



Fonte: O Autor, 2019.

Este processo foi automatizado por um código, escrito em Python, que lê as coordenadas  $(X, Y, Z)$  de cada nó de cada elemento da malha, calcula as novas coordenadas pelo processo descrito acima e sobrepõe os dados lidos por  $(X_n, Y_n, Z_n)$ .

A figura 13 abaixo mostra o código para encurvar dutos com defeitos extrados. Para encurvar dutos com defeitos intrados, o cálculo do raio de curvatura ( $R_c$ ) em função do comprimento, para manter o ângulo de curvatura igual a  $90^\circ$ , na linha  $R_c = Lf/\text{math.pi}$  é substituída por  $R_c = -Lf/\text{math.pi}$ .

Figura 13 - Código em Python para encurvar duto em  $90^\circ$

```

*PipeCurve_90graus_20.02.19.py - C:\Users\joaoa\Desktop\Faculdade\INICIACAO_CIENTIFICA_2017.2\Curva
File Edit Format Run Options Window Help
import re, os, shutil, math

def pipe_curve(Jobname, Lf):
    prpname = Jobname+".prp"
    filename = Jobname+"_Curvo.prp"

    Rc=Lf/math.pi

    patNODES = re.compile('^s*N,\s*\d+\s*,')
    real_re = "[+-]?(?:\d*\.\d+|\d+\.\d+|(?!\d+\.?))(?:[Ee][+-]?\d+)?"
    rr = re.compile(real_re)

    DAT_FileObj = open(filename,'w')#(self.Jobname+'.prp','r')
    PRP_FileObj = open(prpname,'r')#(self.Jobname+'.prp','r')
    for Line_i in PRP_FileObj:
        m1 = patNODES.search(Line_i)# N,1, 0.01, 0.00245, -0.0066
        if m1 :
            m2 = rr.findall(Line_i)
            X=float(m2[1])
            Y=float(m2[2])
            Z=float(m2[3])
            Ri = (X**2+Y**2)**.5
            if X==0:
                TETi = math.pi/2
                if Y<0:
                    TETi = -math.pi/2
            else:
                TETi = math.atan(Y/X)
            if X < 0:
                TETi = TETi + math.pi

            TETc = Z/Rc

            Xn = X
            Yn = Rc*(1-math.cos(TETc)) + Ri*math.sin(TETi)*math.cos(TETc)
            Zn = Rc*math.sin(TETc) - Ri*math.sin(TETi)*math.sin(TETc)

            New_Line = Line_i.replace(m2[1]+'', '+m2[2]'+', '+m2[3] ',
            str(Xn).upper()+', '+str(Yn).upper()+', '+str(Zn).upper()+',1)
            DAT_FileObj.write(New_Line)
        else:
            DAT_FileObj.write(Line_i)

    PRP_FileObj.close()
    DAT_FileObj.close()

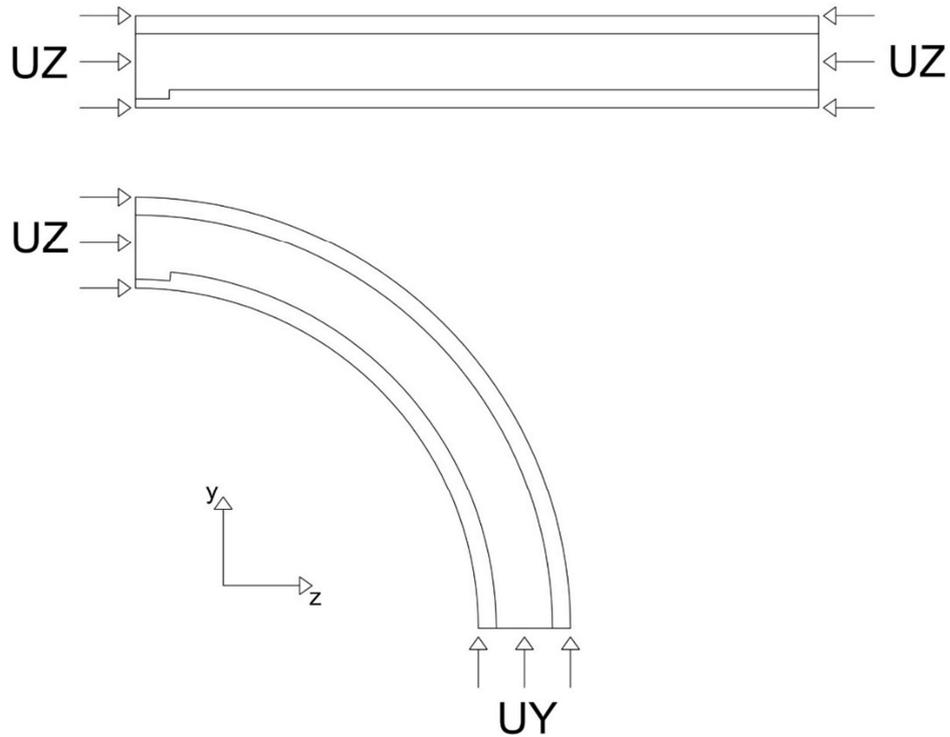
```

Fonte: O Autor, 2019.

### 3.2.4 Correção das condições de contorno

Após a etapa de encurvar através do código produzido em Python, fez-se necessário corrigir as condições de contorno que, inicialmente, estavam adequadas à situação de um duto reto. A figura 14 a seguir mostra a correção necessária, na borda sem o defeito, ao encurvar um duto qualquer.

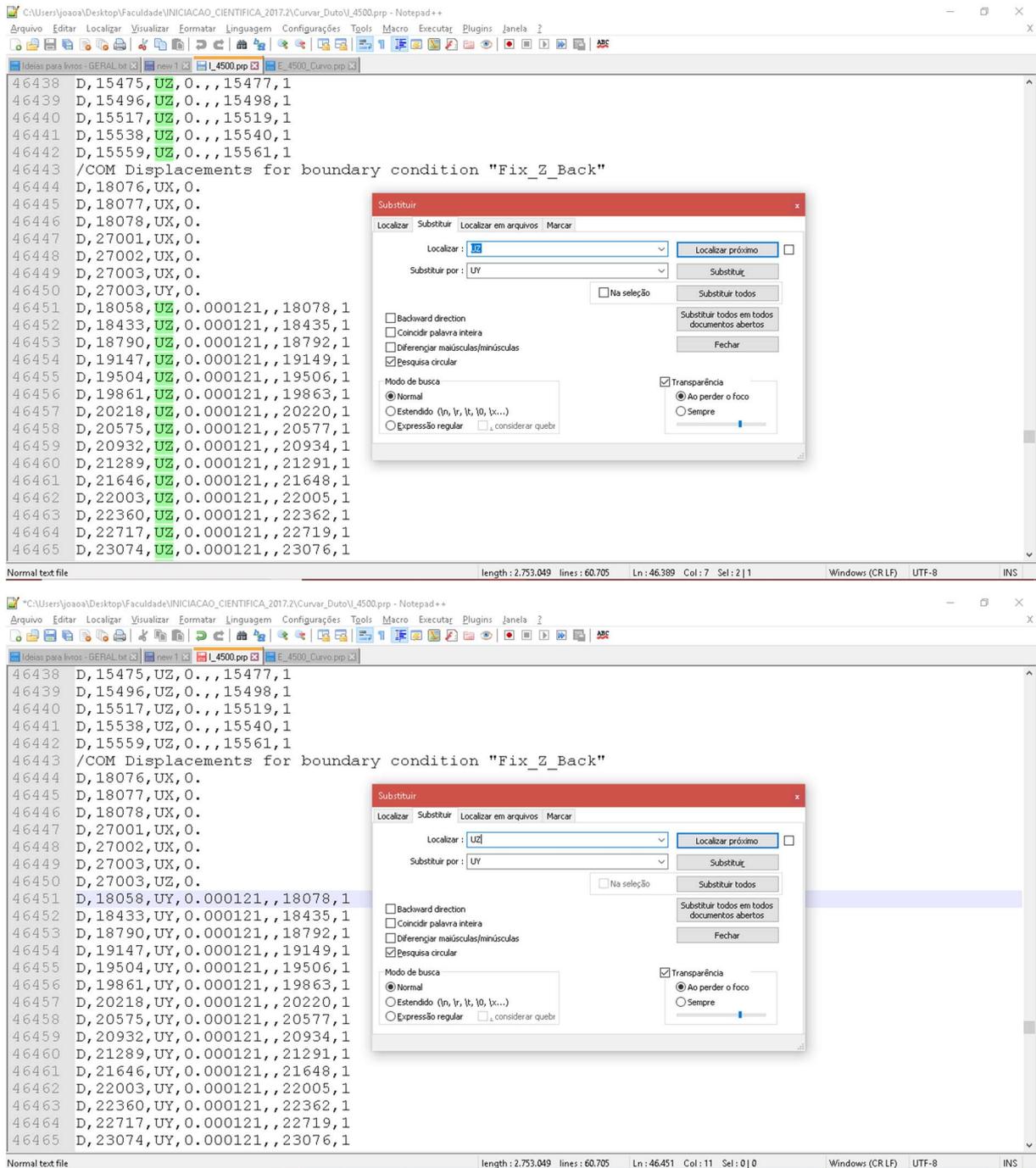
Figura 14 - Condições de contorno necessárias antes e depois de encurvar



Fonte: O Autor, 2019.

A correção foi realizada manualmente, utilizando a função “Substituir” do Notepad++, buscando o código **UZ** a partir da linha que contém “Fix\_Z\_Back”, referente ao travamento translacional na direção de Z na borda sem o defeito, e substituindo-o por **UY**, referente ao travamento translacional na direção de Y. De forma análoga, fez-se o mesmo para mudar, na borda sem o defeito, **UY** para **UZ**. Este procedimento será futuramente automatizado através da atualização do código em Python. A figura 15 abaixo mostra esse procedimento.

Figura 15 - Substituição dos travamentos translacionais



Fonte: O Autor, 2019.

### 3.2.5. Análise não linear

Neste trabalho, ambas não linearidade física, que ocorre devido ao comportamento elastoplástico do metal, e a não linearidade geométrica, que ocorre quando as deformações são maiores do que as esperadas (mais que 1%) são

consideradas na AEF. É extremamente importante considerar a análise de tensão-deformação para dutos submetidos a carregamentos internos de pressão, uma vez que sua deformação aumenta o diâmetro interno e reduz a espessura do tubo, reduzindo a resistência estrutural, o que pode levar a uma situação instável (ANSYS Software, 2012). Através do método de Newton-Raphson, realizando um processo de incrementos iterativos de pressão interna, a solução pelo MEF é obtida. Os incrementos de carregamento são feitos em etapas de carregamento até atingir a situação de equilíbrio.

O material a ser considerado nos exemplos numéricos é o aço API 5L-X52. Este material pode ser adequadamente modelado em comportamento elástico-plástico de acordo com o modelo constitutivo de von Mises com endurecimento isotrópico. As curvas de tensão-deformação foram construídas usando a equação de Ramberg-Osgood como sugerido pela BS B31G. A curva de material utilizada é apresentada na Tabela 3:

Tabela 3 - Curva tensão x deformação do material

Deformação	Tensão
0,001935	396,744726
0,004988	450,340500
0,006893	465,095044
0,009887	480,426660
0,014544	496,671257
0,021702	514,342115
0,032561	534,214285
0,048790	557,445000

Fonte: O Autor, 2019.

O programa utilizado para realizar as análises foi o PIPEFLAW\_A. O anexo A contém imagens exemplificando o procedimento utilizado no PIPEFLAW\_A.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de compreender o comportamento de dutos curvos em função de sua curvatura, foram analisados cinco casos para defeitos extrados, cinco casos para defeitos intrados e um caso de duto reto para servir de referência, conforme apresentado na tabela 4. As dimensões da seção transversal dos dutos e dos defeitos foram mantidas. As mudanças realizadas foram no comprimento do modelo do duto e, conseqüentemente, na curvatura. A tabela 4 também mostra a pressão de falha obtida para cada caso. Os valores negativos de curvatura são meramente numéricos, calculados para o funcionamento do código em Python para encurvar dutos.

Tabela 4 - Curvatura x Pressão de Falha

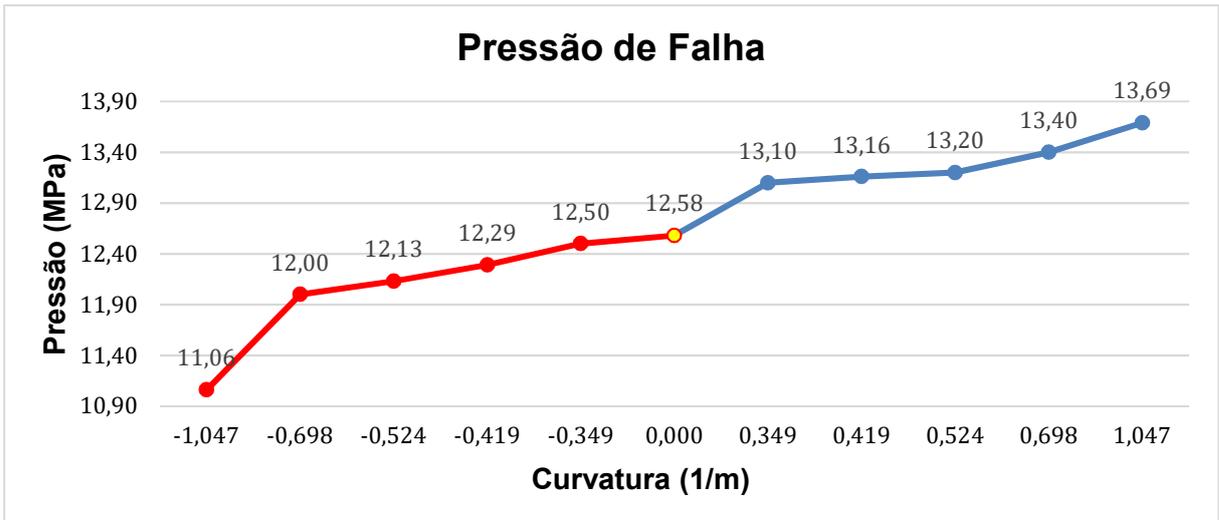
Tipo de duto	$R_c$ (m)	Curvatura (1/m)	Pressão (MPa)
Intrados	-0,9549	-1,0472	11,06
	-1,4325	-0,6981	12,00
	-1,9099	-0,5236	12,13
	-2,3872	-0,4189	12,29
	-2,8645	-0,3491	12,50
Reto	Inf.	0,0000	12,58
Extrados	2,8645	0,3491	13,10
	2,3872	0,4189	13,16
	1,9099	0,5236	13,20
	1,4325	0,6981	13,40
	0,9549	1,0472	13,69

Fonte: O Autor, 2019.

É notável que a posição do defeito determina se há aumento ou diminuição da pressão de falha, o primeiro para defeitos extrados e o segundo para defeitos intrados. Essa diferença ocorre pela concentração de tensões causadas pela geometria da tubulação na região intrados e liberação de tensões na região extrados, ao que tudo indica na figura 4 (fator de Lorenz).

As figuras 16 e 17 apresentam os resultados da pressão de falha dos tubos, listados na tabela 4, obtidos pela AEF. A partir dessas, pode-se observar que a curvatura e a posição do defeito interferem diretamente na pressão de falha, formando assim uma função quase linear. Para defeitos intrados, a tendência é que a pressão de falha seja menor que a de um duto reto, e o comportamento oposto é encontrado para defeitos extrados.

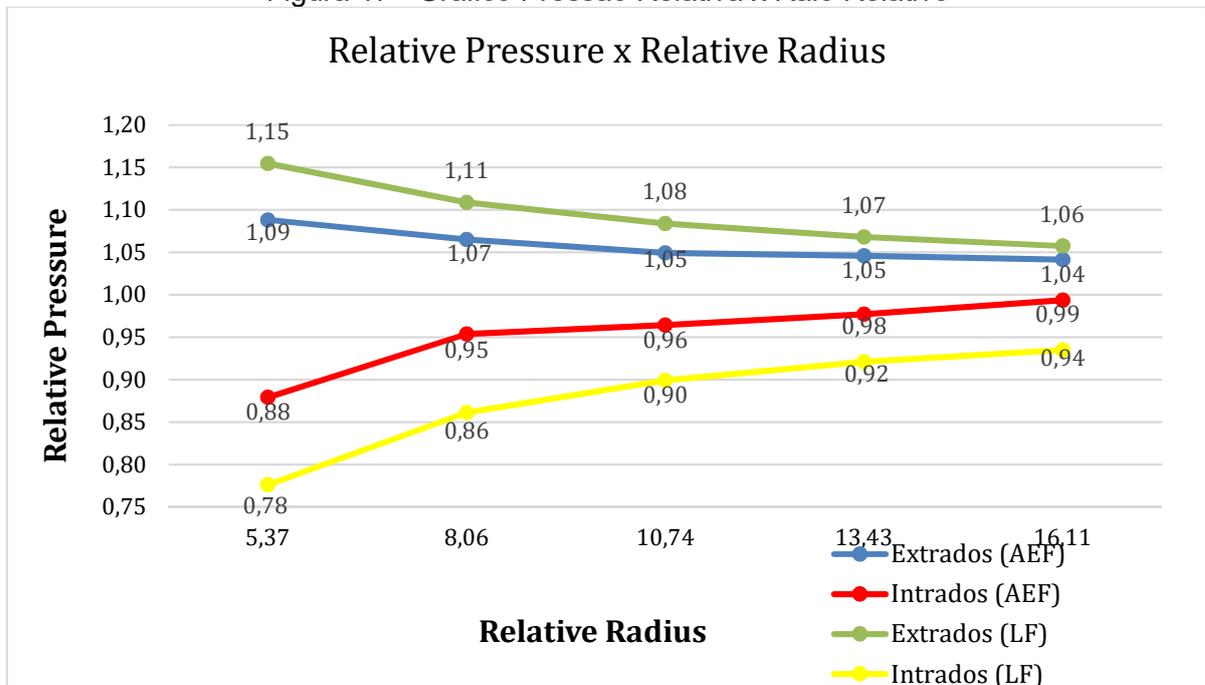
Figura 16 - Gráfico Pressão de Falha x Curvatura



Fonte: O Autor, 2019.

Na figura 17, a pressão relativa é obtida dividindo a pressão do duto curvo pela pressão do duto reto e o raio relativo é obtido dividindo o raio da curvatura pelo raio da seção transversal. Há também um aumento de até 9% na pressão de falha para defeitos extrados e uma redução de 12% para defeitos intrados, obtidas pela AEF, enquanto que há aumento e decréscimo de 15% e 22%, respectivamente, nas pressões de falha obtidas pelo LF.

Figura 17 - Gráfico Pressão Relativa x Raio Relativo



Fonte: O Autor, 2019.

Comparando os resultados de pressão de falha obtidos pela AEF para dutos curvos com os resultados obtidos multiplicando  $1 / LF$  pela pressão obtida via AEF para dutos retos, observa-se um comportamento semelhante ao obtido por Lee (2015). A AEF indica um comportamento mais próximo de um duto reto enquanto que o LF indica um comportamento mais discrepante de um duto reto. Os resultados obtidos são mostrados na figura 17 e na tabela 5, onde  $\Delta P$  é a diferença entre a pressão obtida pelo LF e a obtida pela AEF:

Tabela 5 - Variação da pressão entre os métodos de LF e AEF

Posição do defeito	L	Fator de Lorenz	Pressão (LF)	Pressão (AEF)	$\Delta P$	$\Delta P$ (%)
INTRADOS	1500	1,2883	9,76	11,06	-1,30	-11,71
	2250	1,1612	10,83	12,00	-1,17	-9,72
	3000	1,1119	11,31	12,13	-0,82	-6,73
	3750	1,0857	11,59	12,29	-0,70	-5,72
	4500	1,0694	11,76	12,50	-0,74	-5,89
EXTRADOS	4500	0,9457	13,30	13,10	0,20	1,55
	3750	0,9362	13,44	13,16	0,28	2,11
	3000	0,9227	13,63	13,20	0,43	3,29
	2250	0,9020	13,95	13,40	0,55	4,08
	1500	0,8661	14,52	13,69	0,83	6,10

Fonte: O Autor, 2019.

É então verificado que a aplicação do fator LF apresenta resultados não conservativos para os casos de defeitos extrados, quando comparado com os resultados obtidos pelo uso da AEF. O uso da AEF também reduz o conservadorismo presente no LF para defeitos intrados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o objetivo geral de estudar de que modo a influência da curvatura do eixo de dutos curvos a quente corroídos interfere na resistência à pressão interna destes dutos, pode-se afirmar que este se mostrou desafiador, principalmente em razão da pouca quantidade de pesquisas e publicações a respeito da temática. Isto, por sua vez, mostra a importância da realização dos mesmos para o aprofundamento dos conhecimentos que eles podem gerar e, conseqüentemente, para as soluções que encontradas para os problemas identificados.

A comparação realizada entre os casos executados ocorreu mantendo-se parâmetros geométricos e físicos, alterando-se o comprimento do duto e, conseqüentemente, o raio de curvatura do eixo do duto, podendo assim rodar casos com pressões internas, com defeito simples, visando ratificar a influência da geometria desse duto.

De modo geral, observou-se que existe uma influência da curvatura na modelagem e na resistência à pressão interna de dutos curvos, a depender a posição angular do defeito (intrados ou extrados). A identificação desses defeitos resulta na contribuição com instituições que necessitam de processos rápidos, automatizados e seguros de modelagem e análise de dutos, especificamente os curvos. Nesse sentido, é importante enfatizar o uso do MEF como um procedimento menos conservador e, ao mesmo tempo, mais seguro e conseqüentemente, mais adequado na obtenção de pressões de falha.

Sucintamente, pode-se concluir:

- Pode-se deduzir dos resultados que há uma influência da curvatura na resistência mecânica de dutos curvos;
- O processo de modelagem automática de dutos curvos se mostrou desafiador, porém praticável;
- A posição do defeito, intrados ou extrados, mostrou interferir no acréscimo ou decréscimo da resistência mecânica.

Espera-se que, com a produção deste trabalho, novos projetos e pesquisas sejam desenvolvidas:

- Desenvolvimento de um fator alternativo ao de Lorenz;
- Estudo de dutos encurvados a frio, focando na interação da curvatura com a presença de enrugamento e ovalização;

- Modelagem automática por programação em PCL – *patran command language*.

Vale salientar, em razão da limitação do tempo de um trabalho acadêmico, que esta temática ainda carece de desenvolvimento, o que certamente será levado adiante pelo grupo de pesquisa PADMEC. O presente estudo contribui com novos dados para futuras pesquisas como a análise da posição angular do defeito ao longo da circunferência do duto, o desenvolvimento de um fator alternativo ao de Lorenz, baseado no MEF, entre outros.

Ressalte-se que, embora o PIPEFLAW gere modelos de dutos retos condizentes com o caso real, a metodologia adotada e conhecida até então para a geração de dutos curvos consiste num processo de aproximação da realidade, o que reforça ainda mais a importância e necessidade do desenvolvimento de uma modelagem mais precisa.

Como formando em Engenharia Civil, considero o aprendizado obtido como aluno de iniciação científica no grupo de pesquisa PADMEC e neste trabalho de conclusão de curso uma oportunidade de crescimento profissional tendo obtido uma visão mais ampla sobre o assunto, bem como um estímulo para o desenvolvimento da carreira acadêmica que almejo.

## REFERÊNCIAS

BUBENIK, T.A.; ROSENFELD, M.J. **Topical report on assessing the strength of corroded elbows**. Columbus: Battelle press, 1993.

CABRAL, H. L. D. **Desenvolvimento de ferramentas computacionais para modelagem e análise automática de defeitos de corrosão em dutos**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

CALLADINE, C. Limit analysis of curved tubes. **Journal of Mechanical Engineering Science**, p. 85-87, 1974.

ESCOE, A. K. **Piping and pipeline assessment guide**. Oxford, UK: Elsevier, 2006.

KYRIAKIDES, S.; JU, G. T. **Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending**. Part II: Predictions. Austin: The University of Texas, 1992. p. 53.

MARTHA, L. F. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. São Paulo: Gen, 2017.

MICHAEL, T. C.; VEERAPPAN, A.; SHANMUGAM, S. S. Effect of cross section on collapse load in pipe bends subjected to in-plane. **International Journal of Engineering, Science and Technology**, v. 3, p. 247-256, 2011.

MOTTA, R. S.; AFONSO, S. M. B.; WILLMERSDORF, R. B.; LYRA, P. R. M.; ANDRADE, E. Q. Automatic modeling and analysis of pipelines with colonies of corrosion defects. *In*: CILAMCE, Buenos Aires, 2010. **Proceedings** [...]. Buenos Aires, AR, 2010.

MOTTA, R. S.; LEAL, C. F. Reliability analysis of ovalized pipes with corroded defects. *In*: MECSOL, São Carlos, SP, 2019. **Proceedings** [...]. São Carlos, SP, 2019.

MOTTA, R. S. et al. Automatic modeling and analysis of pipelines with colonies of corrosion defects. **Mecânica Computacional**, Buenos Aires, v. 29, p. 7871-7890, nov. 2010.

OLIVEIRA, M. F. D.; LOURES, P. V. M. V. **Análise do comportamento de fluido escoando através de dutos curvos em formato S com diferentes geometrias**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

PEREIRA, L. F. C.; SILVA, S. M. B. A. **Desenvolvimento de ferramentas para modelagem e simulação de dutos com defeitos causados por corrosão**. *In*: CONIC, 23., Recife, 2015. **Anais** [...]. Recife, 2015.

RIAGUSOFF, I. I. T. *et al.* Modeling pipe cold bending: a finite element approach. *In: ANSYS SOUTH AMERICAN CONFERENCE & ESSS USERS MEETING*, 2010, Atibaia. **Slides** [...]. Atibaia: ESSS; ANSYS, 2010.

ROBERTSON, A.; LI, H.; MACKENZIE, D. Plastic collapse of pipe bends under combined internal pressure and in-plane bending. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Glasgow, v. 82, p. 407-416, 2005.

SANTOS, A. R. **Metodologia científica**: a construção do conhecimento. 6. ed. Rio de Janeiro, 2004.

SHALABY, M.; YOUNAN, M. Limit Loads for Pipe Elbows Subjected to In-Plane Opening Moments and Internal Pressure. **ASME J. Pressure Vessel Technol.**, v. 121, p.17-23, 1998.

SILVA, E. S. **Análise da integralidade estrutural de dutos com defeitos de corrosão interagentes através de modelagem multifísica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

TIMASHEV, S.; BUSHINSKAYA, A. **Diagnostics and reliability of pipeline systems**. [Switzerland]: Springer, 2016.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2014.

WYSZOMIRSKA, L. F. B. **Cargas de colapso em dutos submetidos a momento fletor e pressão interna**. 2014. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014. 51 p.

YUN-JAE, K. *et al.* Effect of bend angle on plastic loads of pipe bends under internal pressure and in-plane bending. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 49, 2007. ISSN 1413-1424.

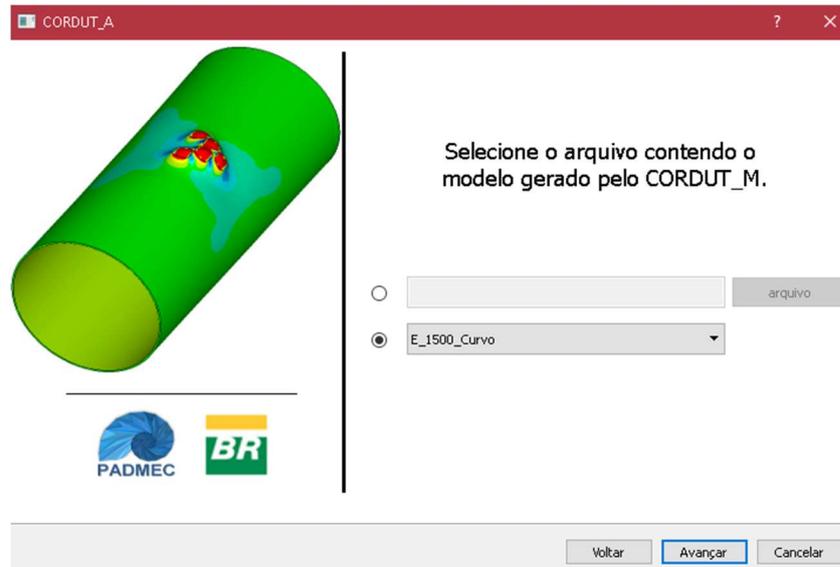
YUN-JAE, K.; CHANG-SIK, O. Effects of attached straight pipes on finite element limit analysis for pipe bends. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Seoul, v. 84, p. 177-184, 2007.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R.L. **The finite element method**. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. v. 1.

## ANEXO A – ETAPAS DO PIPEFLAW\_A

Esta sessão do trabalho tem por objetivo expor através de imagens as etapas de uso do PIPEFLAW\_A para a análise dos casos gerados. As figuras 18 a 23 abaixo estão em ordem de janelas do programa.

Figura 1 - Seleção do arquivo contendo a malha gerada no PIPEFLAW\_M



Fonte: O Autor, 2019.

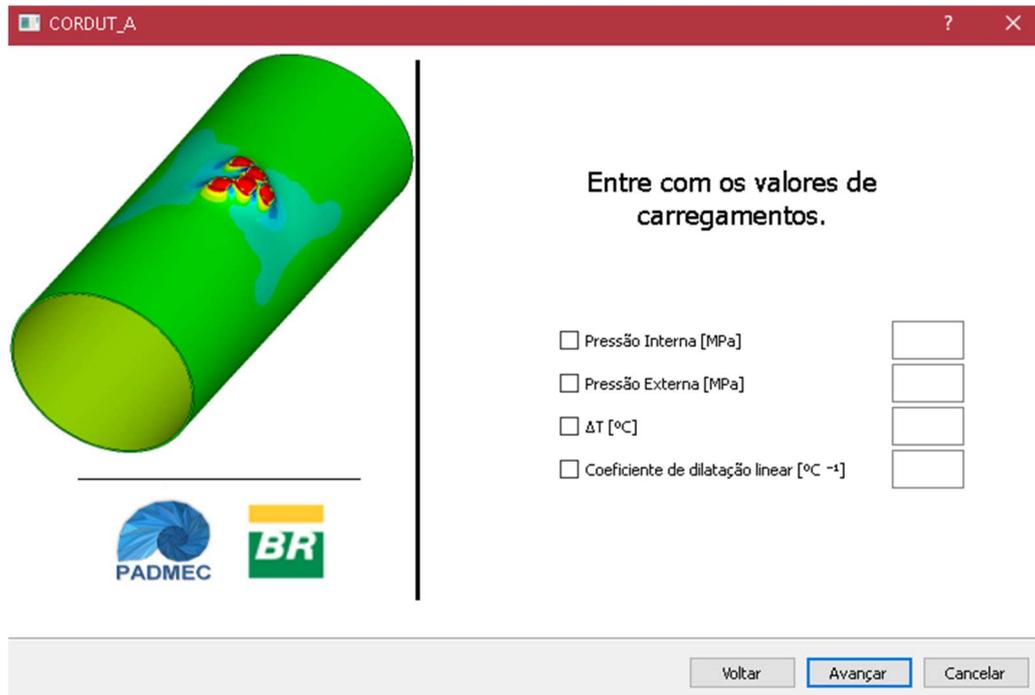
Figura 2 - Seleção da condição do duto



Fonte: O Autor, 2019.

A etapa de entrada de dados de carregamento é avançada deixando os campos em branco como mostra a figura 20 abaixo:

Figura 3 - Entrada de dados de carregamento



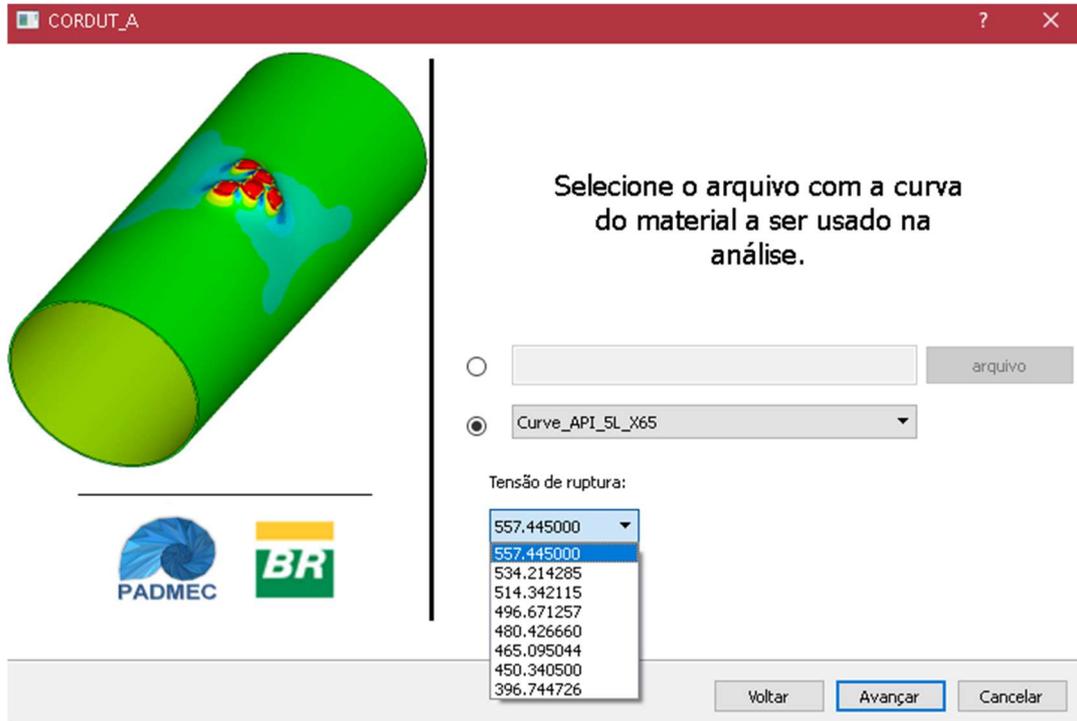
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 4 - Seleção de modo de entrada da curva do material



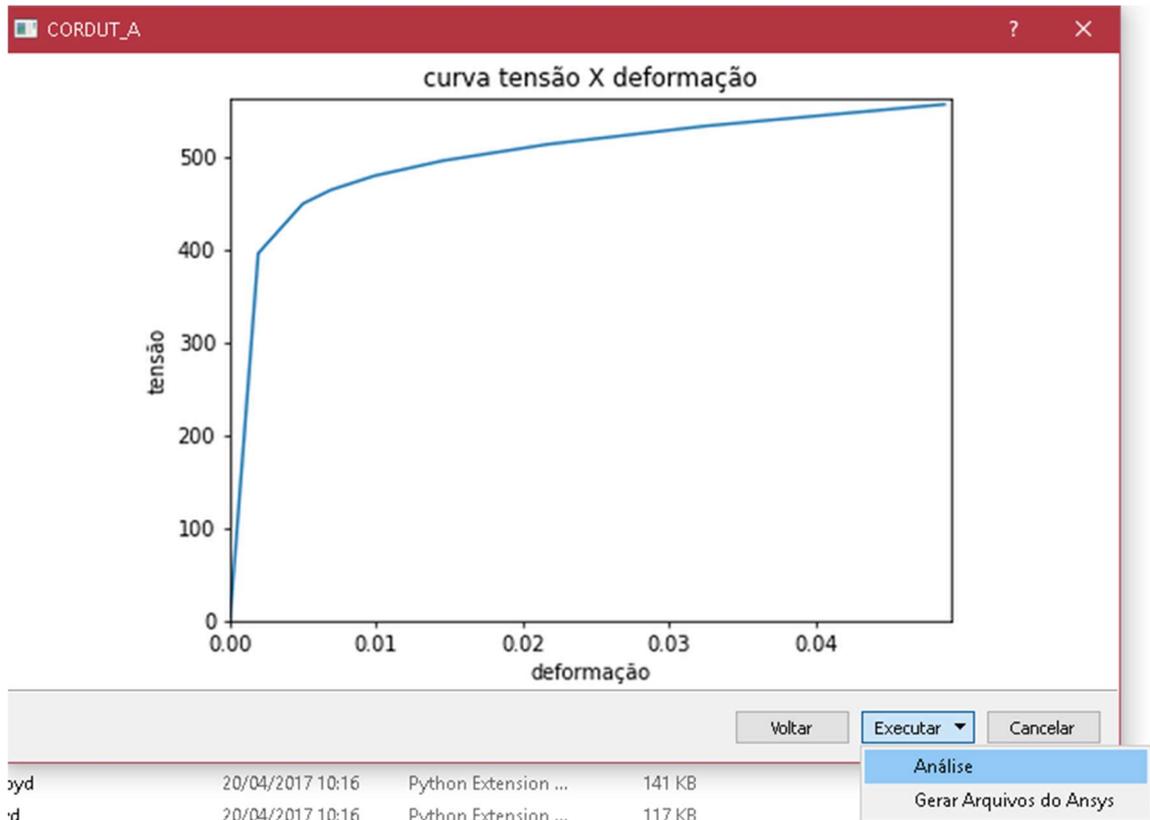
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 5 - Seleção do arquivo com a curva do material



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 6 - Curva tensão x deformação do material seleccionado



Fonte: O Autor, 2019.