



ANÁLISE DE TENSÕES CONSIDERANDO O EFEITO DA TEMPERATURA EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA

MAYARA GABI MOREIRA

**PROJETO DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE TENSÕES CONSIDERANDO O EFEITO
DA TEMPERATURA EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA**

MAYARA GABI MOREIRA

Orientador: PROF. DR. LUIS AUGUSTO CONTE MENDES VELOSO, ENM/UNB

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PUBLICAÇÃO ENM.PG - XXX/AAAA
BRASÍLIA-DF, 02 DE MAIO DE 2022.**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE TENSÕES CONSIDERANDO O EFEITO
DA TEMPERATURA EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA**

MAYARA GABI MOREIRA

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Luis Augusto Conte Mendes Veloso, ENM/UnB
Orientador

Prof. Dr. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, ENM/UnB
Examinador interno

Prof. Dr. Taygoara Felamingo De Oliveira, ENM/UnB
Examinador interno

BRASÍLIA, 02 DE MAIO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

MAYARA GABI MOREIRA

Análise de Tensões Considerando o Efeito da Temperatura em Cabos Condutores de Energia

2022xv, 147p., 201x297 mm

(ENM/FT/UnB, Engenheiro Mecânico, Engenharia Mecânica, 2022)

Projeto de Graduação - Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MAYARA GABI MOREIRA (2022) Análise de Tensões Considerando o Efeito da Temperatura em Cabos Condutores de Energia. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Publicação xxx/AAAA, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 147p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: MAYARA GABI MOREIRA

TÍTULO: Análise de Tensões Considerando o Efeito da Temperatura em Cabos Condutores de Energia.

GRAU: Engenheiro Mecânico ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste projeto de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva a outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

MAYARA GABI MOREIRA

mayaragabimoreira05@gmail.com

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à minha família, principalmente aos meus pais, que me dão apoio e me orientam sempre, aos meus padrinhos, que me incentivam a estudar e a entrar na UnB, e me deram grande suporte nos meus primeiros anos da faculdade. Meu muito obrigado ao meu orientador, PROF. DR. Luís Augusto Veloso, pelos ensinamentos e orientações desde o início do PIBIC. Por fim, agradeço aos meus queridos melhores amigos, Emanuel Belchior, Vitória Gabriela, por estarem comigo em todos os momentos.

Resumo

Atualmente, devido à grande demanda por energia elétrica, muitas concessionárias estão reconduzindo as linhas de transmissão existentes, cujos novos condutores tendem a operar com temperaturas mais elevadas. Essas temperaturas afetam o comportamento mecânico dos condutores, alterando as tensões nos fios, podendo trazer implicações à vida à fadiga do condutor. Por sua vez, estudos sobre as tensões e a vida à fadiga de condutores considerando os efeitos da temperatura são ainda pouco explorados na literatura técnica, sendo que dois trabalhos pioneiros de essência puramente experimental foram desenvolvidos a vida à fadiga de condutores sob temperatura na Universidade de Brasília. Nesse sentido, o presente trabalho visa trazer uma contribuição para o tema através de um estudo de tensões no condutor considerando o efeito da temperatura. Para isso, foram realizadas análises numéricas de um condutor de alumínio liga por meio do Método dos Elementos Finitos, empregando o software comercial ANSYS-APDL. As simulações consideram o condutor sob efeito inicial da carga de esticamento, sendo que as temperaturas são aplicadas posteriormente segundo uma distribuição radial. Essas temperaturas foram obtidas através de análises de elementos finitos realizadas por Kang, Strobach e Franck (2013), considerando diferentes condições de operação e fatores ambientais. Três diferentes cargas de esticamento foram simuladas considerando diferentes distribuições de temperaturas. Foi observado que, no deslocamento, o efeito da temperatura é preponderante sobre a carga de esticamento, devido ao elevado coeficiente de dilatação térmica do alumínio. Entretanto, esse efeito tende a reduzir-se com o aumento da carga de esticamento do condutor. Em relação às tensões, foi observado que o aumento da velocidade de vento gera diminuição das tensões normais nos fios do núcleo e das duas primeiras camadas, onde a terceira camada permanece praticamente inalterada, enquanto que há um acréscimo de tensões na última camada. Pois, com o resfriamento da última camada, há uma tendência de encurtamento relativo da mesma em relação às demais, surgindo tensões de tração adicionais nos fios dessa camada. Além disso, verificou-se que o aumento da carga de esticamento gera um aumento linear da tensão média no condutor, enquanto que o aumento do gradiente de temperatura gera uma redução dessa tensão. Com isso, foi demonstrado a importância da consideração do efeito da temperatura nas tensões do condutor.

Palavras-chaves: Cabos condutores; ANSYS APDL; Análise de Tensões.

Abstract

Currently, due to the high demand for electricity, many dealerships are re-conducting existing transmission lines, whose new conductors tend to operate at higher temperatures. These temperatures affect the mechanical behavior of the conductors, changing the tensions in the wires, which may have implications for conductor fatigue life. On the other hand, studies about stresses and fatigue life of conductors considering the effects of temperature are still little explored in the technical literature, and two pioneering works with purely experimental essence were developed on the fatigue life of conductors under temperature at the University of Brasília. In that regard, The present work aims to bring a contribution to the theme through a study of stresses in the conductor considering the effect of temperature. For this, numerical analyzes of an aluminum alloy conductor were performed using the Finite Element Method, using the commercial software ANSYS-APDL. The simulations consider the conductor initially under the effect of the stretching load, and the temperatures are applied later according to a radial distribution. These temperatures were obtained through analysis of finites elements performed by Kang, Strobach e Franck (2013), considering different operating conditions and environmental factors. Three different stretching loads were simulated considering different temperature distributions. It was observed that, in displacement, the effect of temperature is predominant on the stretching load, due to the high coefficient of thermal expansion of aluminum. However, this effect tends to decrease with increasing conductor stretching load. Regarding the tensions, it was observed that the increase in wind speed generates a decrease in the normal tensions in the core wires and in the first two layers, where the third layer remains practically unchanged, while there is an increase in tensions in the last layer. Because, with the cooling of the last layer, there is a tendency of relative shortening of the same in relation to the others, appearing additional tensile stresses in the wires of this layer. Furthermore, it was found that the increase in the stretching load generates a linear increase in the average stress in the conductor, while the increase in the temperature gradient generates a reduction in this stress. Therefore, it was demonstrated the importance of considering the effect of temperature on conductor stresses.

Keywords: Conductor cables; ANSYS APDL; Stresses Analysis.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 1 |
| 1.2 | APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA | 2 |
| 1.3 | OBJETIVOS DO TRABALHO..... | 3 |
| 1.3.1 | OBJETIVOS GERAIS | 3 |
| 1.3.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 4 |
| 1.4 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO..... | 4 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1 | EFEITOS TÉRMICOS NO CONDUTOR | 5 |
| 2.1.1 | ANÁLISE TÉRMICA REALIZADA POR KANG, STROBACH E FRANCK (2013) | 9 |
| 2.2 | EFEITO DA TEMPERATURA SOB COMPORTAMENTO MECÂNICO..... | 14 |
| 2.2.1 | DEFORMAÇÕES TÉRMICAS..... | 14 |
| 2.2.2 | COMPORTAMENTO EM FADIGA DE CONDUTORES..... | 16 |
| 2.3 | COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS CABOS CONDUTORES | 18 |
| 2.3.1 | EQUAÇÕES ANALÍTICAS PARA UM CONDUTOR SOB TRAÇÃO..... | 21 |
| 2.4 | MODELAGEM DE CABOS CONDUTORES..... | 23 |
| 2.4.1 | TIPOS DE CONTATO ENTRE OS FIOS DE UM CONDUTOR | 26 |
| 2.4.2 | MODELAGEM NUMÉRICA REALIZADA POR PEDROSA (2021) E JUNIOR (2021)..... | 28 |
| 3 | ANÁLISE COMPUTACIONAL..... | 32 |
| 3.1 | MODELO NUMÉRICO..... | 32 |
| 3.2 | ANÁLISE TÉRMICA..... | 34 |
| 3.3 | ANÁLISE DE TENSÕES | 34 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 38 |
| 4.1 | GEOMETRIA E MALHA..... | 38 |
| 4.2 | RESULTADOS..... | 39 |
| 4.2.1 | RESULTADO DO DESLOCAMENTO NA EXTREMIDADE DO CONDUTOR..... | 40 |
| 4.2.2 | RESULTADO DE TENSÕES NORMAIS | 49 |
| 4.3 | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 58 |

| | |
|-----------------------------------------|-----------|
| 5 CONCLUSÃO | 64 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 66 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Flecha máxima aceitável em linha de transmissão (Rodrigues, 2021) | 6 |
| 2.2 | Princípio do Balanço Térmico (CIGRE, 2014)..... | 8 |
| 2.3 | Comparativo de $T(r)$ para Diferentes T_a, V_w e S quando $T_c = T_{lim} = 80^\circ\text{C}$ (Kang, Strobach e Franck, 2013)..... | 11 |
| 2.4 | Comparativo de $T(r)$ para Diferentes T_a, V_w e S quando $T_s = T_{lim} = 80^\circ\text{C}$ (Kang, Strobach e Franck, 2013)..... | 12 |
| 2.5 | Variação da Temperatura do Núcleo com o Tempo (Kang, Strobach e Franck, 2013)..... | 13 |
| 2.6 | Comparação de $T(r)$ para os Casos com $I_f = 2,0 I_{ccc}$ (Kang, Strobach e Franck, 2013)..... | 13 |
| 2.7 | Comparação de $T(r)$ para os Casos com $I_i = 0,6 I_{ccc}$ (Kang, Strobach e Franck, 2013)..... | 14 |
| 2.8 | Tensão Alternada e Números de Ciclos para Uma Quebra (Costa et al. ,2020). .. | 18 |
| 2.9 | Tensão Alternada e Números de Ciclos para Quatro Quebras(Costa et al., 2020). | 18 |
| 2.10 | Esforços Atuantes em um Condutor sob Tração (BAUMANN e NOVAK ,2017).. | 19 |
| 2.11 | Diagrama de Corpo Livre de um Fio do Condutor sob Cargas Alternadas (BAUMANN e NOVAK, 2017)..... | 19 |
| 2.12 | Variação da Rigidez à Flexão (EI) com a Curvatura k (Papailiou ,1995)..... | 21 |
| 2.13 | Esforços nos Fios para Cabo Submetido a Tração (Cardou, 2013)..... | 22 |
| 2.14 | Modelo com Elementos Sólidos (BAUMANN e NOVAK, 2017)..... | 23 |
| 2.15 | Modelo com Elementos de Viga (BAUMANN e NOVAK, 2017)..... | 25 |
| 2.16 | Tipos de Contato em um Condutor (Rodrigues, 2021). | 26 |
| 2.17 | Contato Radial (Lalonde, Guilbault e Legeron, 2016)..... | 27 |
| 2.18 | Contato Circuferencial (Lalonde, Guilbault e Legeron, 2016). | 27 |
| 2.19 | Contato por meio de Pivô (BAUMANN e NOVAK, 2017; JUNIOR, 2021)..... | 28 |
| 2.20 | Exemplo de Uso de Elementos BEAM 189 (Lalonde, Guilbault e Legeron, 2016)..... | 29 |
| 2.21 | Interação Elementos TARGE 170 e CONTA 177 Line-to-Surface, (ANSYS, 2020)..... | 30 |
| 2.22 | CONTA177 para Fios Cruzados e Fios Paralelos (ANSYS, 2020)..... | 31 |

| | | |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | Condutor Sob Carga axial (Pedrosa, 2021). | 34 |
| 3.2 | Temperatura para cada Camada..... | 35 |
| 3.3 | Passos de Carga (<i>Load Steps</i>) das Simulações. | 37 |
| 4.1 | Vista Isométrica do Condutor | 38 |
| 4.2 | Vista Frontal do Condutor | 39 |
| 4.3 | Deslocamento no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 10\%$ UTS. | 40 |
| 4.4 | Deslocamento no Condutor com $V_w = 0,5\text{m/s}$ e $T = 10\%$ UTS. | 41 |
| 4.5 | Deslocamento no Condutor com $V_w = 2,5\text{m/s}$ e $T = 10\%$ UTS. | 41 |
| 4.6 | Deslocamento no Condutor com $V_w = 4,5\text{m/s}$ e $T = 10\%$ UTS. | 42 |
| 4.7 | Deslocamento no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T = 10\%$ UTS. | 42 |
| 4.8 | Deslocamento no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 20\%$ UTS. | 43 |
| 4.9 | Deslocamento no Condutor com $V_w = 0,5\text{m/s}$ e $T = 20\%$ UTS. | 44 |
| 4.10 | Deslocamento no Condutor com $V_w = 2,5\text{m/s}$ e $T = 20\%$ UTS. | 44 |
| 4.11 | Deslocamento no Condutor com $V_w = 4,5\text{m/s}$ e $T = 20\%$ UTS. | 45 |
| 4.12 | Deslocamento no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T = 20\%$ UTS. | 45 |
| 4.13 | Deslocamento no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 30\%$ UTS. | 46 |
| 4.14 | Deslocamento no Condutor com $V_w = 0,5\text{m/s}$ e $T = 30\%$ UTS. | 47 |
| 4.15 | Deslocamento no Condutor com $V_w = 2,5\text{m/s}$ e $T = 30\%$ UTS. | 47 |
| 4.16 | Deslocamento no Condutor com $V_w = 4,5\text{m/s}$ e $T = 30\%$ UTS. | 48 |
| 4.17 | Deslocamento no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T = 30\%$ UTS. | 58 |
| 4.18 | Tensão Normal no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 10\%$ UTS. | 49 |
| 4.19 | Tensão Normal no Condutor com $V_w = 0,5\text{m/s}$ e $T = 10\%$ UTS. | 50 |
| 4.20 | Tensão Normal no Condutor com $V_w = 2,5\text{m/s}$ e $T = 10\%$ UTS. | 50 |
| 4.21 | Tensão Normal no Condutor com $V_w = 4,5\text{m/s}$ e $T = 10\%$ UTS. | 51 |
| 4.22 | Tensão Normal no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T = 10\%$ UTS. | 51 |
| 4.23 | Tensão Normal no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 20\%$ UTS. | 52 |
| 4.24 | Tensão Normal no Condutor com $V_w = 0,5\text{m/s}$ e $T = 20\%$ UTS. | 53 |
| 4.25 | Tensão Normal no Condutor com $V_w = 2,5\text{m/s}$ e $T = 20\%$ UTS. | 53 |
| 4.26 | Tensão Normal no Condutor com $V_w = 4,5\text{m/s}$ e $T = 20\%$ UTS. | 54 |
| 4.27 | Tensão Normal no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T = 20\%$ UTS. | 54 |
| 4.28 | Tensão Normal no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 30\%$ UTS. | 55 |
| 4.29 | Tensão Normal no Condutor com $V_w = 0,5\text{m/s}$ e $T = 30\%$ UTS. | 56 |
| 4.30 | Tensão Normal no Condutor com $V_w = 2,5\text{m/s}$ e $T = 30\%$ UTS. | 56 |
| 4.31 | Tensão Normal no Condutor com $V_w = 4,5\text{m/s}$ e $T = 30\%$ UTS. | 57 |
| 4.32 | Tensão Normal no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T = 30\%$ UTS. | 57 |
| 4.33 | Deslocamento do Condutor Considerando o Efeito da Carga de Tração e o Vento.... | 58 |
| 4.34 | Tensões Normais no Núcleo em Função da Velocidade do Vento. | 59 |
| 4.35 | Tensões Normais na 1ª Camada em Função da Velocidade do Vento. | 60 |
| 4.36 | Tensões Normais na 2ª Camada em Função da Velocidade do Vento. | 60 |

| | | |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.37 | Tensões Normais na 3ª Camada em Função da Velocidade do Vento..... | 60 |
| 4.38 | Tensões Normais na 4ª Camada em Função da Velocidade do Vento..... | 61 |
| 4.39 | Variação Média da Tensão Normal a Cada Aumento de 0,5 m/s na Velocidade do Vento..... | 62 |
| 4.40 | Tensão Média no Condutor | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Propriedade de Referência de um Condutor CAL em 20°C (Kang, Strobach e Franck, 2013). | 10 |
| 2.2 | Condições Climáticas da Simulação Estacionária (Kang, Strobach e Franck, 2013). | 10 |
| 2.3 | Resultados das Deformações e Tensões Medidas (Costa et al., 2020). | 17 |
| 3.1 | Determinação do ângulo de entrelaçamento do condutor Tern..... | 33 |
| 3.2 | Características da geometria do cabo condutor (1x61) (Kang, Strobach e Franck, 2013). | 33 |
| 3.3 | Propriedades mecânicas do condutor (Lalonde, Guilbault e Legeron, 2016). | 33 |
| 3.4 | Simulações termomecânicas. | 36 |
| 4.1 | Deslocamento na Extremidade do Condutor | 58 |
| 4.2 | Desvio Padrão das Tensões Médias das Camadas do Condutor | 63 |

LISTA DE TERMOS E SIGLAS

| | |
|------------|--------------------------------------|
| α | Coeficiente de Dilatação Térmica |
| α | Ângulo de Entrelaçamento |
| δ | Variação |
| ϵ | Deformação |
| γ | Posição Angular |
| λ | Condutividade Térmica Radial Efetiva |
| σ | Tensão |
| c | Fio do Núcleo (core) |
| D | Diâmetro |
| E | Módulo de Elasticidade |
| F | Força |
| I | Momento de Inércia |
| i | Número de Fios na Camada |
| I_f | Corrente Final |
| I_i | Corrente Inicial |
| I_{ccc} | Capacidade de Corrente Momentânea |
| k | Curvatura |

| | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|
| m | Número de Camadas que possui o condutor |
| n | Número de Fios da Camada |
| P | Potência |
| r | Raio |
| S | Radiação Solar |
| T | Tração |
| T_{lim} | Temperatura Limite |
| t_{lim} | Tempo para atingir a Temperatura Limite |
| T_{viz} | Temperatura da Vizinhança |
| V_w | Velocidade do Vento |
| Y_b | Amplitude de Deslocamento |
| CAA | Cabo de Alumínio com Alma de Aço |
| CAL | Cabos de Alumínio Liga |
| DOF | Graus de Liberdade |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| LABCabos | Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia |
| LPC | Último Ponto de Contato |
| max | Máximo |
| min | Mínimo |
| UnB | Universidade de Brasília |
| UTS | Limite de Resistência à Tração |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O desenvolvimento e o acesso a energia elétrica foram um grande marco para o desenvolvimento social, tecnológico e de produção no final do século passado. A eletricidade, atualmente, é primordial e vital às pessoas e empresas e sua importância tende a aumentar. Segundo a última nota técnica de Projeção da Demanda de Energia Elétrica publicada em 2017 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estima-se um aumento percentual de consumo nacional de energia elétrica de 3,6 % ao ano entre 2016 e 2026, sendo a classe "outros" com o maior crescimento, cerca de 4% ao ano, seguida pela classe residencial e comercial, 3,9% ao ano, e a classe industrial, 2,9 % ao ano.

Esse significativo aumento da demanda exige das empresas concessionárias de energia um foco na confiabilidade e custos dos equipamentos, linhas de transmissão e instalações envolvidas. O componente mais importante de uma linha de transmissão é o cabo condutor, o qual pode representar até 40 % do custo no investimento de capital da rede, sendo que ele deve sustentar cargas mecânicas e elétricas ao longo de sua vida útil que pode ser superior a 50 anos (Maduro-Abreu et al., 2010). Por ser o elemento mais relevante, sua falha inesperada causa consequências sociais e financeiras muito grandes. Por exemplo, em 2001, uma falha por fadiga de uma linha de transmissão de alta tensão em São Paulo deixou cerca de 67 milhões de indivíduos sem energia elétrica durante muitas horas na região sudeste. Com isso, evidencia-se a necessidade de um profundo conhecimento no comportamento de todos os elementos da rede de fornecimento de energia elétrica, principalmente dos cabos condutores.

Atualmente, sabe-se que os condutores sofrem três tipos de cargas mecânicas na região do grampo de suspensão: uma considerável carga estática de tração, que usualmente é cerca de 20% do Limite de Resistência à Tração (UTS), uma carga de flexão cíclica e variante causada pelo ambiente, especificamente pela força do vento atuante, e uma força de aperto causada pelos parafusos do grampo. Por sua vez, o comportamento mecânico do condutor é bastante complexo devido a sua formação geométrica, onde os fios são dispostos em camadas

helicoidais, com sentidos de giro alternados em relação ao fio central do condutor, criando zonas de contato entre os fios. O contato entre os fios influencia fortemente o comportamento mecânico do condutor, bem como as tensões nos fios. Uma vez que haja gradiente de temperatura no condutor causando deformações nos fios, haverá surgimento de tensões mecânicas.

No entanto, a partir da revisão bibliográfica realizada durante a elaboração deste trabalho, não foram identificadas pesquisas ou trabalhos técnicos sobre esse assunto. As pesquisas sobre a vida à fadiga do condutor sob o efeito de temperatura são bastante recentes, sendo que duas dessas pesquisas pioneiras, com caráter essencialmente experimental, foram desenvolvidas no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da Universidade de Brasília. Nesse contexto, compreender melhor as tensões mecânicas no condutor sob efeito de temperatura é de grande serventia para o estudo da fadiga dos condutores sob efeito da temperatura.

1.2 Apresentação do Problema

A criação de modelos computacionais para simulações numéricas com elementos finitos é muito importante para contribuição científica e desenvolvimento de produtos. Atualmente, diversos modelos de cabos condutores já foram elaborados para análise do comportamento mecânico e análise de tensões, usando, em sua maioria, elementos sólidos para discretização da malha. Como o trabalho realizado por Kalentev et al. (2017), em que elaboraram um modelo com elementos sólidos hexaedros de 20 nós para analisar o estado de tensão do condutor sob tração e torção. Essas análises são geralmente muito custosas do ponto de vista computacional, uma vez que requerem uma grande quantidade de elementos para discretizar os fios que constituem o cabo, bem como a utilização de elementos de contato para representar o contato entre os fios.

Uma alternativa que reduz significativamente os gastos computacionais, número de elementos e graus de liberdade, é o uso de elementos de viga. Lalonde, Guilbault e Legeron (2016) geraram um modelo com elementos de viga para analisar a fadiga em quatro condutores de alumínio reforçado com aço. Observa-se que esses trabalhos citados focaram seus estudos na validação da modelagem e visando a realização de análises para quantificar as tensões nos fios do condutor. Essas análises foram realizadas considerando somente as cargas de origem mecânica no condutor, desprezando-se o efeito da temperatura.

Em qualquer objeto sólido, suas três dimensões variam de modo diretamente proporcional a temperatura, sendo seu nível de deformação dependente do coeficiente de dilatação

do material. No entanto, caso existam limitações para a dilatação térmica serão introduzidas ao objeto tensões mecânicas na direção da restrição. Por exemplo, isso ocorre em uma viga biengastada, que não pode ter deformações na direção axial (Callister e Soares, 2008).

Em um condutor, as diferenças mais importantes nos métodos de cálculo da tensão de curvatura envolvem a modelagem do alongamento do condutor devido a mudanças na tensão, temperatura e tempo. Pesquisas que levam em consideração o efeito mecânico da temperatura nos condutores são notavelmente recentes. Duas pesquisas pioneiras sobre a vida à fadiga sob temperatura foram desenvolvidas no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da Universidade de Brasília. No primeiro trabalho, desenvolvido por Costa et al. (2020), avaliaram a influência da temperatura na resistência à fadiga de um condutor de alumínio, CAL Orchid 636MCM feito com liga de alumínio AA1350-H19, produzindo um dispositivo de controle para atingir temperaturas como aquelas sofridas por condutores elétricos de alta tensão durante sua vida útil, cerca de 75°C. Seus testes experimentais verificaram que a vida do condutor foi reduzida em média em 10% considerando a primeira falha e 30% considerando a quarta falha.

Na segunda pesquisa, realizada por Rodrigues (2021), foi utilizado o mesmo dispositivo de controle de temperatura, mas utilizando um condutor de alumínio diferente, feito com alumínio liga (CAL) 6201-T81. Constatou-se que a 75°C a vida em fadiga e a dureza do condutor são praticamente as mesmas que em temperatura ambiente, com diferença máxima de 5% no ciclo de vida. Já nos testes feitos a 150°C, houve um aumento de 600.000 ciclos de vida e de 13HV na dureza em comparação com os dados a temperatura ambiente.

Verifica-se que os estudos citados anteriormente são puramente experimentais, sendo interessante à comunidade acadêmica investigar como variam as tensões e deslocamentos nos fios devido a influência da temperatura. Devido a complexidade para a realização de experimentos com esse propósito, tais investigações devem ser realizadas através de simulações computacionais.

1.3 Objetivos do Trabalho

1.3.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise de tensões de um condutor de alumínio liga sob tração, considerando um gradiente interno radial de temperatura, a fim de averiguar o efeito da temperatura no comportamento mecânico do condutor. Isso foi feito por meio do Método dos Elementos Finitos empregando-se o software Ansys APDL, considerando temperaturas correspondentes a diferentes condições ambientais e de

operação do condutor para três diferentes cargas de esticamento do condutor.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Complementar o código de modelagem numérica desenvolvido por Pedrosa (2021) e JUNIOR (2021) considerando o efeito da temperatura;
- Analisar mecanicamente o condutor, avaliando as tensões e deslocamentos, considerando três diferentes cargas de esticamento e o efeito da temperatura para diferentes condições ambientais e de operação do condutor para os gradientes radiais de temperatura obtidos pelas análises térmicas realizadas por Kang, Strobach e Franck (2013).

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O capítulo 1 introduz o trabalho e apresenta seus objetivos e organização. O capítulo 2 possui uma revisão bibliográfica a respeito da análise térmica e mecânica em geral e específica de condutores e da modelagem numérica da geometria do cabo. O capítulo 3 apresenta a descrição da metodologia, procedimentos e dados usados para realizar a análise de tensões do condutor sob efeito de temperatura. O capítulo 4 apresenta os resultados de deslocamento e tensões normais, e os analisa. Por último, o capítulo 5 conclui o trabalho.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Efeitos Térmicos no Condutor

A temperatura de um condutor depende da intensidade da corrente elétrica momentânea, das características elétricas do condutor e de parâmetros climáticos, tais como vento e sol. Durante o projeto de uma linha de transmissão é determinada a temperatura aceitável do condutor, conforme a Norma 5422/1985, baseado na distância mínima entre o solo e o condutor (ABNT, 1995). No entanto, para qualquer linha de transmissão são determinados dois limites térmicos. A temperatura normal aceitável, que especifica o fluxo de potência máximo permitido para condições normais, é um valor conservador, de modo que não permita que os fios sofram recozimento ao longo de sua vida e danos prematuros nos conectores. E há uma temperatura emergencial (mais alta), que indica o fluxo de potência máximo após uma contingência do sistema, que possui tempo limitado. Essa temperatura permite que haja reconzimento e ocasiona em uma dilatação considerável do cabo condutor. Ou seja, quando a temperatura do condutor se eleva, há dilatação e aumento da flecha, se aproximando do solo (CIGRE, 2017).

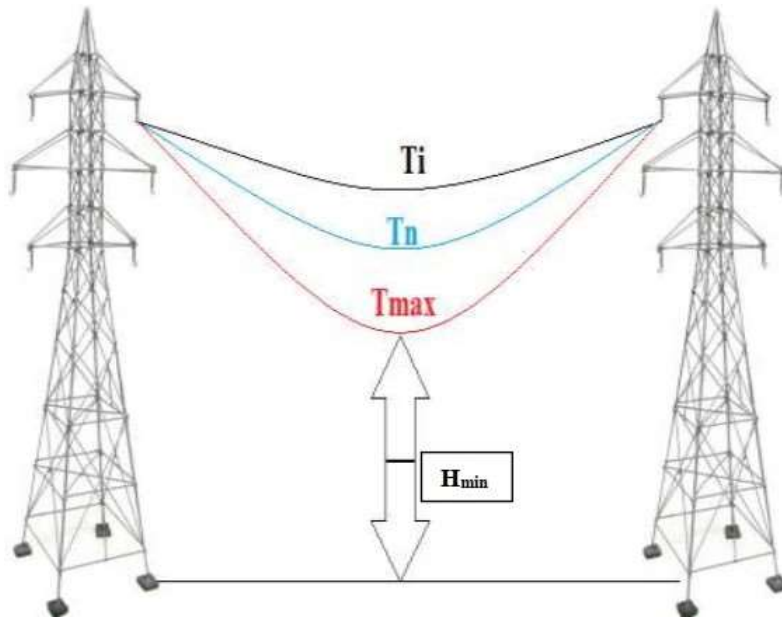


Figura 2.1: Flecha Máxima Aceitável em Linha de Transmissão (Rodrigues, 2021).

O fato é ilustrado na figura 2.1, em que temperatura inicial (T_i) é a temperatura no condutor sem passagem da corrente elétrica, a temperatura de longa duração (T_n) é a temperatura aceitável no condutor com passagem de corrente elétrica de longas durações e a temperatura máxima (T_{max}) representa a temperatura aceitável em curta duração (picos e horários de maior demanda) no condutor para que permaneça a distância mínima tolerável (H_{min}) entre o condutor e o solo (Rodrigues, 2021). Essa distância mínima depende da tensão entre as fases da linha e da natureza da região. Por exemplo, para linhas de transmissão com tensão entre as fases inferior ou igual a 87kV e que atravessam rodovias, ruas ou avenidas, a distância mínima tolerável é de 8 metros.

Após a definição da temperatura de projeto do condutor, a ampacidade, corrente máxima de um condutor, pode ser especificada, com base princípio do balanço térmico do cabo, conforme a Norma CIGRE WG 22-12, 2002 (CIGRE, 2002). Um regime estacionário ocorre quando o condutor está em condições normais de operação, isto é, a corrente elétrica se mantém constante, não havendo variações significantes de temperatura. Nesse regime, o balanço térmico é dado pela equação 2.7 (CIGRE, 2002).

$$P_J + P_M + P_S + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (2.7)$$

onde

P_J = aquecimento por Efeito Joule

P_M = aquecimento por magnetismo

P_S = aquecimento solar

P_i = aquecimento por efeito Corona

P_c = Resfriamento convectivo

P_r = Resfriamento por radiação

P_w = Resfriamento por evaporação

Os ganhos de calor devido a passagem de corrente elétrica são os efeitos Joule e magnético. O efeito Joule se refere ao aquecimento do condutor devido a resistência a passagem de corrente. Logo, seu ganho de calor é proporcional a corrente efetiva, a resistência por metro e a sua temperatura média de trabalho. Já o efeito magnético se refere ao ganho de calor pelo fluxo magnético cíclico, que gera aquecimento por corrente parasita, histerese e viscosidade magnética. Esse fenômeno apenas ocorre quando há corrente alternada e geralmente seu efeito é negligenciado em condutores não-ferrosos.

Para calcular o valor do efeito Joule, deve-se estimar a temperatura média de trabalho, T_{av} . Para isso, é importante levar em conta a distribuição de temperatura dentro do condutor. Assumindo uma pequena geração de calor no núcleo de aço (naqueles condutores que possuem esse núcleo) e uma uniforme geração interna de calor, a distribuição de temperatura é dada pela equação 2.8 (CIGRE, 2002).

$$2T_{av} = T_c - T_s = \frac{P_T}{2\pi\lambda} \left[\frac{1}{2} - \frac{D_2^2}{D^2 - D_2^2} (\ln D / D_2) \right] \quad (2.8)$$

onde

P_T = calor total ganho por unidade de comprimento

D = diâmetro externo do condutor

D_2 = diâmetro do fio do núcleo

T_{av} = temperatura média

T_s = temperatura da superfície

T_c = temperatura do núcleo

λ = condutividade térmica radial efetiva

O aquecimento solar depende de diversas variáveis, tais como o diâmetro do fio condutor, a absorvidade da sua superfície e de diversos parâmetros relacionados a posição de incidência do sol. Existem diversos métodos de cálculo para o ganho de calor, sendo aquele que considera todos esses parâmetros consideravelmente complexos. Um método simplificado considera a radiação global solar, ignorando todas as variáveis de posicionamento do condutor em relação ao sol.

O Efeito Corona é definido pela ionização do ar redor de um condutor elétrico,

ocasionando um estalo luminoso e rumoroso. Ele ocorre quando há um conjunto de voltagens no mesmo condutor e um campo elétrico ou gradiente de tensão surge na sua superfície. Se esse gradiente estiver acima do limite de gradiente de tensão do cabo, as descargas do efeito coronase iniciam (CIGRE, 2017). Esse efeito causa diversas perdas de potência na rede, sendo que o aquecimento é significativo apenas quando há grandes gradientes de voltagem com a presença de chuva e ventos fortes. Logo, por ser um efeito sazonal, pode ser desconsiderado do balanço térmico para um regime estacionário.

No que se refere as perdas de calor, a mais significativa é aquela por convecção. A superfície quente do condutor aquece o ar ao redor dele e a sua densidade diminui. Com menor densidade, o ar eleva-se de altura por convecção natural (quando $V=0$) ou é levado por convecção forçada. Em ambos os casos, o ar mais gelado substitui o mais quente, resfriando o condutor. Basicamente, o nível de resfriamento depende da diferença de temperatura do condutor e do ar, do seu número de Nusselt e da condutividade térmica do ar.

O efeito de resfriamento por radiação ocorre devido à emissão de radiação da superfície do condutor. Ela geralmente representa uma pequena fração do valor total de resfriamento, especialmente se ocorrer convecção. Além da emissividade, seu valor depende do diâmetro e da temperatura do condutor, da temperatura do ambiente e da constante de Stefan-Boltzmann.

Por fim, o resfriamento por evaporação não se altera substancialmente pela umidade do ar e por gotículas de água, mas ocorre caso o condutor esteja molhado. Normalmente, o efeito evaporativo é ignorado e consideravelmente pequeno. A figura 2.2 ilustra o balanço térmico no cabo condutor.

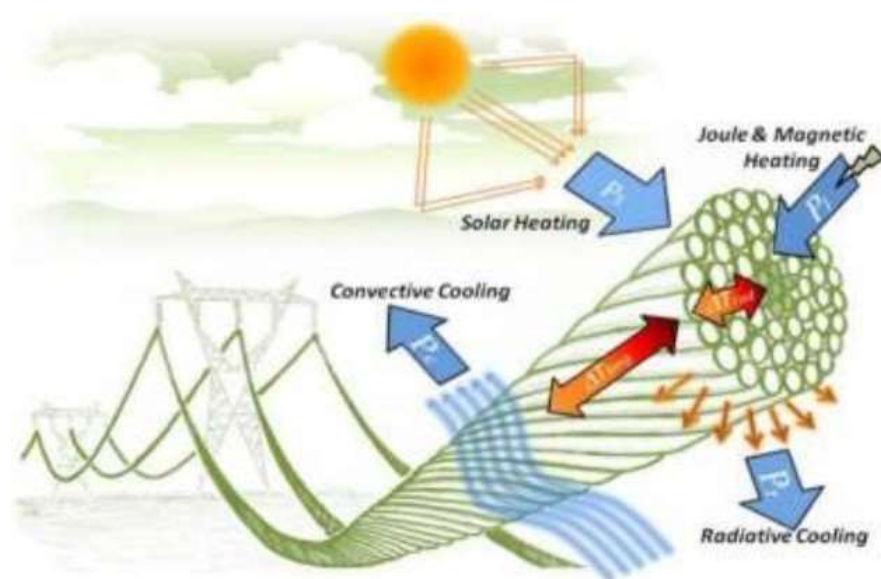


Figura 2.2: Princípio do Balanço Térmico (CIGRE, 2014).

2.1.1 Análise Térmica Realizada por Kang, Strobach e Franck (2013)

Um condutor de liga de alumínio (CAL) é limitado para operações com baixas temperaturas de trabalho, pois sua recristalização inicia-se em 100°C (Kiesling et al., 2003) . Por causa disso e pelo fato de que o material desse condutor possuir alto coeficiente de expansão térmica e baixo peso específico, que o torna mais vulnerável a flexão e vibração, sua temperatura limite T_{lim} é 80°C (Kang, Strobach e Franck, 2013) . O projeto de uma linha de transmissão leva T_{lim} em conta. No entanto, um condutor não possui uma temperatura constante em toda sua seção transversal, com isso, há possibilidade de apenas alguns fios atingirem o limite.

Na análise térmica realizada por Kang, Strobach e Franck (2013) foram feitas simulações com diferentes condições ambientais e avaliada a distribuição de temperatura ao longo do raio do condutor. Além de executar análise em regime estacionário e transiente. As propriedades do condutor CAL a 20°C estão Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Propriedade de Referência de um Condutor CAL em 20°C (Kang, Strobach e Franck, 2013).

| Propriedades | Valores |
|---------------------------------------------|---------------------------|
| Diâmetro, D | 30.51 (mm) |
| DC Resistividade, ρ | 32.7 (nΩm) |
| Densidade, γ | 2703 (kg/m ³) |
| Capacidade Térmica, c | 909 (J/kgK) |
| Absorvidade, α | 0.5 |
| Emissividade, ε | 0.5 |
| Condutividade térmica radial efetiva, k_r | 1.23 (W/mK) |

No balanço de energia, equação 2.8 , o aquecimento por magnetismo e efeito Corona e o resfriamento evaporativo podem ser descartados. Isso demonstra que as condições ambientais são as mais relevantes nessa análise. Como elas são mutáveis, Kang, Strobach e Franck (2013) adotaram três níveis de temperatura ambiental, T_a , para inverno, intermediário e verão. Além disso, em seus testes, a velocidade do vento V_w é perpendicular ao condutor e a radiação solar S é aplicada em volta de todo o perímetro do mesmo, sendo que para ambas também são adotados três níveis de intensidade.

Tabela 2.2: Condições Climáticas da Simulação Estacionária (Kang, Strobach e Franck, 2013).

| Condição Climática | Parâmetros | | |
|--------------------|-------------------|-------------|-------------|
| | $T_a [^{\circ}C]$ | $V_w [m/s]$ | $S [W/m^2]$ |
| T_a variante | 10 | 0.5 | 900 |
| | 20 | | |
| | 40 | | |
| V_w variante | 10 | 0,5 | 900 |
| | | 2.5 | |
| | | 4.5 | |
| S variante | 10 | 0,5 | 500 |
| | | | 900 |
| | | | 1200 |

A distribuição de temperatura é dada pela equação 2.9. Observa-se que essa equação é a equação 2.1 mais a parcela de contribuição do efeito Joule, onde P_j é o ganho por efeito Joule por metro. Considerando que T possui um valor finito quando o raio, r , é nulo, as condições de contorno são dadas em 2.10.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{4P_j}{k_r \pi D^2} = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{dT}{dr}_{r=0} = 0 \quad e \quad \frac{dT}{dr}_{r=D/2} = \frac{f(T_s, T_a, P_s)}{-k_r} \quad (2.10)$$

Para as simulações transientes, qualquer diferença entre o ganho e a perda de calor mudará a temperatura do condutor. Isso pode ser expressões pela equação 2.11 ,

$$mc \frac{dT}{dt} = \{P_j + P_s\} - \{P_c + P_R\} \quad (2.11)$$

onde $m = \gamma \pi D^2 / 4$ (kg/m).

Para as simulações com o modelo de uma dimensão realizadas, fez-se uso do software COMSOL Multiphysics. O condutor foi simplificado como um cilindro homogêneo com comprimento infinito com $A = 550mm^2$. Nas simulações estacionárias, cada condição climática é variada para analisar sua influência no condutor. Em adição à Tabela 2.2, em todas situações, a capacidade de corrente momentânea, I_{ccc} , é calculada. Além disso, o modelo de uma dimensão tem temperatura máxima no núcleo do condutor e ampacidade equivalente àquele em $T_c = T_{lim} = 80^{\circ}C$.

Dentre os modelos 0D existentes (IEEE, IEC e CIGRE), apenas CIGRE utiliza um modelo simplificado de $T(r)$, Equação 2.8, e a ampacidade é dada pela corrente em

$T_{av} = T_{lim}$. As outras referências ignoram $T(r)$ e consideram a ampacidade como a corrente em $T_s = T_{lim}$ (Kang, Strobach e Franck, 2013).

Já nas simulações transientes, são usadas as condições climáticas de inverno, ou seja, $T_a = 10^\circ\text{C}$ e ampacidade I_{ccc} equivalente a essa temperatura é tida como referência. O intervalo de tempo dessa análise, t_{lim} , é o tempo decorrido para elevar a temperatura até T_{lim} . Nessas simulações, são testados seis "planos" de mudança gradual da corrente. Elas iniciam com $I_i = 30\%I_{ccc}$ ou $I_i = 60\%I_{ccc}$ e finalizam com $I_f = 120\%I_{ccc}$, $I_f = 150\%I_{ccc}$ ou $I_f = 200\%I_{ccc}$.

Como primeiro resultado, dentro do regime estacionário, tem-se a figura 2.5, que exibe as distribuições de temperatura para diferentes condições climáticas assumindo $T_c = T_{lim} = 80^\circ\text{C}$. Como cada parâmetro climático influencia no balanço de energia, $T(r)$ e ampacidade variam.

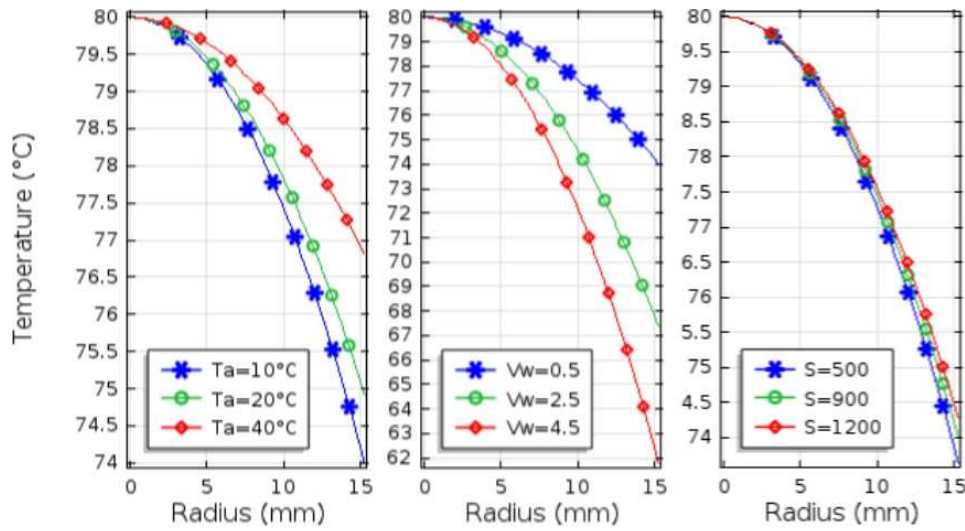


Figura 2.3: Comparativo de $T(r)$ para Diferentes T_a, V_w e S quando $T_c = T_{lim} = 80^\circ\text{C}$ (Kang, Strobach e Franck, 2013).

Primeiramente, no gráfico da esquerda, nota-se que menores T_a geram gradientes de temperatura maiores, pois as perdas por convecção e radiação aumentam com a diminuição da temperatura ambiente. Para equilibrar o balanço térmico, a ampacidade precisa aumentar para elevar o ganho de energia térmica por efeito Joule.

No que se refere à análise da velocidade do vento, gráfico central, maiores velocidades reduzem significativamente a temperatura da superfície e geram grandes valores de $T(r)$. Isso ocorre, pois P_c depende fortemente de V_w e, consequentemente, V_w é o fator mais influente entre os três avaliados.

A respeito da radiação solar, sua redução diminui o ganho de calor P_s , então, quando os outros parâmetros se mantêm constantes, P_j precisa elevar-se para manter o equilíbrio. Em comparação às outras variáveis avaliadas, a radiação solar S praticamente não interfere em

$T(r)$.

Outro resultado muito importante está representado na Figura 2.4. A fim de analisar a influência da ampacidade superestimada, é apresentada a distribuição de temperatura $T(r)$ para o modelo 0D IEEE. Nessa análise, obteve-se uma temperatura máxima no núcleo de $T_c = 105^\circ\text{C}$ quando $T_a = 10^\circ\text{C}$, $V_w = 4,5 \text{ m/s}$ e $S = 900 \text{ W/m}^2$. Segundo Kang, Strobach e Franck (2013), essa condição ambiental ocorre com bastante frequência na Suíça e pode decorrer um grande período de tempo, fato que pode reduzir a resistência mecânica do condutor, já que a exposição do alumínio a temperaturas elevadas por mais de 100 horas reduz para 20% do valor inicial, enquanto que acima de 1000 horas o valor da resistência é reduzido para 40% do valor inicial.

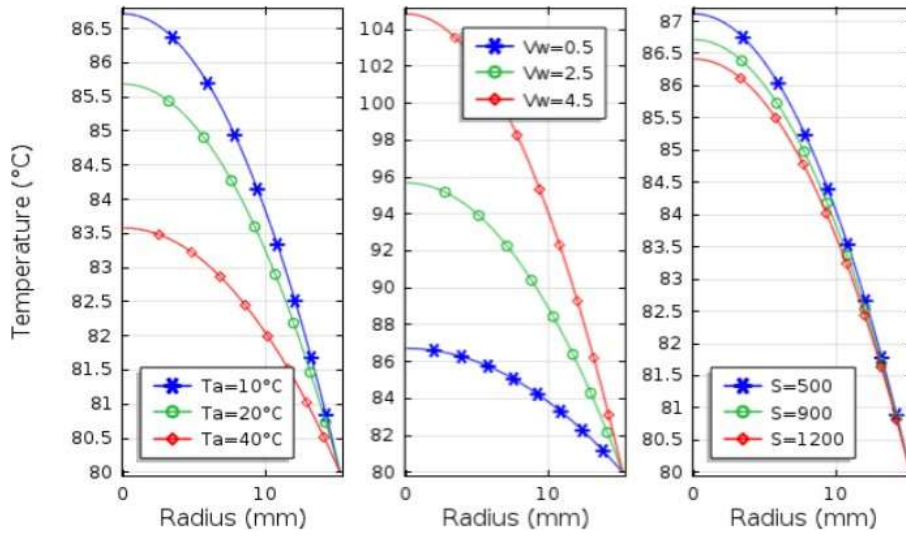


Figura 2.4: Comparativo de $T(r)$ para Diferentes T_a, V_w e S quando $T_s = T_{lim} = 80^\circ\text{C}$ (Kang, Strobach e Franck, 2013).

Quanto aos resultados da análise transiente, primeiramente foi avaliada a influência da corrente inicial e final na temperatura do núcleo e no tempo para atingir a temperatura limite, conforme figura 2.5. Qualitativamente, quanto maior a corrente inicial menor a duração do aquecimento, ou seja, menores t_{lim} . Além disso, o gradiente de temperatura com o tempo é maior para correntes finais maiores.

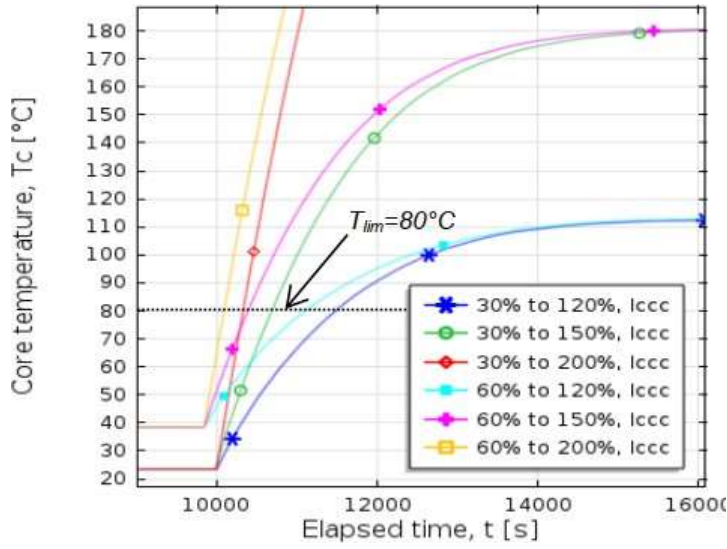


Figura 2.5: Variação da Temperatura do Núcleo com o Tempo (Kang, Strobach e Franck, 2013).

A variação da corrente inicial possui menor efeito na distribuição de temperatura do que a corrente final, conforme figura 2.6 , que compara os dois casos com $I_f = 2, 0I_{ccc}$. Isso ocorre, pois, o aquecimento por efeito Joule não é grande suficiente em comparação com o fluxo de calor radial para justificar o aquecimento adiabático completo.

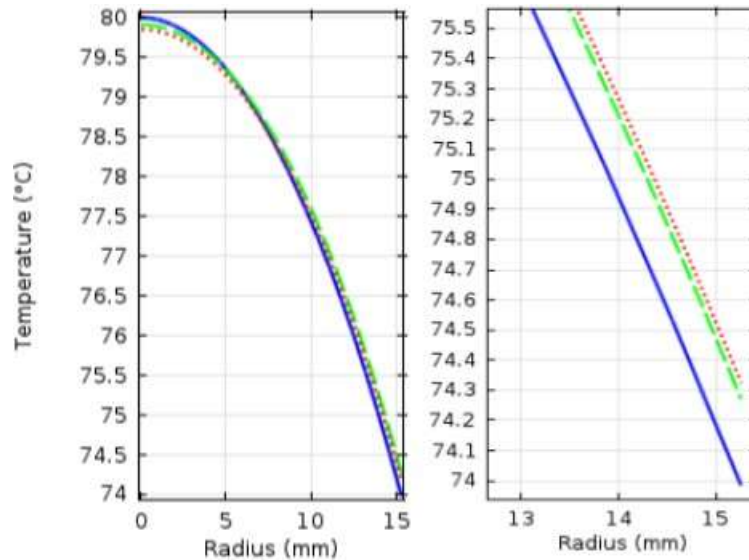


Figura 2.6: Comparação de $T(r)$ para os Casos com $I_f = 2, 0I_{ccc}$ (Kang, Strobach e Franck, 2013).

Já a figura 2.7, compara os três casos com $I_i = 0, 6I_{ccc}$. Nesse caso, quanto mais alto I_f , a taxa de aumento da temperatura diminui. Em outras palavras, o tempo de

perda de calor para o meio ambiente é reduzido e o processo torna-se mais adiabático. Portanto, a distribuição momentânea de temperatura não é fortemente alterada pela forma da distribuição estacionária de temperatura para temperaturas finais mais altas.

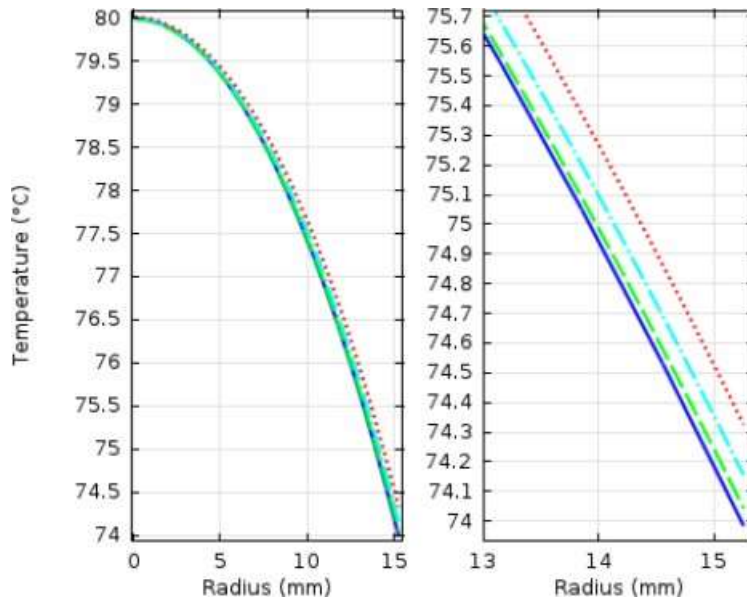


Figura 2.7: Comparação de $T(r)$ para os Casos com $I_i = 0, 6I_{ccc}$ (Kang, Strobach e Franck, 2013).

2.2 Efeito da Temperatura Sob Comportamento Mecânico

Nesse capítulo serão abordadas as deformações e tensões causadas no material devido à um gradiente de temperatura. Além disso, também será discutido posteriormente o comportamento em fadiga de um condutor de alumínio quando submetido à uma temperatura próxima a T_{lim} .

2.2.1 Deformações Térmicas

De modo geral, é sabido que um material sofre deformações conforme a temperatura varia. Ele se contrai quando a temperatura diminui e se dilata quando ela aumenta. Em um projeto de engenharia, as condições térmicas são de extrema importância no projeto e nas análises mecânicas, visto que uma deformação excessiva e distorções não previstas podem deteriorar uma peça (Ansys, 2020).

Em uma análise de deformações térmicas, não é discutido o modo de transferência de calor ou como a temperatura varia em certas condições. Nessa análise, as temperaturas são

dadas do problema e objetivo é obter as deformações do domínio . Um ponto importante é que não existe tensão térmica, somente deformação térmica. Essa deformação é uma das componentes da deformação total de um material, conforme equação 2.12, em que ϵ^{total} é a deformação total, ϵ^m é a deformação mecânica, composta pela deformação elástica e plástica, e ϵ^t é a deformação térmica. ϵ^m é que gera tensões mecânicas no objeto sólido, segundo a Lei de Hooke , equação 2.13.

$$\epsilon^{total} = \epsilon^m + \epsilon^t \quad (2.12)$$

$$\sigma = E\epsilon^m \quad (2.13)$$

A deformação térmica de um objeto sólido depende do seu material, diferentes materiais deformam em distintas quantidades, e da diferença de temperatura entre a atual e àquela de referência (Callister e Soares, 2008). A equação 2.14 mostra a equação da deformação térmica, em que α é o coeficiente de dilatação térmica, T é a temperatura do material e T_{ref} é a temperatura de referência.

$$\epsilon^t = \alpha(T - T_{ref}) \quad (2.14)$$

O coeficiente de dilatação térmica α descreve o quanto um material se deforma com a mudança de temperatura. Com isso, existem três tipos desse coeficiente - linear, superficial e volumétrico - que são utilizados conforme necessidade da análise. Todos esses coeficientes são determinados em laboratório com o auxílio de um equipamento chamado dilatômetro.

A temperatura de referência é escolhida arbitrariamente como aquela em que não há nenhuma deformação térmica no objeto. Ela é a temperatura inicial do objeto, e em outras palavras, caso a temperatura inicial dele seja igual a temperatura ambiente, $T_{ref} = T_{amb} = T_i$.

Essas componentes de deformação podem ser apresentadas na forma de um tensor, equação 2.15. Nele há apenas termos normais, não existindo termos de cisalhamento. Caso o material seja isotrópico: $\epsilon_{xx}^t = \epsilon_{yy}^t = \epsilon_{zz}^t$.

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx}^t & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy}^t & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz}^t \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

A deformação total do objeto variará com as condições térmicas impostas. Um

primeiro caso é quando o objeto está livre para expandir sem nenhuma restrição nas condições térmicas. Nessa situação, nenhuma deformação elástica é gerada e, por consequência, nenhuma tensão mecânica.

Um outro caso é quando o corpo possui restrições de deformação, como condições de contorno ou contato com outros corpos. Por causa dessas restrições, o corpo exercerá uma força externa e, como reação, haverá uma força interna que causará tensão e deformação elástica.

Um último caso principal é quando há diferentes coeficientes de dilatação no corpo. Nessa situação, a deformação térmica não será igual em todas as partes, havendo uma resistência interna, principalmente na região onde há a mudança de coeficiente, causando tensão e deformação elástica.

2.2.2 Comportamento em Fadiga de Condutores sob Efeito da Temperatura

Alguns estudos que envolvem o efeito da temperatura nos condutores já foram feitos, como Havard et al. (1992), Chen et al. (2012) e Armstrong e Southern (2018) que avaliam o envelhecimento térmico, Kopsidas et al. (2010), Abbasi e Aman (2018) e Abbasi et al. (2018) que analisam a curvatura com a tensão. No entanto, há pouquíssimos estudos sobre isso, havendo também somente um estudo sobre o efeito da temperatura na vida em fadiga de um condutor. Esse estudo foi feito por Costa et al. (2020).

Em seu trabalho, Costa et al. (2020) primeiramente descreve a criação de um controlador de aquecimento e o testa e, em seguida, realiza testes experimentais de fadiga utilizando esse controlador. Os testes de fadiga foram feitos em uma bancada de 47 metros de comprimento, utilizando um sistema de aquecimento aberto na região do condutor próxima ao grampo de suspensão, ou seja, somente uma parte pequena do condutor foi aquecida. Esse sistema é indireto com aquecedores cerâmicos infravermelhos, não havendo contato direto com o condutor (Costa et al., 2020).

Uma câmera infravermelha foi utilizada para verificar a irradiação térmica aplicada e se os sensores estavam trabalhando dentro de sua faixa de temperatura permissível. O laboratório possuía $T_{amb} = 21^{\circ}\text{C}$ e os testes foram realizados com $T_s = 75^{\circ}\text{C}$, temperatura limite do condutor usado.

Esse condutor é o CAL Orchid 636MCM feito em alumínio puro, com 37 fios, com cada fio com diâmetro de 3,33 mm. Os testes de fadiga seguiram a recomendação de 62568:2015 IEC (IEC, 2015), com o grampo de suspensão com faixa de aperto entre 14 e 29 mm e UTS de 70 kN.

O teste possui acelerômetros a 89 mm do LPC para controlar a amplitude de desloca-

mento Y_b , a tensão de flexão foi medida usando extensômetros nos três fios condutores superiores no ponto diametralmente oposto do LPC, entre o condutor e a pinça de suspensão e seus valores foram comparados aos calculados pela equação de Poffenberger e Swart, (1965). E, por último, foi usado extensômetros nos sete fios externos que estão diametralmente no último ponto de contato entre o cabo e o grampo, de modo que todos os eventos de quebra foram registrados pelo aquisitor de dados (Costa et al., 2020). Ao todo foram feitos nove testes com três níveis de Y_b .

A tabela 2.3 compara os resultados de deformação e tensão a 75°C e a temperatura ambiente. Nas duas últimas colunas, pode-se observar que não há diferença significativa entre as diferenças relativas observadas nas duas condições de teste, ou seja, os valores máximos observados estão na faixa de 8% para ambos os casos e médias iguais a 4,4% (para os testes realizados à temperatura ambiente) e 3,8% (para os testes realizados a 75°C).

Tabela 2.3: Resultados das Deformações e Tensões Medidas (Costa et al., 2020).

| Y_b (mm) | σ_{PS} (MPa) | ϵ_{exp} (μ Strain) | | $\sigma = E\epsilon_{exp}$ | | $\Delta(\%)$ | |
|------------|---------------------|----------------------------------|-----|----------------------------|------|--------------|-----|
| | | 75 | RT | 75 | RT | 75 | RT |
| 0.87 | 26.80 | 357 | 363 | 25.0 | 25.4 | 6.7 | 5.1 |
| | | 379 | 385 | 26.5 | 27.0 | 1.1 | 0.6 |
| | | 396 | 410 | 27.7 | 28.7 | 3.4 | 7.1 |
| 0.91 | 28.22 | 395 | 371 | 27.7 | 26.0 | 1.8 | 8.0 |
| | | 413 | 393 | 28.9 | 27.5 | 2.4 | 2.6 |
| | | 425 | 398 | 29.7 | 27.9 | 5.2 | 1.2 |
| 1.01 | 31.35 | 435 | 414 | 30.4 | 28.9 | 3.0 | 7.7 |
| | | 482 | 439 | 33.7 | 30.7 | 7.5 | 2.2 |
| | | 485 | 449 | 33.9 | 31.4 | 8.1 | 0.2 |

Tiveram dois critérios de falha para vida em fadiga: número de ciclos até a primeira ruptura e número de ciclos até a quarta ruptura. As figuras 2.8 e 2.9, comparam a curva de fadiga para esses dois casos com a aquela avaliada em temperatura ambiente. À primeira vista, na figura 2.8, os dados apresentados demonstram uma pequena diminuição na vida à fadiga. No entanto, para o critério de quebra de quatro fios, figura 2.9, a vida em fadiga é significativamente reduzida com o efeito da temperatura. Comparando as razões de meia-vidado condutor, vida útil dele é reduzida em média 10% considerando a primeira quebra e 30% considerando a quarta quebra.

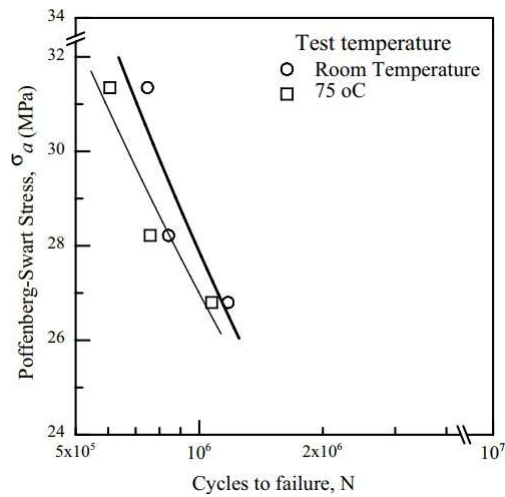


Figura 2.8: Tensão Alternada e Números de Ciclos para Uma Quebra (Costa et al., 2020).

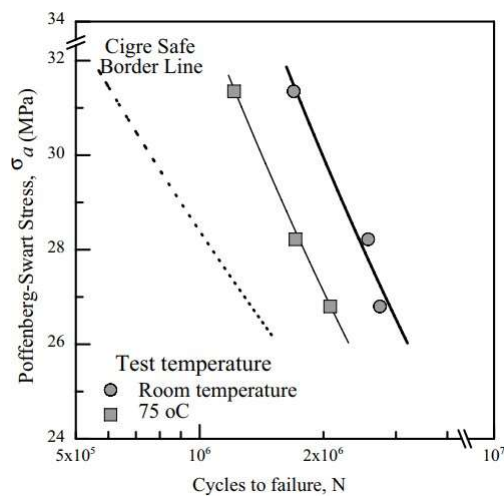


Figura 2.9: Tensão Alternada e Números de Ciclos para Quatro Quebras (Costa et al., 2020).

2.3 Comportamento Mecânico dos Cabos Condutores

Os cabos condutores são expostos a três tipos de esforços. Esforço de tração provocado pela carga de esticamento, esforços alternados de flexão provocados pela vibração eólica e flexão estática na região próxima ao grampo de suspensão devido à sua geometria (BAUMANN e NOVAK, 2017).

O ângulo de hélice dos fios de um cabo condutor provoca cargas de torção e flexão

quando o cabo é tracionado. Esse ângulo é a inclinação dos fios de cada camada em relação ao eixo central do condutor. Quando a tração é aplicada, cada camada diminui o raio e comprime radialmente os fios da camada subjacente, como ilustra a figura 2.12 (BAUMANN e NOVAK, 2017).

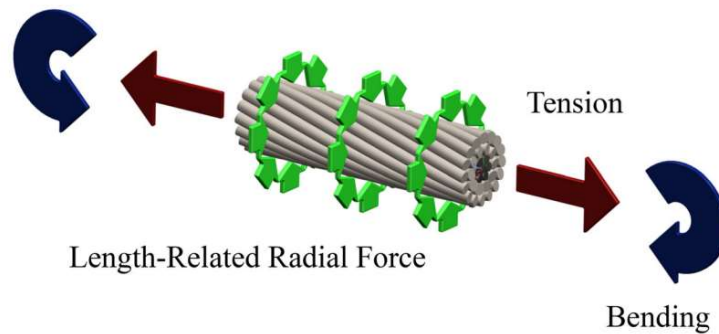


Figura 2.10: Esforços Atuantes em um Condutor sob Tração (BAUMANN e NOVAK, 2017).

Já as cargas alternadas externas causadas pela vibração eólica, provocam um esforço com intensidade diferente em cada fio, fazendo com que eles tendam a se movimentar entre si. Com isso, a força de atrito também deve ser levada em conta, visto que este controla a movimentação relativa dos fios e provoca tensões (Papailiou, 1995; BAUMANN e NOVAK, 2017).

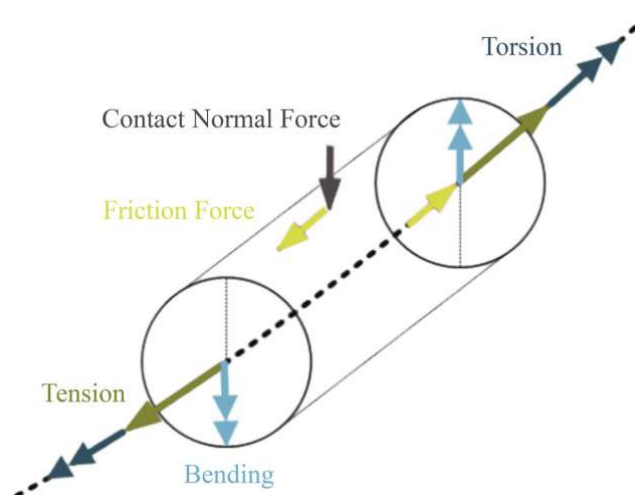


Figura 2.11: Diagrama de Corpo Livre de um Fio do Condutor sob Cargas Alternadas (BAUMANN e NOVAK, 2017).

Todas essas cargas podem gerar falhas mecânicas no condutor. A fadiga é a sua principal causa e é gerada sobretudo pela vibração eólica (Papailiou, 1995). Por isso, existe um dispositivo chamado vibrógrafo que mede as amplitudes de deformação a uma distância de 89 mm do seu ponto de fixação, que é geralmente no grampo de suspensão. A amplitude medida é convertida em tensão de flexão (Poffenberger e Swart, 1965).

Essa conversão toma a rigidez à flexão do condutor como a soma algébrica da rigidez à flexão de cada fio que o compõe, isto é, como se cada um deles fletisse ao redor do seu próprio eixo longitudinal. Essa suposição gera divergências entre as tensões calculadas e reais, principalmente nas camadas internas, em que geralmente ocorrem falhas. Para uma boa aproximação, é importante considerar a rigidez variável e os efeitos do atrito e da curvatura (Papailiou 1995).

A rigidez variável do condutor advém da mudança gradual entre dois extremos : EI_{max} quando não há escorregamento entre fios e EI_{min} quando há escorregamento completo .Essa mudança de rigidez no condutor ocorre pois sua curvatura gera deslizamentos entre os fios.

A rigidez máxima, EI_{max} , ocorre quando todos os fios do condutor atuam juntos como se fossem um único material sólido, não havendo deslizamento entre os pontos de contato. Em outras palavras, o coeficiente de atrito estático é suficientemente grande para resistir ao deslizamento provocado pela curvatura k (JUNIOR, 2021). Com o aumento da curvatura do condutor, a rigidez à flexão reduz progressivamente até atingir EI_{min} , figura 2.12, que ocorre quando todos os fios fletem em torno do próprio eixo, trabalhando de forma independente, podendo haver livre deslizamento entre eles e resistindo somente ao momento de inércia do conjunto de fios. Papailiou (1995) desenvolveu uma equação para cada uma dessas rigidezes.

$$EI_{max} = \sum E_j (I_{oj} + A_j R_j^2 \sin^2 \gamma_j) \quad (2.16)$$

$$EI_{min} = \sum E_j I_{oj} \quad (2.17)$$

Onde E_j , A_j , γ_j e R_j representam o módulo de elasticidade do fio j , área da seção transversal, posição angular e raio da camada correspondente, respectivamente, enquanto I_{oj} é o momento de inércia do fio (em relação ao seu próprio eixo).

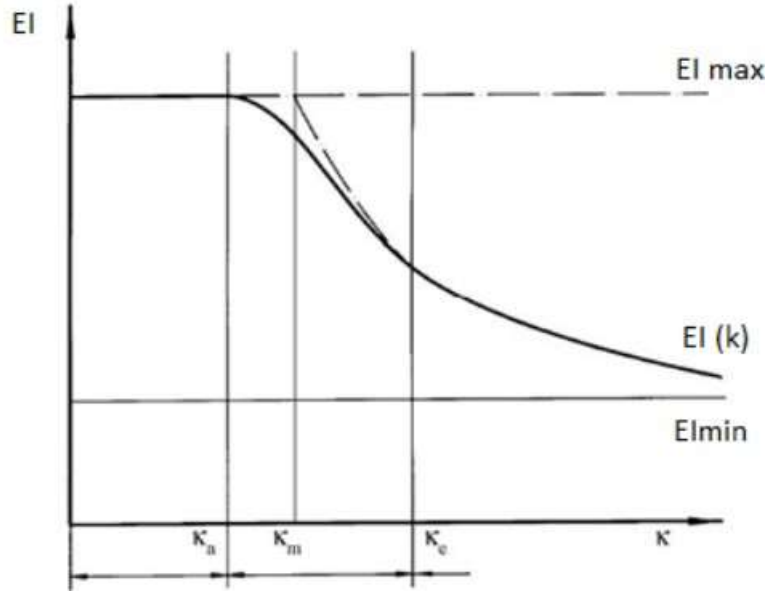


Figura 2.12: Variação da rigidez à flexão (EI) com a curvatura κ (Papailiou, 1995).

Com base nessa formulação, Cardou (2013) elaborou outro equacionamento para as rigidezes à flexão, agora com a hipótese inicial de que o condutor está submetido a uma tração T e é aplicada uma curvatura κ uniforme. Esse equacionamento para um condutor de múltiplas camadas é mostrado nas equações 2.18, 2.19 e 2.20, sendo que $EI_{complementar}$ é a parcela correspondente ao efeito total do atrito estático.

$$EI_{max} = EI_{min} + EI_{complementar} \quad (2.18)$$

$$EI_{min} = \sum_{i=1}^m n_i EI_w \cos \alpha_i + EI_c \quad (2.19)$$

$$EI_{complementar} = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{2} A_i E_i R_i^2 \cos^3 \alpha_i \quad (2.20)$$

Onde c corresponde ao fio do núcleo (core), w corresponde aos fios das camadas, I é o momento de inércia da seção transversal circular dos fios, R é o raio médio da camada, n representa o número de fios da camada, α o ângulo de entrelaçamento e m é o número de camadas que possui o condutor.

2.3.1 Equações Analíticas para um Condutor sob Tração

Cardou (2013) em seu trabalho desenvolveu equações analíticas para determinar as forças e tensões nos fios de um condutor sob tração. Primeiramente, para um condutor em ângulo de entrelaçamento α menor que 20° , a tração T é dada pela equação 2.21, em que

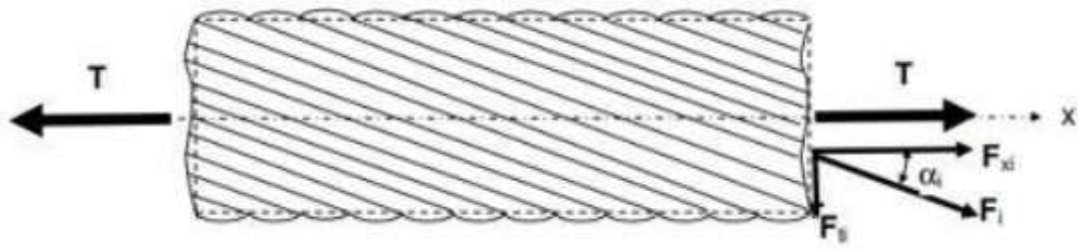


Figura 2.13: Esforços nos Fios para Cabo Submetido a Tração (Cardou, 2013).

F_c é a força normal da seção do fio do núcleo (core), F_i é a força normal em um fio, m é o número de camadas, n_i é o número de fios e α_i é o ângulo de entrelaçamento da camada. A figura 2.13 ilustra as forças atuantes.

$$T = F_c + \sum_{i=1}^m n_i F_i \cos \alpha_i \quad (2.21)$$

Em seguida, Cardou (2013) criando uma relação de compatibilidade entre a deformação do núcleo, ϵ_c , e a deformação dos fios, ϵ_i , e utilizando a Lei de Hooke, estabelece uma associação entre F_c e F_i , equação 2.22 . A partir disso, substituindo a última na primeira, obtém-se outra equação para tração, equação 2.23,

$$\frac{F_c}{E_c A_c} = \frac{F_i}{E_i A_i \cos^2 \alpha_i} \quad (2.22)$$

$$T = \frac{F_c}{E_c A_c} + (E_c A_c + \sum_{i=1}^m E_i A_i \cos^3 \alpha_i) \quad (2.23)$$

onde $E_c A_c$ é a rigidez axial do núcleo e $E_i A_i$ é a rigidez axial dos fios.

A rigidez axial do condutor, EA , é assumida como constante em todo comprimento e é dada pela equação 2.24 . Substituindo essa equação na anterior, encontram-se as forças, F_c e F_i , e tensões, σ_c e σ_i , nos fios de cada camada, equações 2.25 a 2.28 .

$$(EA) = E_c A_c + \sum_{i=1}^m n_i A_i E_i \cos^3 \alpha_i \quad (2.24)$$

$$F_c = \frac{E_c A_c}{EA} T \quad (2.25)$$

$$F_i = \frac{E_i A_i \cos^2 \alpha_i}{EA} T \quad (2.26)$$

$$\sigma_c = \frac{E_c}{EA} T \quad (2.27)$$

$$\sigma_i = \frac{E_i \cos^2 \alpha_1}{EA} T \quad (2.2)$$

2.4 Modelagem de Cabos Condutores

A partir dos avanços tecnológicos nas simulações pelo Método dos Elementos Finitos, tem se tornada possível a modelagem de problemas cada vez mais complexos, como a modelagem de cabos condutores, cujas geometria, estrutura e esforços são complexos, sendo especialmente desafiador a modelagem dos contatos entre fios.

Uma primeira estratégia de modelagem do condutor é o Modelo Contínuo, em que o condutor é um cilindro robusto com material ortotrópico não sendo possível representar os contatos entre fios (BAUMANN e NOVAK, 2017). A segunda estratégia, bastante utilizado, é a discretização de cada fio com elementos sólidos 3D, figura 2.14.

Nessa estratégia, há viabilidade de modelar adequadamente os contatos, em que cada elemento de contato simula todos os tipos de contato, mas tem um custo computacional muito alto, devido aos elevados graus de liberdade, na faixa de milhões de DOF. Logo, esse fato restringe o tamanho do modelo, permitindo somente pequenos comprimentos e poucas camadas no condutor, e restringe também os esforços aplicados em somente tração e torção (BAUMANN e NOVAK, 2017).

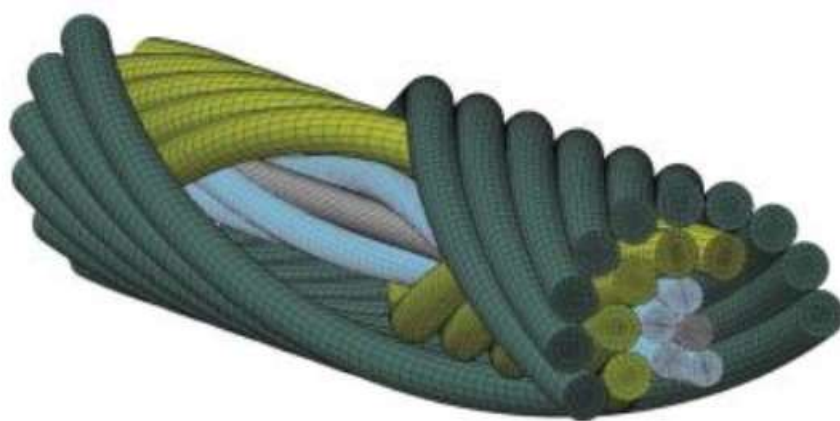


Figura 2.14: Modelo com Elementos Sólidos (BAUMANN e NOVAK, 2017).

MA, GE e ZHANG (2008) desenvolveram um modelo com 6x19 fios utilizando elementos sólidos com 8 nós e relação de contato surface-to-surface, gerando 117.024 elementos e 165.704 nós. Foram feitos ensaios de tração, engastando uma das extremidades e aplicando uma carga axial na outra. Os resultados se mostraram condizentes com aqueles experimentais realizados e foi constatado que as camadas mais

externas sofrem mais deformações que as internas, sendo determinante no movimento relativo entre camadas.

Outro estudo semelhante é aquele realizado por Stanová et al. (2011) , em que foram realizados testes de tração com diferentes níveis de força em um modelo de condutor com trinta e sete fios e 1 metro de comprimento. Foi usado elementos sólidos de 8 nós com dimensão de 1 x 1 mm e contato surface-to-surface, totalizando em 152.347 elementos e 342.947 nós. Os resultados foram condizentes com os experimentais, no entanto, o tempo de processamento foi muito alto. Em um computador com processador AMD Athlon(tm) 64 x2 Dual core Processor 4600 + 2.40 Ghz, levaram-se setenta horas para processar os ensaios no modelo de 1 metro.

Um terceiro trabalho realizado foi desenvolvido por Wu (2014). Ele desenvolveu três modelos de cabo para ensaio de tração, avaliando também a deformação e a tensão em cada fio. Em seus modelos, foram empregados contato surface-to-surface lagrangeano nos elementos, com elementos sólidos 3D de 5mm e nas superfícies externas 3mm, totalizando 941.117 nós e 195.395 elementos em um condutor de 100 mm de comprimento. Os resultados foram condizentes com os teóricos, segundo o Método de Feyrer (Feyrer, 2007), e com os resultados experimentais e teóricos da pesquisa feita por NAKAI et al. (1975).

Uma outra abordagem de modelagem, intermediária em relação às outras duas explicada, é o emprego de elementos de viga, que são unidimensionais e 3D, na discretização do fio com um algoritmo para descrever o contato. Essa abordagem reduz significativamente os gastos computacionais. Lalonde, Guilbault e Legeron (2016) e possui como grande vantagem a possibilidade de executar uma modelagem paramétrica, pois todos os nós se encontram em uma hélice, ou seja, pode ser matematicamente descrito (BAUMANN e NOVAK, 2017). Além disso, não há grandes dificuldades em realizar testes de flexão, possuindo a mesma complexidade que tração e torção.

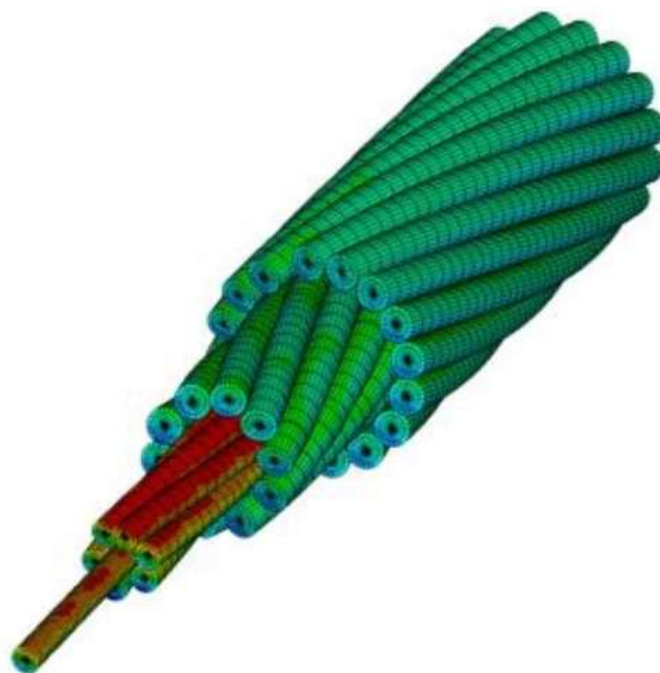


Figura 2.15: Modelo com Elementos de Viga (BAUMANN e NOVAK, 2017).

Há alguns trabalhos relevantes que fizeram uso dessa abordagem. Lalonde, Guilbault e Legeron (2016), desenvolveram modelos com diversas camadas utilizando elemento de viga. Para o modelo de seis camadas e 200 mm de comprimento, foram empregados 2640 elementos de viga, 5869 pares de contato e 5400 nós, e o teste durou 62 minutos. No entanto, o mesmo condutor, em testes desenvolvidos por Judge et al. (2012) com elementos sólidos, empregou 2.520.000 elementos e o processamento durou 12 horas. Fato que comprova a grandiosa redução no tamanho da malha e em gastos computacionais para ensaio de tração.

Outros testes realizados no trabalho de Lalonde, Guilbault e Langlois (2016) foram ensaios de flexão com diferentes níveis de carga, observando as tensões e a histereses em um condutor com quatro camadas. Os resultados foram comparados com os experimentos realizados por Papailiou (1995) e possuíram boa similitude.

Já Dastous (2005) modelou dois condutores de alumínio, com propriedades constantes ao longo do comprimento, utilizando um único elemento de viga. Não foi estabelecida diretamente a relação de contato entre as camadas, no entanto, como isso influencia no deslizamento entre camadas e, conseqüentemente, na rigidez à flexão do condutor, foi possível aplicar no material uma rigidez variável conforme a sua curvatura, com base na formulação desenvolvida por Papailiou (1995). Nesse trabalho foi avaliada as não-linearidades no condutor, obtendo resultados correlacionados com aqueles experimentais independente da tensão elétrica do condutor.

Langlois, Legeron e Lévesque (2014) igualmente empregaram elementos de viga e ri-

gidez à flexão variável em sua análise. O condutor foi do tipo CAA com quantidade de elementos de viga em cada igual ao número de camadas do condutor (incluindo o núcleo). Foram testadas três abordagens: rigidez à flexão igual a 50% do valor máximo de rigidez, rigidez à flexão não-linear conforme estudo de Papailiou (1995), e rigidez à flexão conforme estudo de Paradis e Legeron (2011), com flexão entre $0.68EI_{max}$ e $0.8EI_{max}$. Foi concluído que a hipótese de Paradis e Legeron (2011), em condições de deformação, aproxima melhor da realidade em comparação com aquela desenvolvida por Papailiou (1995).

JUNIOR (2021), em seu trabalho, desenvolveu um modelo paramétrico para modelar um condutor com uma e seis camadas, realizando simulações de tração e flexão. Foi utilizado elementos de viga e pares de contato master-slave radiais e circunferenciais em todas as camadas. Comparando com dados experimentais, os resultados para ambos os testes obtiveram boas correlações. Pedrosa (2021), utilizou o mesmo modelo paramétrico para realizar testes de tração e flexão em outro tipo de condutor, com uma e três camadas, e também obteve resultados próximos aos experimentais.

2.4.1 Tipos de Contato Entre os Fios de um Condutor

Em um condutor existem basicamente dois tipos de contato. O contato radial ocorre entre camadas vizinhas e o contato circunferencial ocorre entre fios vizinhos de uma mesma camada na direção tangencial ao raio médio da camada. Fato ilustrado na figura 2.16.

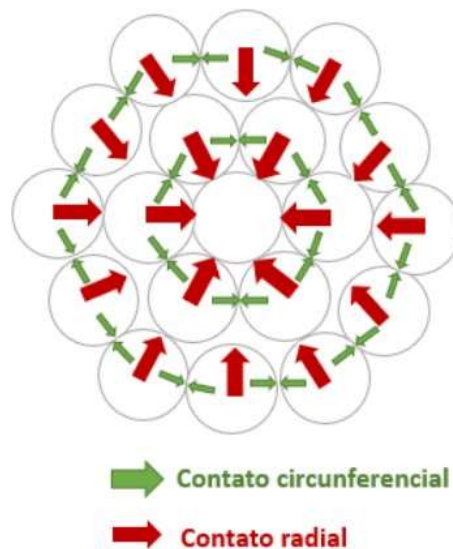


Figura 2.16: Tipos de Contato em um Condutor (Rodrigues, 2021).

O contato radial é gerado a partir de esforços trativos no condutor, que criam cargas com-

pressivas entre camadas e esticamento dos fios. Essa força de contato decorre do cruzamento entre dois fios de camadas subjacentes em um ângulo oblíquo e aumenta de intensidade em direção ao núcleo, por causa da contribuição das camadas mais externas (Papailiou, 1995) .

Ela pode ser assumida como força concentrada em pontos específicos dos fios, ilustrados na figura 2.17, podendo alcançar valores muito mais altos do que o esforço do contato circunferencial. No entanto, o contato radial entre a primeira camada e o núcleo possui uma peculiaridade. Os fios da primeira camada estão em contato com o núcleo em todo seu comprimento, ou seja, a força de contato será distribuída ao longo de todo esse trecho.



Figura 2.17: Contato Radial (Lalonde, Guilbault e Legeron, 2016).

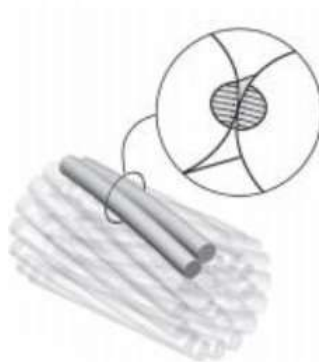


Figura 2.18: Contato Circunferencial (Lalonde, Guilbault e Legeron, 2016).

Contudo, o contato circunferencial ocorre entre fios adjacentes em uma mesma camada. Ele é do tipo linha e sua força é distribuída em todo o comprimento do fio (Judge et al., 2012) . Com isso, seu valor dependerá do comprimento e da geometria do condutor (BAUMANN e NOVAK, 2017). Além disso, a probabilidade de ocorrência desse

contato é muito maior na primeira camada. Com isso, em algumas simulações, consideram-se somente o contato circunferencial na primeira camada ou até mesmo sua inexistência, pois ele aumenta consideravelmente a quantidade de nós e elementos do modelo (BAUMANN e NOVAK, 2017).

O contato pode ser tratado de duas maneiras. Uma delas é pela formação de pares de contato, master e slave, que é utilizada por Lalonde, Guilbault e Legeron (2016) e ilustradas nas figura 2.17 e figura 2.18. A outra forma é pela criação de nós de pivô a mais nos pontos de contato entre elementos, que melhoram o posicionamento de forças, como a força de atrito, para fora do centro do elemento. Ela é ligada ao centro do elemento de viga e restringidas por *links*, ilustrado na figura 2.19 (BAUMANN e NOVAK, 2017).

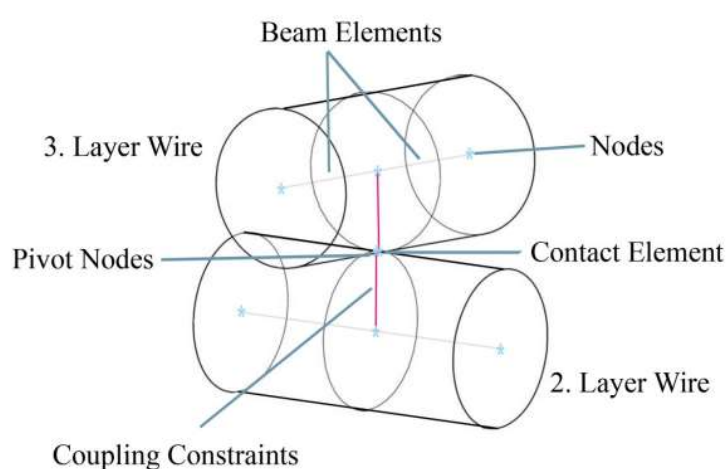


Figura 2.19: Contato por Meio de Pivô (BAUMANN e NOVAK, 2017; JUNIOR, 2021).

2.4.2 Modelagem Numérica Realizada por Pedrosa (2021) e JUNIOR (2021)

Há basicamente duas abordagens para geração da geometria do condutor. A primeira, bastante comum, é uma geometria 3D com elementos sólidos de 8 nós. Ela possibilita a aplicação de qualquer tipo de contato entre fio, no entanto, devido ao elevado número de graus de liberdade, o gasto computacional é bastante elevado. Stanová et al. (2011), MA, GE e ZHANG (2008) e Wu (2014) aplicaram tal método.

O segundo método é o uso elementos de viga com 3 nós, denominado BEAM 189. Esse elemento produz, a partir de uma linha equivalente ao centro de cada fio, uma viga 3D com seção transversal igual àquela de cada fio. Com isso, há uma quantidade de elementos na malha bem reduzida, fato que permite comprimentos grandes de condutor em ensaios

de tração. O trabalho realizado por Lalonde, Guilbault e Legeron (2016) apresentou bons resultados de deformação total e esforços de contato com o uso desse elemento.

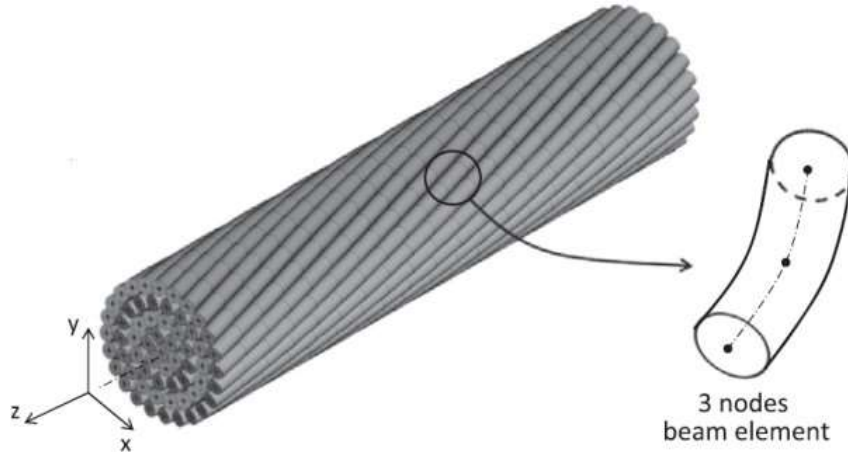


Figura 2.20: Exemplo de uso de Elementos BEAM 189 (Lalonde, Guilbault e Legeron, 2016).

Para utilizar esse elemento de viga, foi necessário criar linhas equivalentes ao caminho do eixo médio de cada fio. Para isso, primeiramente são criados pontos e em seguida cada um deles são ligados, formando as linhas de centro. Os trabalhos de Pedrosa (2021) e JUNIOR (2021) explicam detalhadamente os cálculos para chegar nas equações dos pontos de qualquer fio em qualquer camada, equações 2.29 , 2.30 e 2.31.

$$X_k(i, j) = R_k \cos\left(\frac{2\pi(i-1)}{L-1} \frac{h_{ext}}{h_{atual}} + \phi_0(j)\right) \quad (2.29)$$

$$Y_k(i, j) = R_k \sin\left(\frac{2\pi(i-1)}{L-1} \frac{h_{ext}}{h_{atual}} + \phi_0(j)\right) \quad (2.30)$$

$$Z_k(i, j) = \frac{R_k \frac{2\pi(i-1)}{L-1} \frac{h_{ext}}{h_{atual}}}{\tan \alpha} \quad (2.31)$$

onde

R_k = raio médio da camada k .

L = quantidade de pontos discretos em cada fio;

ϕ_0 = ângulo de fase;

h_{ext} = comprimento dos fios da camada mais externa;

h_{atual} = comprimento dos fios da camada em geração;

α = ângulo de entrelaçamento;

k = contador da camada;

i = contador que garante a discretização L de cada fio;

j = contador do número de fios em cada camada;

Segundo Pedrosa (2021), a partir de dois pontos seguidos é criada uma linha. Em outras palavras, as linhas que representam um fio são subdivididas de forma a possuir um número de segmentos igual a $L-1$, permitindo que cada linha seja discretizada com um único elemento de viga. O elemento BEAM 189 concede o uso de qualquer seção transversal de viga. Para esse caso, a seção transversal de cada fio é seu diâmetro correspondente.

O trabalho feito por Pedrosa (2021) realizou duas simulações, uma de tração e uma de flexo-tração. Na primeira, foi usado um condutor de 100 mm com discretização de 50 seções transversais com o condutor, condições de contorno e forças aplicadas similares àquelas utilizadas por Wu (2014). Já a simulação de flexo-tração utiliza a metodologia experimental de Papailiou (1995) e toma como base as condições de contorno usadas por Lalonde, Guilbault e Langlois (2016) na sua réplica computacional, em um condutor de 1000 mm com discretização de 300 seções transversais.

Enquanto que a dissertação de JUNIOR (2021) faz simulações de tração com dois condutores com comprimento de 200 mm e de flexo-tração com um condutor modelo S32 de 100 mm, utilizando em todas as mesmas características dos condutores e condições de contorno que Lalonde, Guilbault e Langlois (2016).

Diretamente com o elemento de viga BEAM 189 não é possível implementar relações de contato entre fios. Com isso, são utilizados os elementos TARGET 170 e CONTA 177, que relacionam dois nós e criam uma superfície 3D entre eles, lugar onde as interações de contato ocorrem, figura 2.21. Com esses elementos de contato, é usado o modelo de criação de contato *pair-based contact*, em que o próprio usuário determina quais pares de contatos interagem. Nesse modelo, um dos elementos do par é o elemento mestre, TARGE 170, e o outro é elemento escravo, CONTA 177 (ANSYS, 2020).

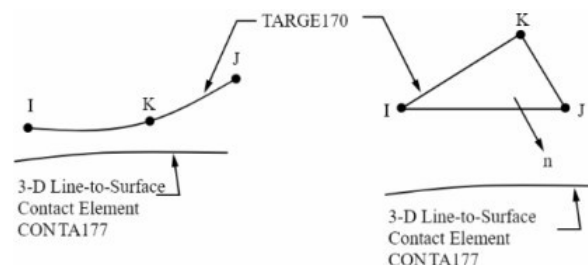


Figura 2.21: Interação elementos TARGE 170 e CONTA 177 Line-to-Surface (ANSYS, 2020).

O elemento TARGE 170 é o único disponível na plataforma ANSYS APDL para contato em uma superfície 3D. No entanto, há diversos elementos CONTA, mas o CONTA 177 é aquele específico para contato entre vigas, *beam-to-beam*, e permite diferenciar o contato entre fios paralelos e fios que se cruzam, figura 2.22 . Logo, os fios de uma mesma camada possuem contato paralelo e os fios de camadas diferentes possuem contato cruzado.

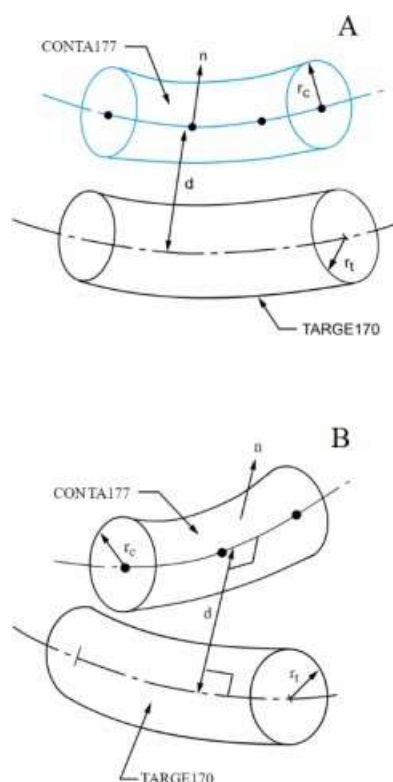


Figura 2.22: CONTA177 para Fios Cruzados e Fios Paralelos (ANSYS, 2020).

Os resultados de Pedrosa (2021) foram condizentes quando comparados aos experimentais e analíticos. Nas simulações de tração, a diferença percentual média da tensão axial com os valores analíticos foi de 3,5% e com os valores numéricos de Wu (2014) foi 11%, e do deslocamento axial médio com os valores analíticos foi de 7%. Enquanto que os resultados da deflexão axial da simulação de flexo-tração estão entre os valores analíticos máximos e mínimos.

O trabalho de JUNIOR (2021) também apresentou bons resultados. Nos ensaios de tração, a diferença percentual de força de tração no modelo de uma camada foi menor que 1% comparado ao resultado analítico, e de força de contato foi 0,35% comparado ao resultado analítico e 3,62% comparado aos resultados da literatura. Quanto ao ensaio de flexão, a deflexão percentual média resultante apresentou diferença menor que 5% em comparação aos resultados computacionais e analíticos presentes na literatura.

Capítulo 3

ANÁLISE COMPUTACIONAL

Nesse capítulo é apresentada a metodologia de análise desse projeto de graduação. São analisadas as tensões mecânicas e deslocamentos no condutor considerando uma distribuição radial de temperatura, equivalente àquelas resultantes de diferentes condições climáticas e operacionais. Para isso, foram utilizados os resultados das análises térmicas realizadas por Kang, Strobach e Franck (2013) e a modelagem numérica desenvolvida e validada por Pedrosa (2021) e JUNIOR (2021) , empregando um cabo CAL de 30,6 milímetros de diâmetro e 61 fios.

3.1 Modelo Numérico

A análise estática do condutor foi efetuada no software Ansys APDL, seguindo o código computacional desenvolvido por Pedrosa (2021) e JUNIOR (2021) . Esse código é parametrizado, o qual permite grande versatilidade e aplicação para propriedades geométricas e físicas diversas (Pedrosa, 2021).

O condutor utilizado por Kang, Strobach e Franck (2013) possui quatro camadas e núcleo de liga de alumínio (CAL) . Essa liga é composta por magnésio e silício, em porcentagens não informadas pelo autor, que geram um aumento de cerca de 1,5 vezes na resistência mecânica, sacrificando 5% da ampacidade do condutor (Kiessling et al., 2003).

Os autores não informam o ângulo de entrelaçamento α desse condutor, dado necessário à modelagem. Com isso, no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia (LabCabos) da UnB , foram feitas medições para encontrar α de um condutor similar a esse, isto é, o Tern composto por núcleo de aço galvanizado e quatro camadas de alumínio liga 1350 .

Para isso, foram medidos o comprimento de passo h e o raio médio de cada camada e

aplicados esses dados na equação 3.1, onde i se refere a cada camada.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi R(i)}{h(i)}\right) \quad (3.1)$$

Os dados resultantes estão na tabela 3.1 .Com isso, as características geométricas do cabo estão na tabela 3.2.

Tabela 3.1: Determinação do ângulo de entrelaçamento do condutor Tern .

| Camada | Raio Médio (mm) | Comprimento de passo h (mm) | α |
|--------|---------------------|-----------------------------------|----------|
| 1° | 2,25 | 136 | 5,93° |
| 2° | 5,065 | 211 | 8,57° |
| 3° | 8,445 | 289 | 10,40° |
| 4° | 11,825 | 332 | 12,61° |

Tabela 3.2: Características da geometria do cabo condutor (1x61) (Kang, Strobach e Franck, 2013).

| Camada | N° de fios | Diâmetro do fio (mm) |
|--------|------------|--------------------------|
| Núcleo | 1 | 3,4 |
| 1° | 6 | 3,4 |
| 2° | 12 | 3,4 |
| 3° | 18 | 3,4 |
| 4° | 24 | 3,4 |
| Total | 61 | 30,6 |

Para análise estática, foi considerado um comprimento de condutor $L = 400mm$ discretizados em 100 partes de comprimento 4 mm. Como Kang, Strobach e Franck (2013) não indica as propriedades mecânicas do alumínio do condutor, é usado aquelas correspondentes às utilizadas por Lalonde, Guilbault e Legeron (2016), Tabela 3.3 .

Tabela 3.3: Propriedades mecânicas do condutor (Lalonde, Guilbault e Legeron, 2016).

| Propriedade | Valor |
|------------------------------|----------|
| Módulo de elasticidade ,E | 65 GPa |
| Coef. de Poison | 0,33 |
| Coeficiente de Atrito, μ | 0,5 |

3.2 Análise Térmica

Esse projeto de graduação toma como base a análise térmica realizada por Kang, Strobach e Franck (2013), em que foram realizadas simulações com diferentes condições ambientais e avaliadas a distribuição de temperatura ao longo do raio do condutor para regime estacionário e transiente.

Nas simulações estacionárias, um dos principais resultados foi constatar que o fator mais influente no gradiente de temperatura $T(r)$ é a velocidade do vento V_w , Figura 2.3 e figura 2.6. Por causa disso, esse trabalho utilizará as temperaturas presentes nos gráficos de V_w , referentes aos três níveis de velocidade do vento da Figura 2.3.

Além disso, nas simulações transientes, analisa-se a influência da variação da corrente no gradiente de temperatura $T(r)$. Primeiramente, é analisado em quanto tempo a temperatura do núcleo atinge a temperatura limite de trabalho, Figura 2.5. Esse dado é muito importante, no entanto, esse trabalho visa analisar a influência do gradiente de temperatura radial no comportamento mecânico do condutor. Logo, esse dado não é usado nessa análise.

Mas a partir desse primeiro resultado da análise transiente, foram obtidos os gradientes de temperatura momentâneos no instante que o núcleo atingiu 80°C para cada caso de variação de corrente, figura 2.6 e figura 2.7. As distribuições de temperaturas para os dois casos de $I_f = 200\%I_{ccc}$ presentes na figura 2.6 são aplicados nesse trabalho.

3.3 Análise de Tensões

A simulação desenvolvida realiza análises considerando carga de tração e as temperaturas aplicadas em cada camada, representadas nas figura 3.1 e figura 3.2.

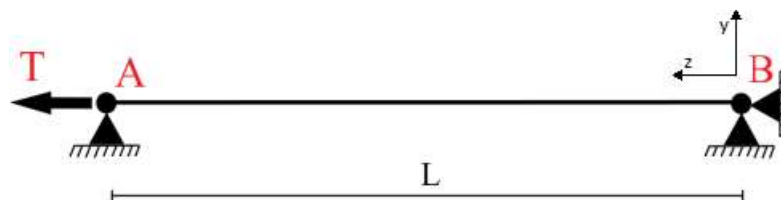


Figura 3.1: Condutor Sob Carga axial (Pedrosa, 2021).

O ponto B recebe somente restrição de deslocamento em todos os sentidos, sem restringir os momentos fletores.

$$Ponto B = \begin{cases} Deslocamento em X = 0 \\ Deslocamento em Y = 0 \\ Deslocamento em Z = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

No ponto A, o condutor esta livre para se movimentar somente na direção Z. As outras direções são restringidas, pois previnem que nessa extremidade livre os fios se desenrolem ou se soltem conforme a carga é aplicada (Nawrocki e Labrosse, 2000). Além disso, é usadaa condição de contorno chamada *Coupling*, que garante que os nós que estão em A de todos os fios recebam uniformemente a força T e deslocam-se igualmente.

$$Ponto B = \begin{cases} Deslocamento em X = 0 \\ Deslocamento em Y = 0 \\ Deslocamento em Z = Coupling\ Nós \\ Força em Z = T \end{cases} \quad (3.3)$$

São empregados três níveis de carga de esticamento T - 10% de UTS, 20% de UTS e 30% de UTS - e cada valor de carga é aplicado em simulações diferentes.

Em relação a distribuição de temperatura, em todos os nós de cada camada são aplicados o nível de temperatura presentes nas análises térmicas escolhidas na seção 3.2, conforme posição radial.

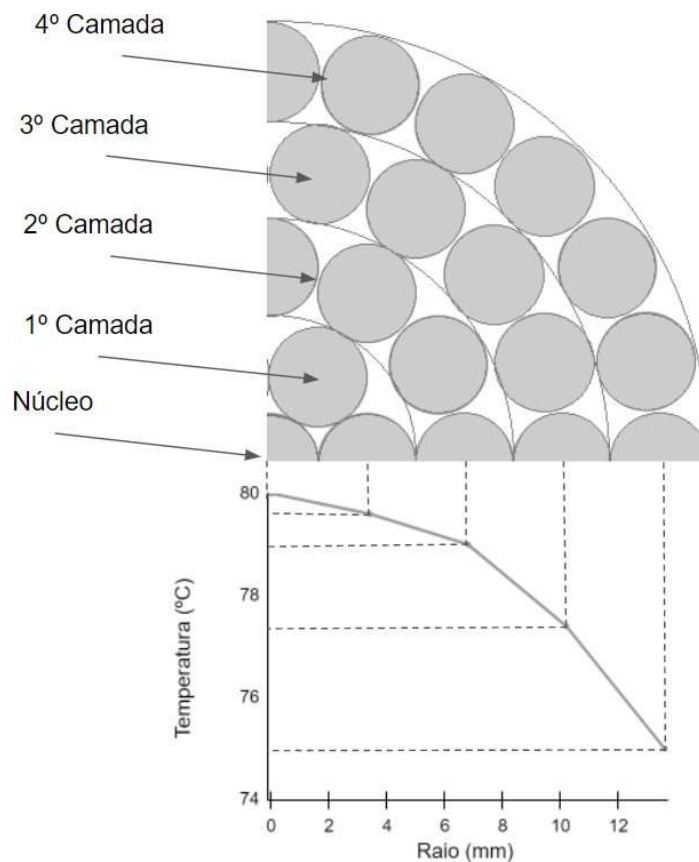


Figura 3.2: Temperatura para cada Camada.

$$Temperaturas = \begin{cases} \text{Núcleo} = T_c \\ 1^\circ \text{ Camada} = T_{r=3,4 \text{ mm}} \\ 2^\circ \text{ Camada} = T_{r=6,8 \text{ mm}} \\ 3^\circ \text{ Camada} = T_{r=10,2 \text{ mm}} \\ 4^\circ \text{ Camada} = T_{r=13,6 \text{ mm}} \end{cases} \quad (3.4)$$

Foram escolhidas duas análises térmicas, uma em regime estacionário, com três níveis de V_w , e uma em regime transiente, com dois níveis de variação de I . Com isso, ao todo, foram feitas 18 simulações, como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Simulações termomecânicas.

| Regime Térmico | Condição térmica | T (% UTS) | Simulação |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|
| Estacionário | $T_{condutor} = T_{ambiente} = 25^\circ\text{C}$ | 10 | #1 |
| | | 20 | #2 |
| | | 30 | #3 |
| | $V_w = 0,5 \text{ m/s}$ e $T_c = 80^\circ\text{C}$ | 10 | #4 |
| | | 20 | #5 |
| | | 30 | #6 |
| | $V_w = 2,5 \text{ m/s}$ e $T_c = 80^\circ\text{C}$ | 10 | #7 |
| | | 20 | #8 |
| | | 30 | #9 |
| | $V_w = 4,5 \text{ m/s}$ e $T_c = 80^\circ\text{C}$ | 10 | #10 |
| | | 20 | #11 |
| | | 30 | #12 |
| Transiente | $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T_c = 80^\circ\text{C}$ | 10 | #13 |
| | | 20 | #14 |
| | | 30 | #15 |
| | $I = 60\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T_c = 80^\circ\text{C}$ | 10 | #16 |
| | | 20 | #17 |
| | | 30 | #18 |

Essas simulações são feitas na plataforma ANSYS APDL com configuração para análise não-linear geométrica. Nele, o carregamento aplicado em uma estrutura é descrito pela definição de um conjunto de passos de carga (*Load Step*) e a carga em um determinado passo de carga é aplicada de forma incremental, sendo que cada incremento de carga é conhecido como um sub-passo (*Sub-Step*). No presente trabalho, são empregados dois passos de carga, em que primeiramente é aplicada a carga de tração e, em seguida, aplicadas as temperaturas em cada camada, conforme figura 3.3. Logo, as simulações #1, #2 e #3 serão os resultados do primeiro passo de carga de qualquer uma das outras simulações feitas com a mesma tração.

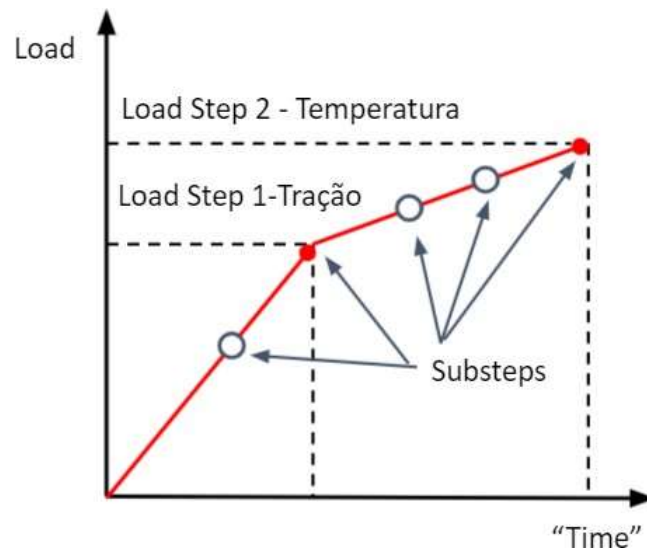


Figura 3.3: Passos de carga (*Load Steps*) das simulações.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Geometria e Malha

A geometria criada seguiu o modelo computacional desenvolvido por Pedrosa (2021) e JUNIOR (2021). Suas propriedades mecânicas e o diâmetro foram os mesmos usados no cabo condutor do estudo térmico feito por Kang, Strobach e Franck (2013) . Nessa geometria, todos os fios possuem o mesmo número de keypoints e mesma projeção de comprimento horizontal de 400 mm. As vistas isométrica e frontal estão mostradas nas figuras 4.1 e 4.2.

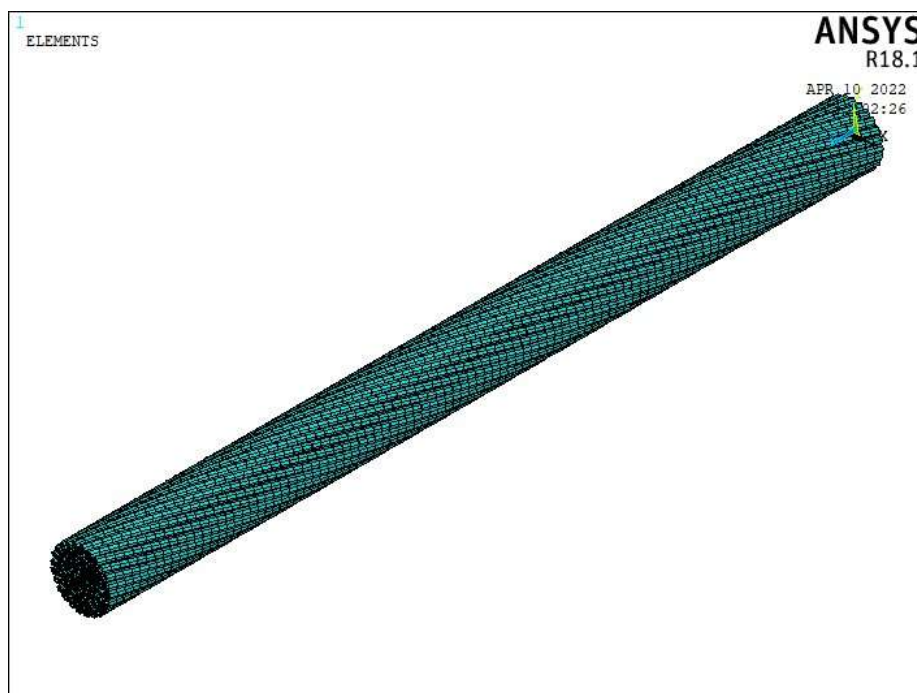


Figura 4.1: Vista Isométrica do Condutor.

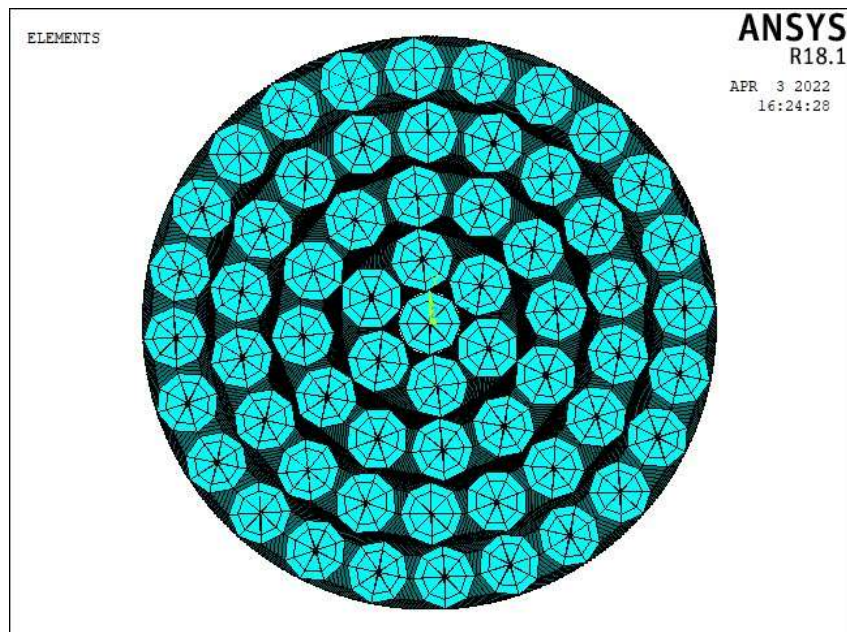


Figura 4.2: Vista Frontal do Condutor.

A malha foi feita com elementos de 4 mm de comprimento, que se encontra na mesma ordem de grandeza que o diâmetro dos fios do cabo. Com isso, a malha usada possui 12139 nós, 6039 elementos de viga BEAM189 e 87416 elementos de contato TARGE170/CONTA177.

O computador usado nesse trabalho possui um processador Intel(R) Core(TM) i5-5200U CPU @ 2.20GHz e 4GB de memória RAM. O tempo médio de processamento computacional das simulações foi de 3 horas e 15 minutos.

4.2 Resultados

Segundo a seção 3.3, seriam feitas 18 simulações, as quais variam a força de tração aplicada e o gradiente de temperatura nas camadas do condutor, conforme as condições ambientais vigentes. No entanto, a curva de temperatura das simulações #16, #17 e #18 presente na figura 2.6 é muito similar àquela usada nas simulações #13, #14 e #15. Com isso, somente as simulações #13, #14 e #15 foram feitas, pois os resultados finais seriam muito semelhantes.

As simulações foram referidas nesse trabalho como a condição térmica que a representa, ou seja, as simulações de #1 a #3 são designadas como "em temperatura ambiente", de #4 a #12 como a velocidade do vento vigente em cada uma, e de #13 a #15 como " $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ ".

4.2.1 Resultado do Deslocamento na Extremidade do Condutor

As simulações foram feitas com 3 níveis diferentes de tração de esticamento e 5 condições térmicas. Obviamente, o maior valor de força aplicada provocará maior deslocamento. Logo, são comparados os diferentes testes computacionais realizados com a mesma força de tração.

4.2.1.1 Deslocamento para $T = 10\%$ UTS

As figuras 4.3 a 4.7 mostram os deslocamentos axiais para as simulações feitas com força de tração de 10% da UTS, ou seja, $T = 5344,47N$.

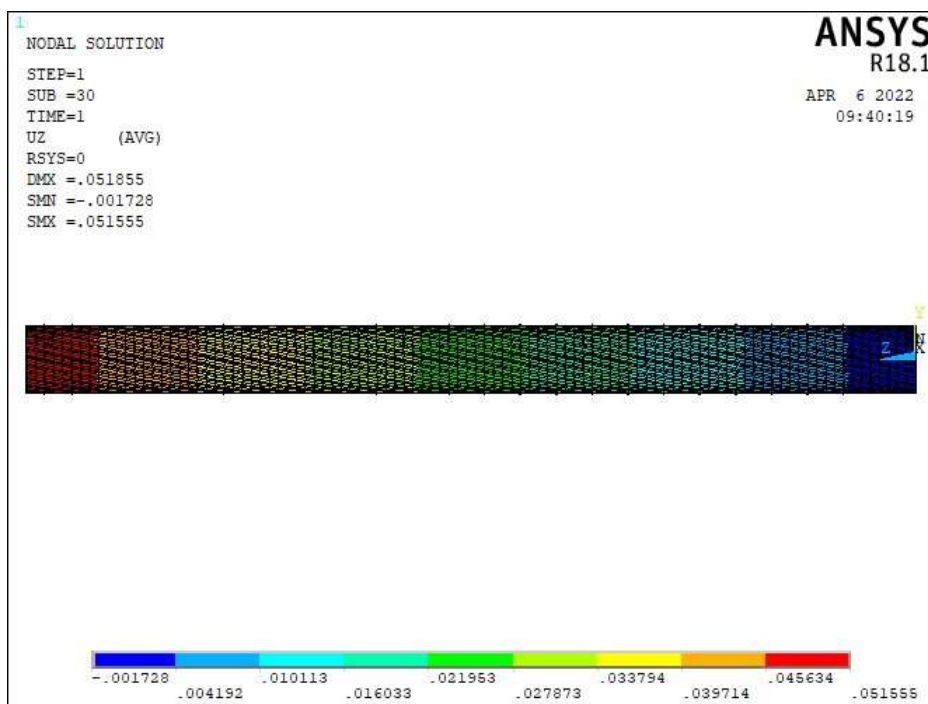


Figura 4.3: Deslocamento no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 10\%$ UTS.

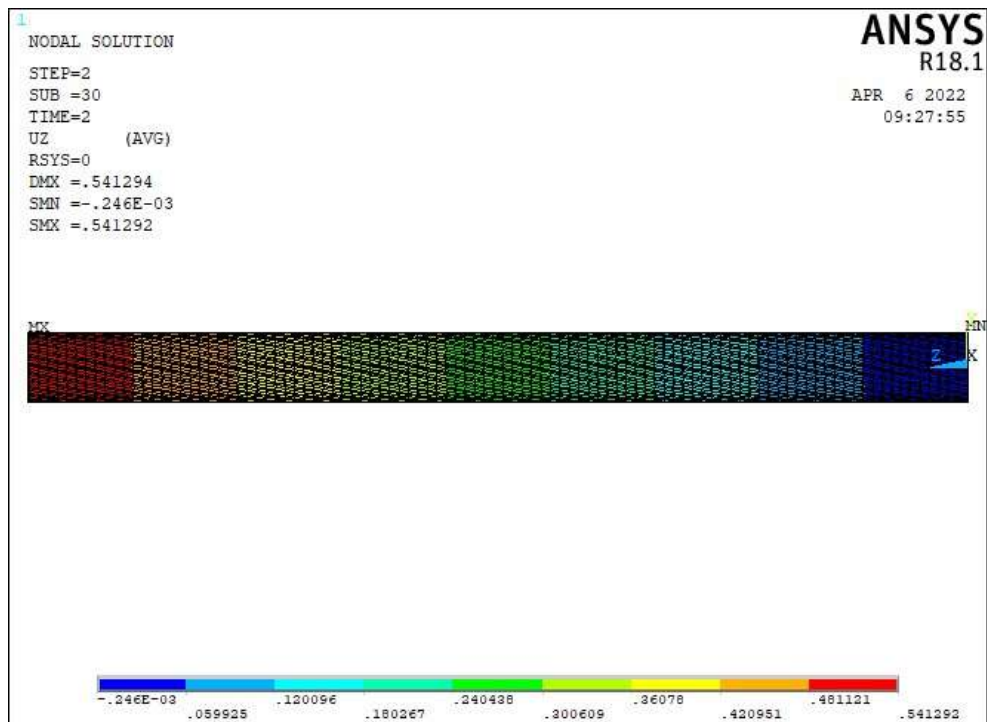


Figura 4.4: Deslocamento no Condutor com $V_w = 0,5 m/s$ e $T = 10\%$ UTS. .

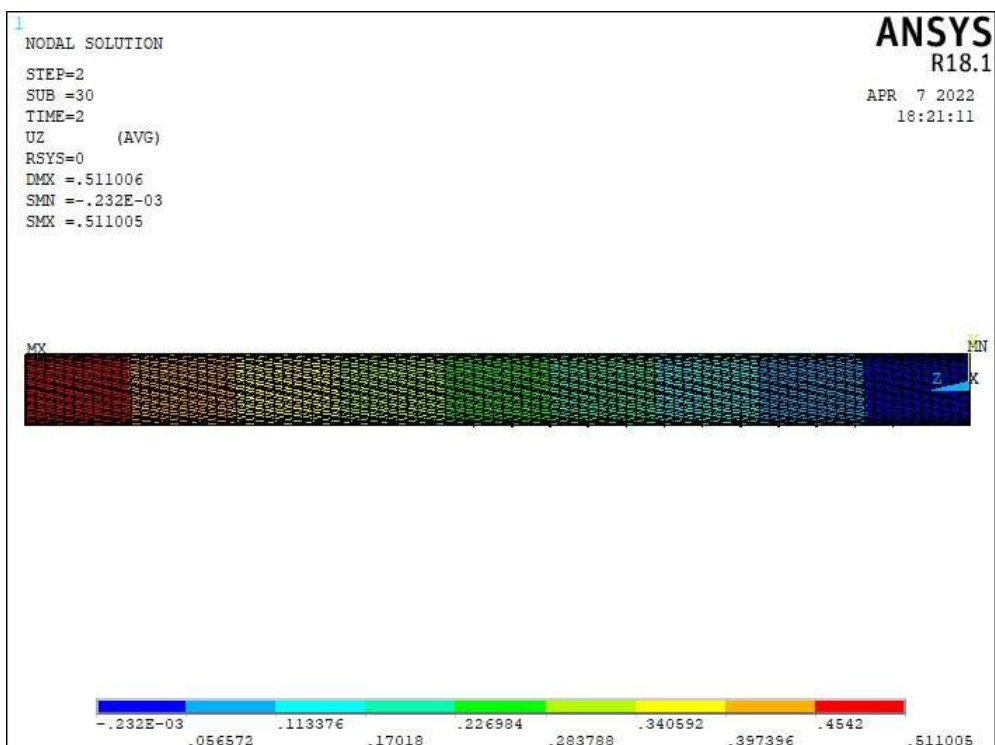


Figura 4.5: Deslocamento no Condutor com $V_w = 2,5 m/s$ e $T = 10\%$ UTS.

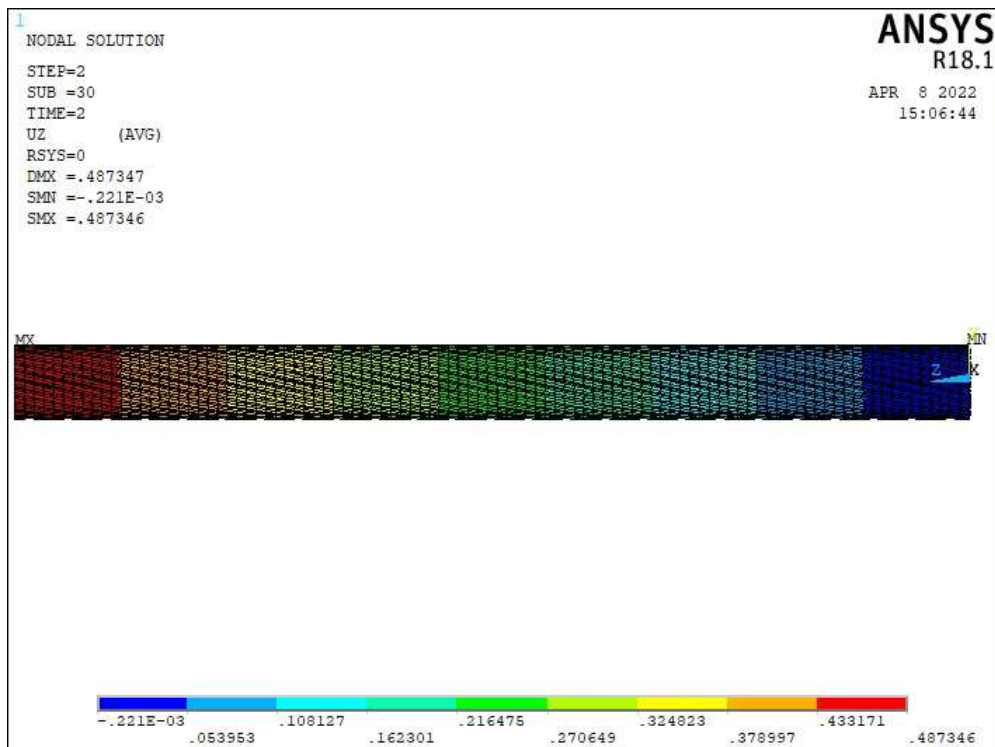


Figura 4.6: Deslocamento no Condutor com $V_w = 4,5 \text{ m/s}$ e $T = 10\% \text{ UTS}$.

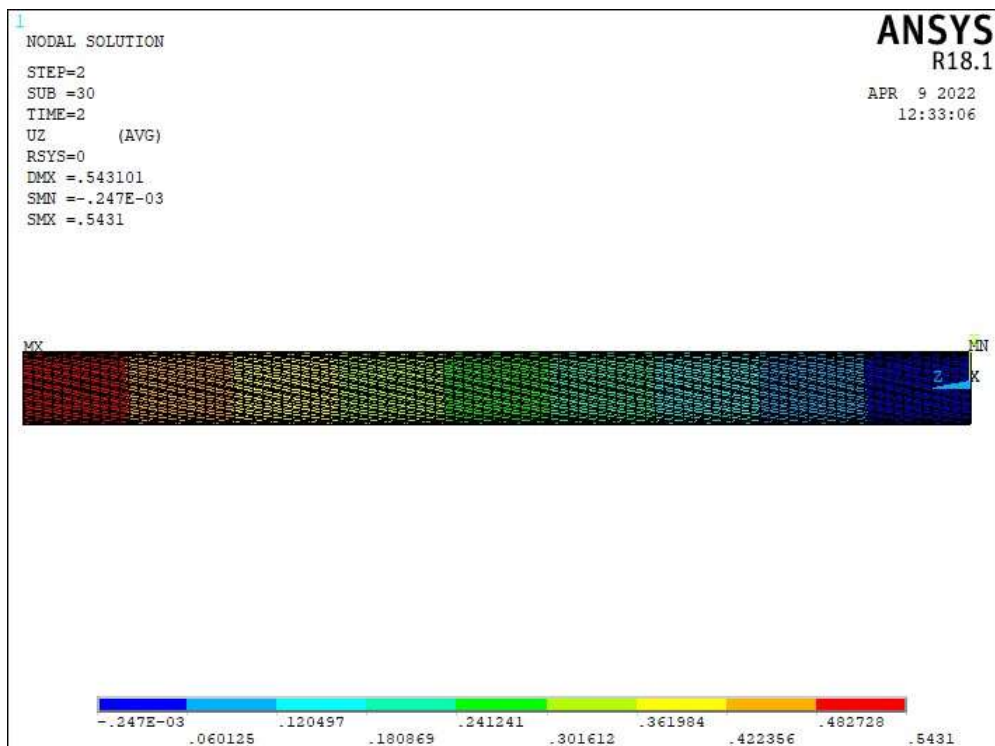


Figura 4.7: Deslocamento no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T = 10\% \text{ UTS}$.

4.2.1.2 Deslocamento para $T = 20\%$ UTS

As figuras 4.8 a 4.12 mostram os deslocamentos axiais para as simulações feitas com força de tração de 20% da UTS, ou seja, $T = 10688,94\text{N}$.

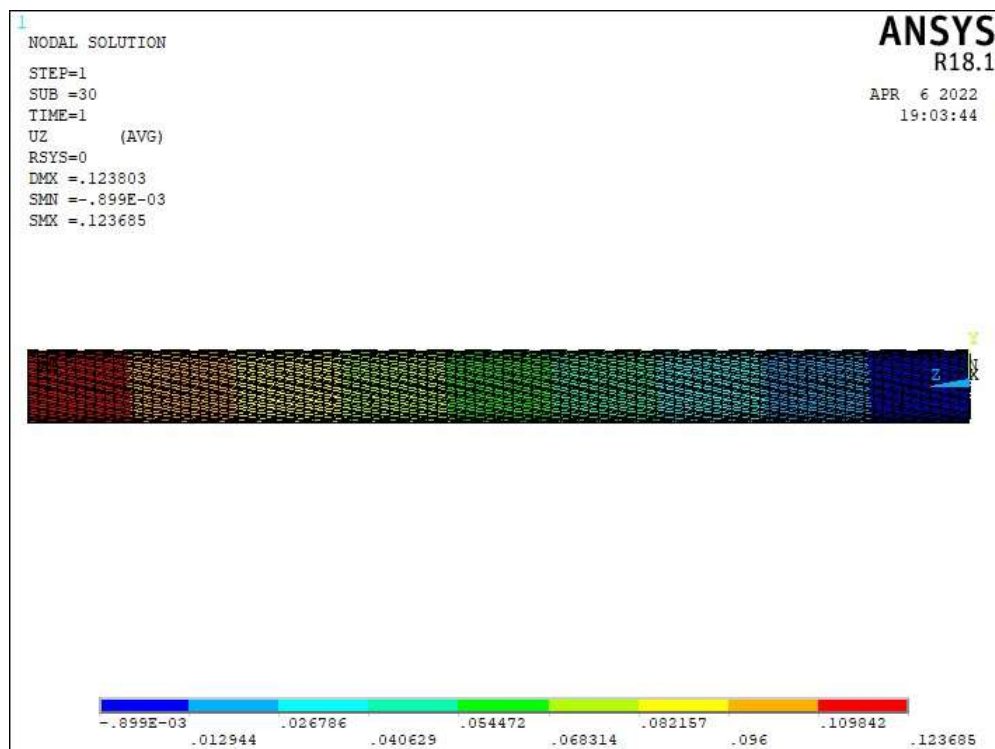


Figura 4.8: Deslocamento no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 20\%$ UTS.

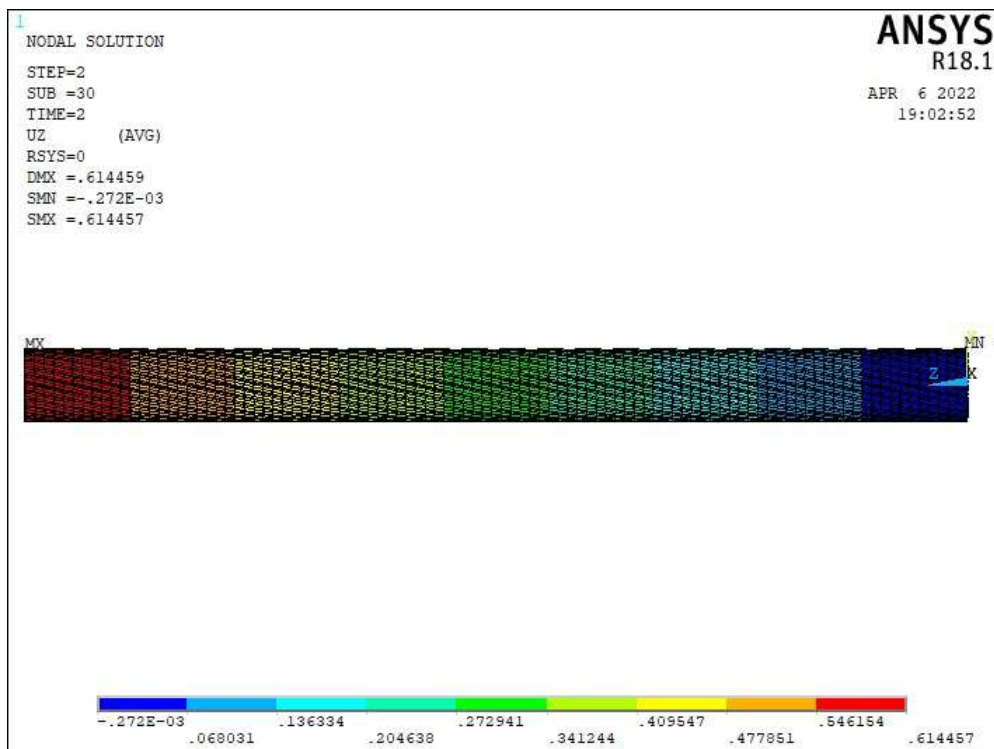


Figura 4.9: Deslocamento no Condutor com $V_w = 0, 5m/s$ e $T = 20\%$ UTS.

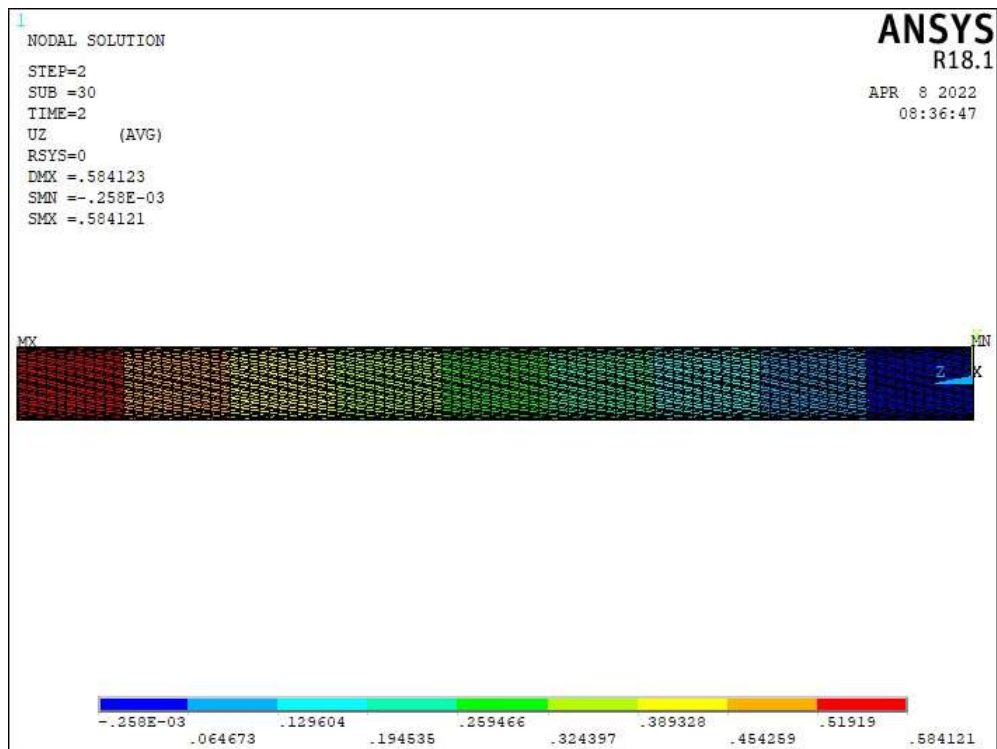


Figura 4.10: Deslocamento no Condutor com $V_w = 2, 5m/s$ e $T = 20\%$ UTS.

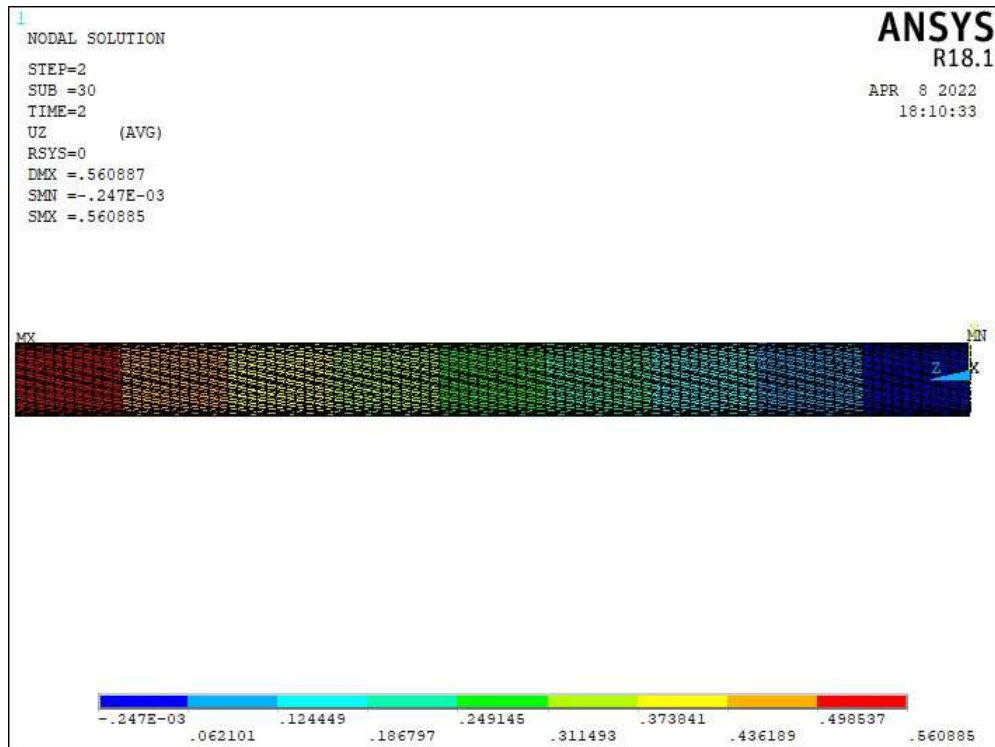


Figura 4.11: Deslocamento no Condutor com $V_w = 4, 5m/s$ e $T = 20\%$ UTS.

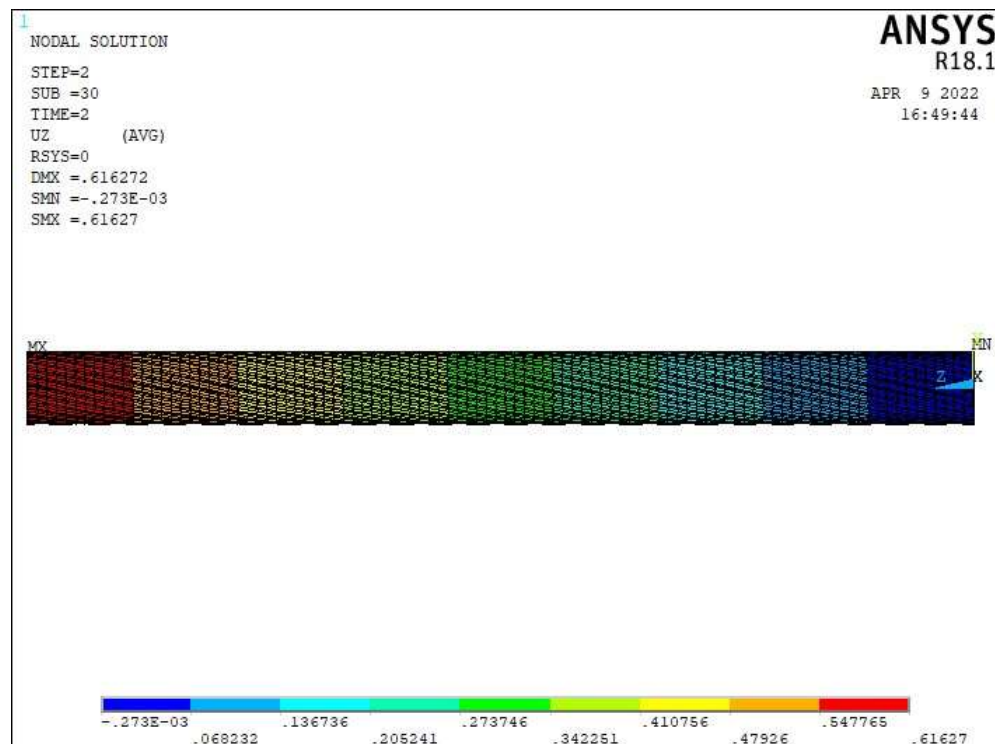


Figura 4.12: Deslocamento no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T = 20\%$ UTS.

4.2.1.3 Deslocamento para $T = 30\%$ UTS

As figuras 4.13 a 4.17 mostram os deslocamentos axiais para as simulações feitas com força de tração de 30% da UTS, ou seja, $T = 16033,41\text{N}$.

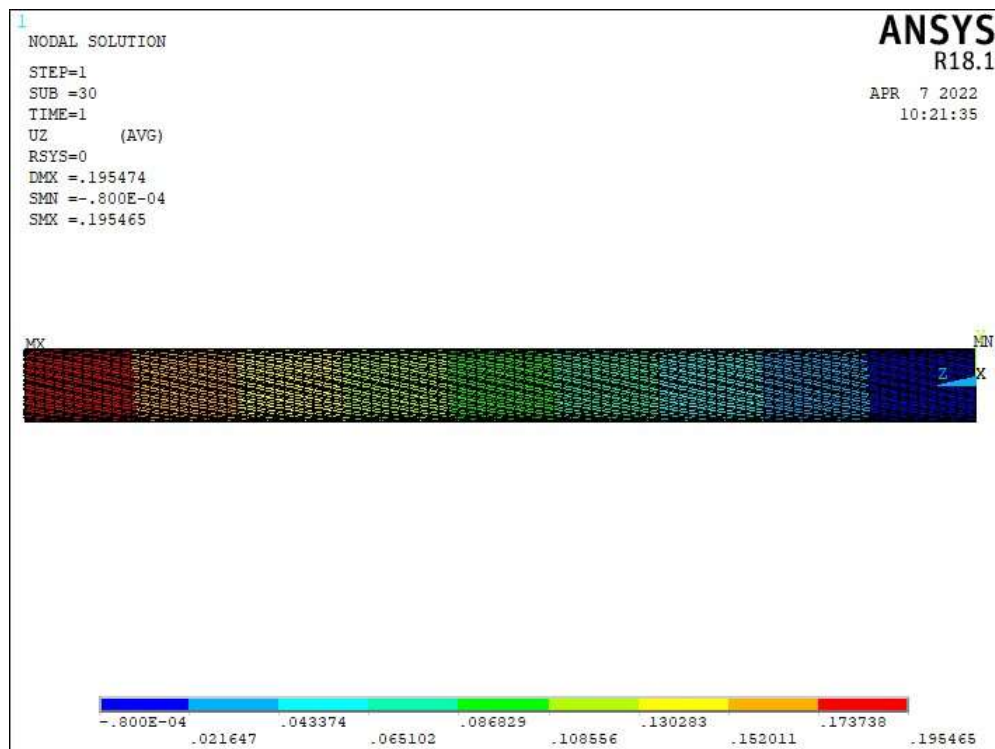


Figura 4.13: Deslocamento no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 30\%$ UTS.

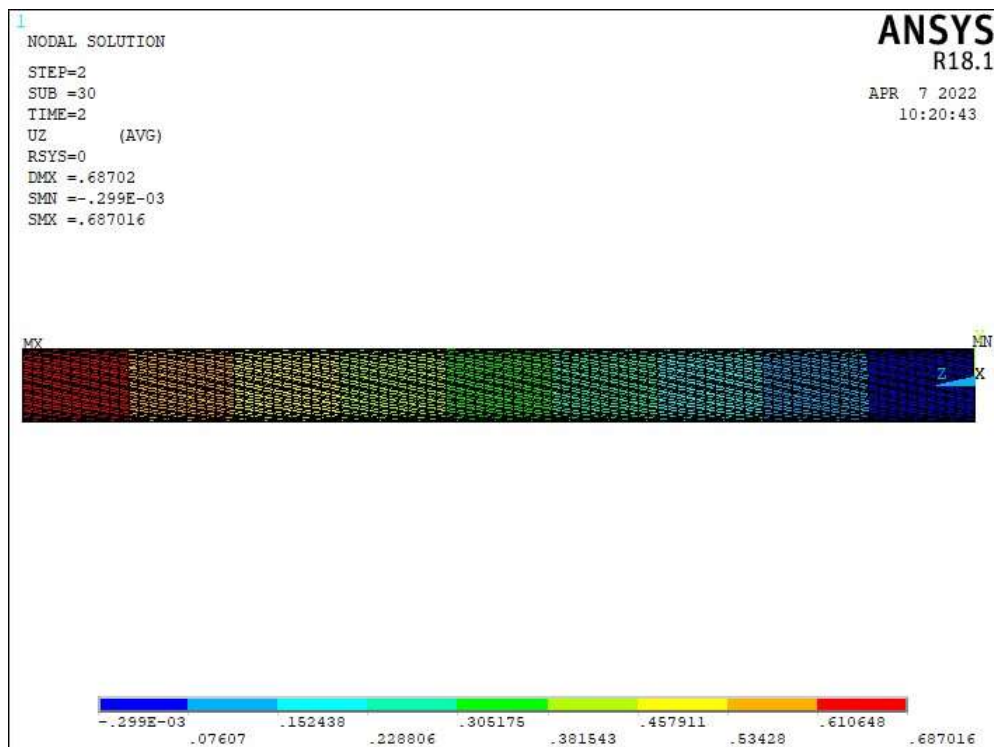


Figura 4.14: Deslocamento no Condutor com $V_w = 0, 5m/s$ e $T = 30\%$ UTS.

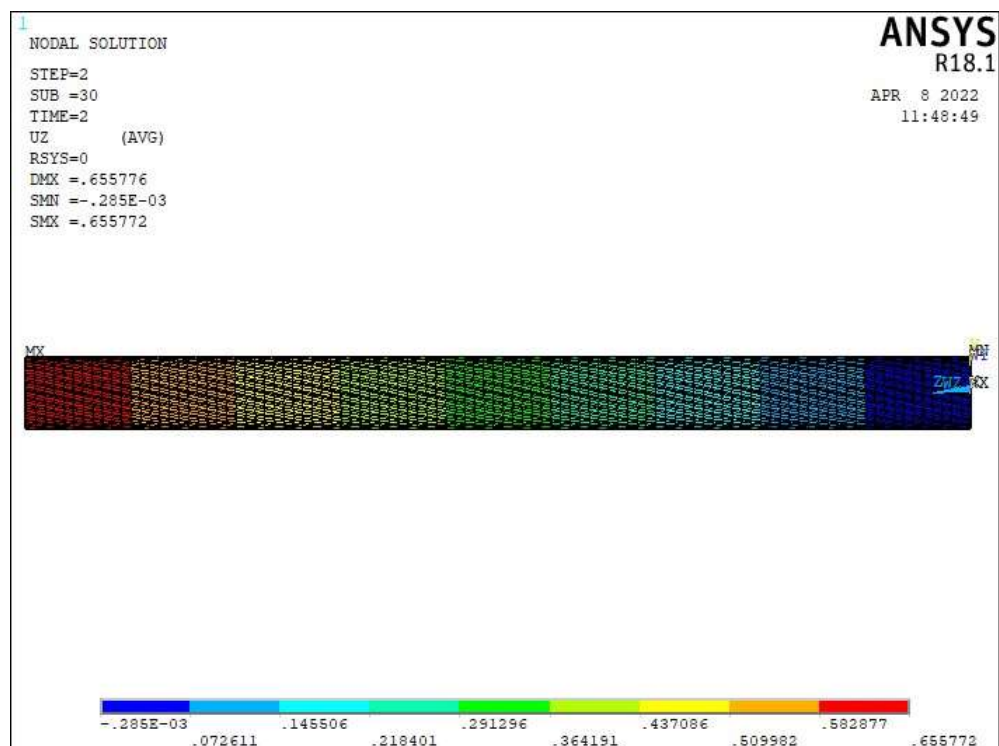


Figura 4.15: Deslocamento no Condutor com $V_w = 2, 5m/s$ e $T = 30\%$ UTS.

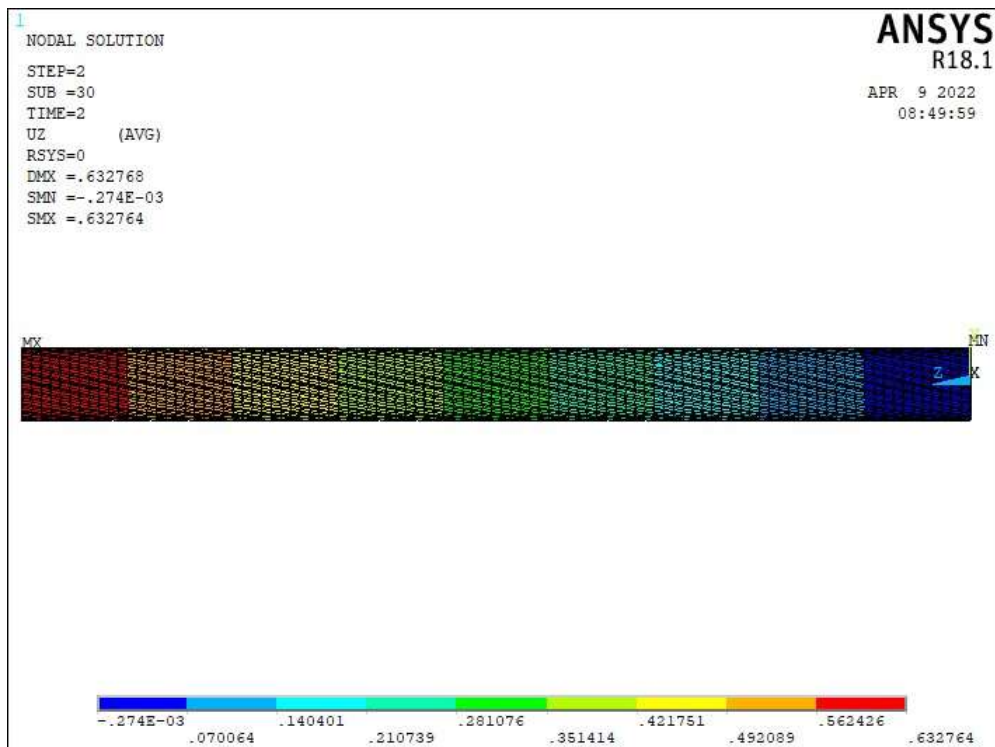


Figura 4.16: Deslocamento no Condutor com $V_w = 4, 5m/s$ e $T = 30\%$ UTS.

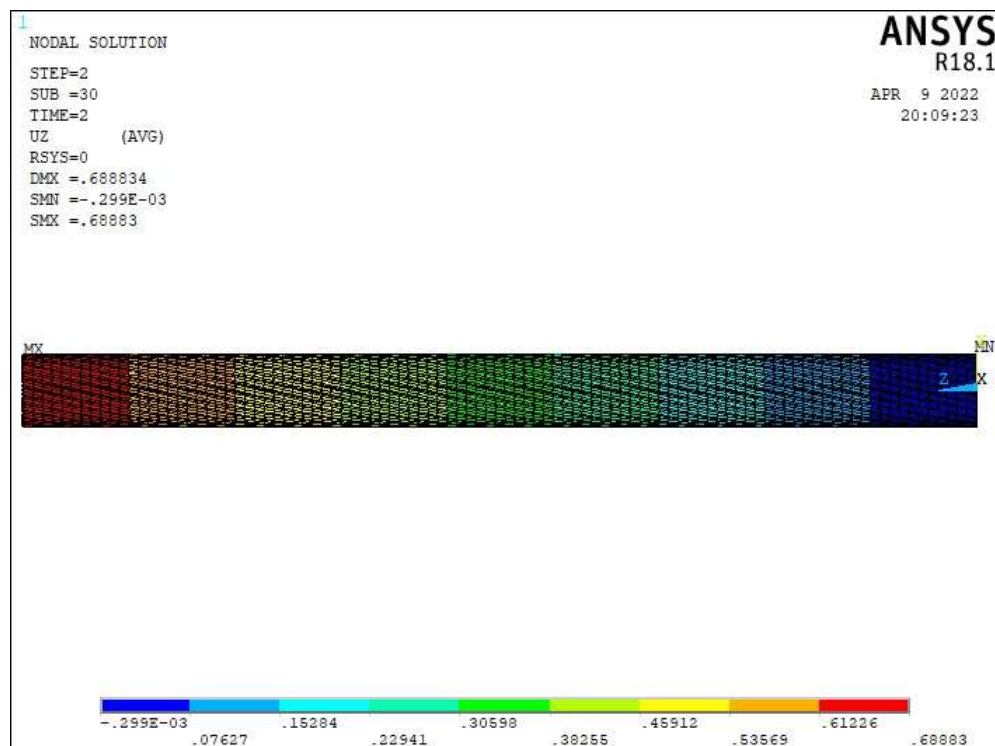


Figura 4.17: Deslocamento no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T = 30\%$ UTS.

4.2.2 Resultado de Tensões Normais

Assim como foi feito no subcapítulo 4.2.1, são comparadas as simulações realizadas com a mesma força de tração.

4.2.2.1 Tensões Normais para $T = 10\%$ UTS

As figuras 4.18 até 4.22 mostram o comportamento da tensão normal no condutor na extremidade onde a força de tração de $5344,47\text{ N}$ é aplicada, em $z = 400\text{ mm}$. Verifica-se que os elementos dessa extremidade possuem grandes gradientes de tensão interna, sendo o local onde há a tensão máxima e mínima do condutor. Ao se afastar da extremidade, a tensão apresenta valores praticamente constantes.

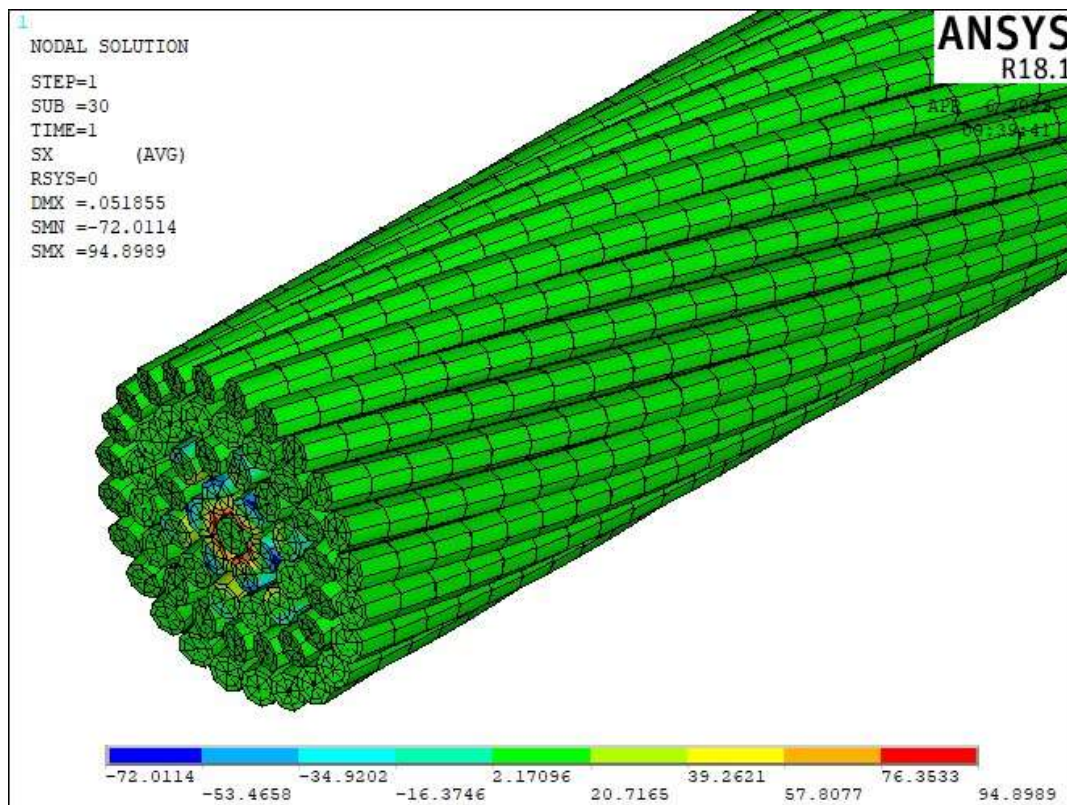


Figura 4.18: Tensão Normal no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 10\%$ UTS.

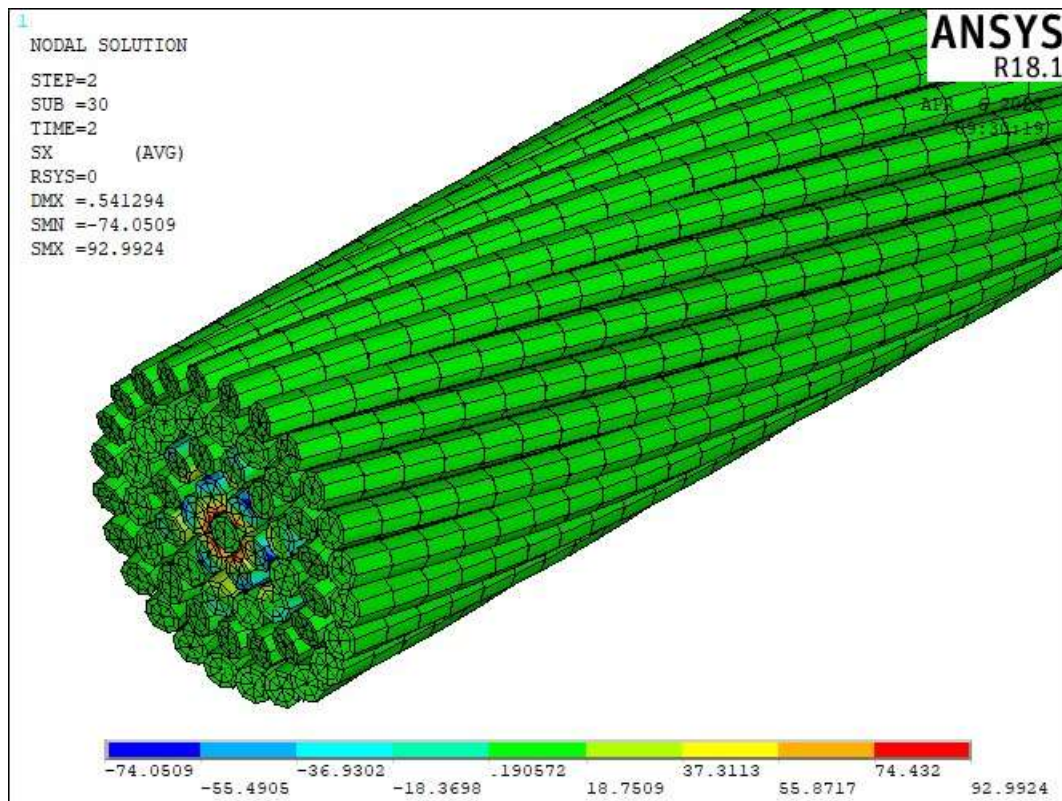


Figura 4.19: Tensão Normal no Condutor com $V_w = 0, 5m/s$ e $T = 10\%$ UTS.

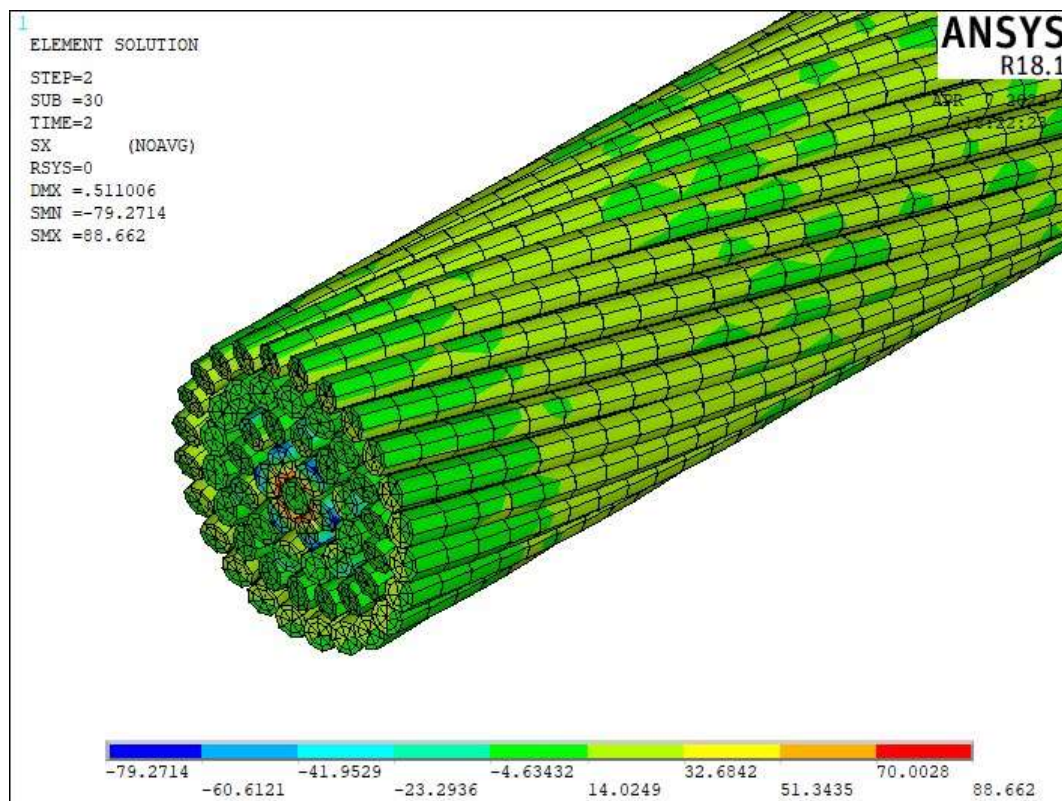


Figura 4.20: Tensão Normal no Condutor com $V_w = 2, 5m/s$ e $T = 10\%$ UTS.

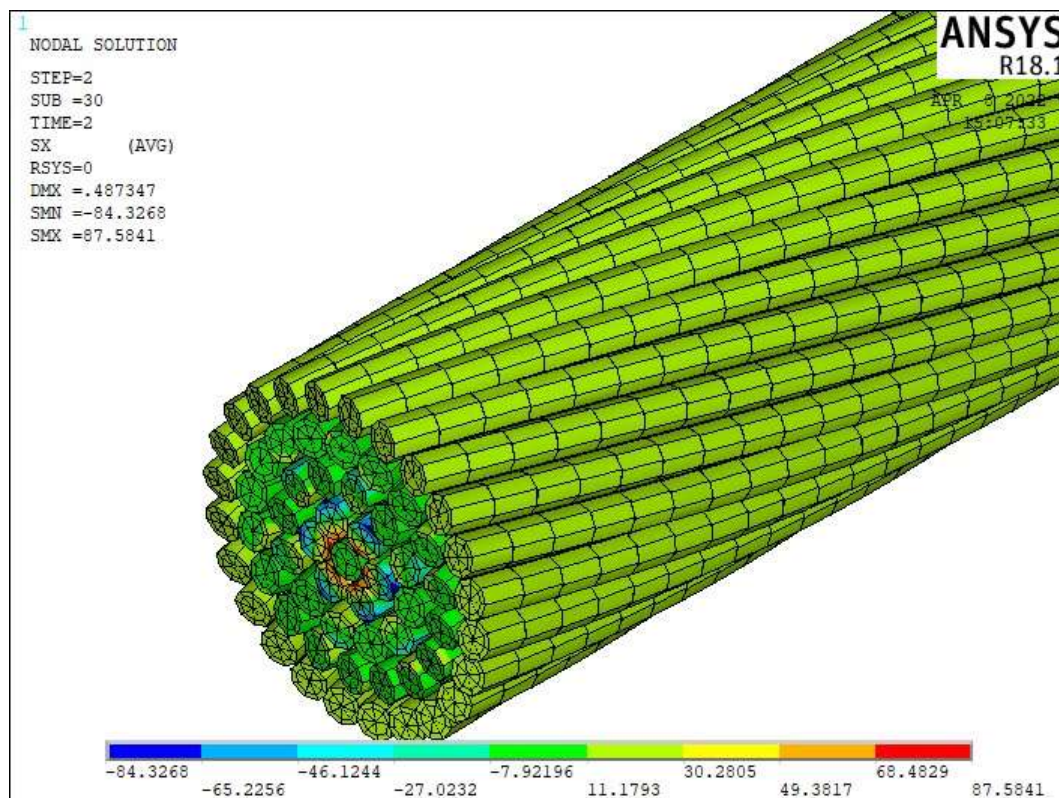


Figura 4.21: Tensão Normal no Condutor com $V_w = 4, 5m/s$ e $T = 10\%$ UTS.

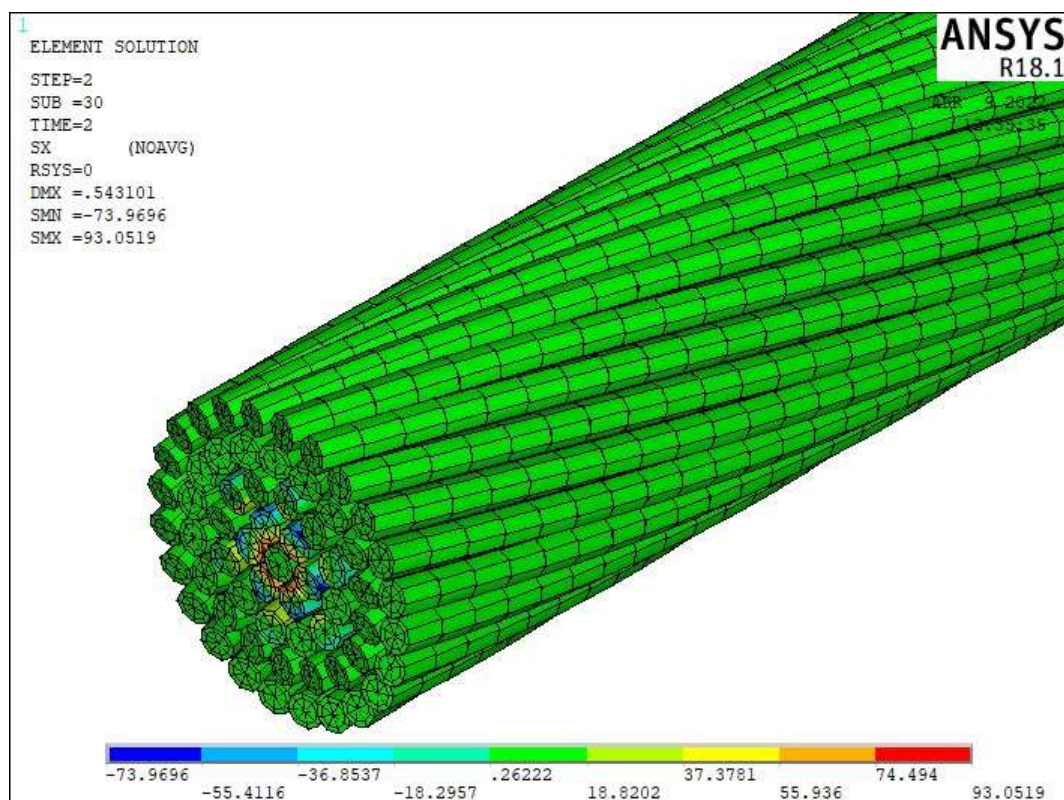


Figura 4.22: Tensão Normal no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T = 10\%$ UTS.

4.2.2.2 Tensões Normais para $T = 20\%$ UTS

As figuras mostram o comportamento da tensão normal no condutor na extremidade onde a força de tração de $10688,94N$ é aplicada, em $z = 400mm$.

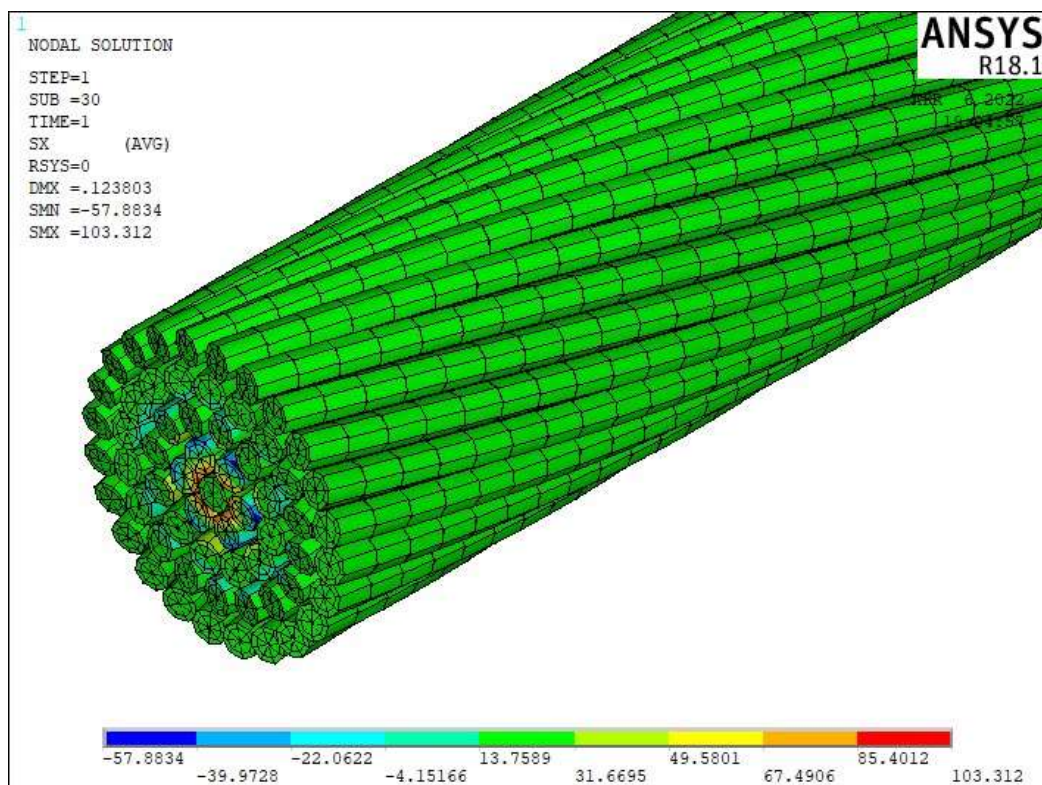


Figura 4.23: Tensão Normal no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 20\%$ UTS.

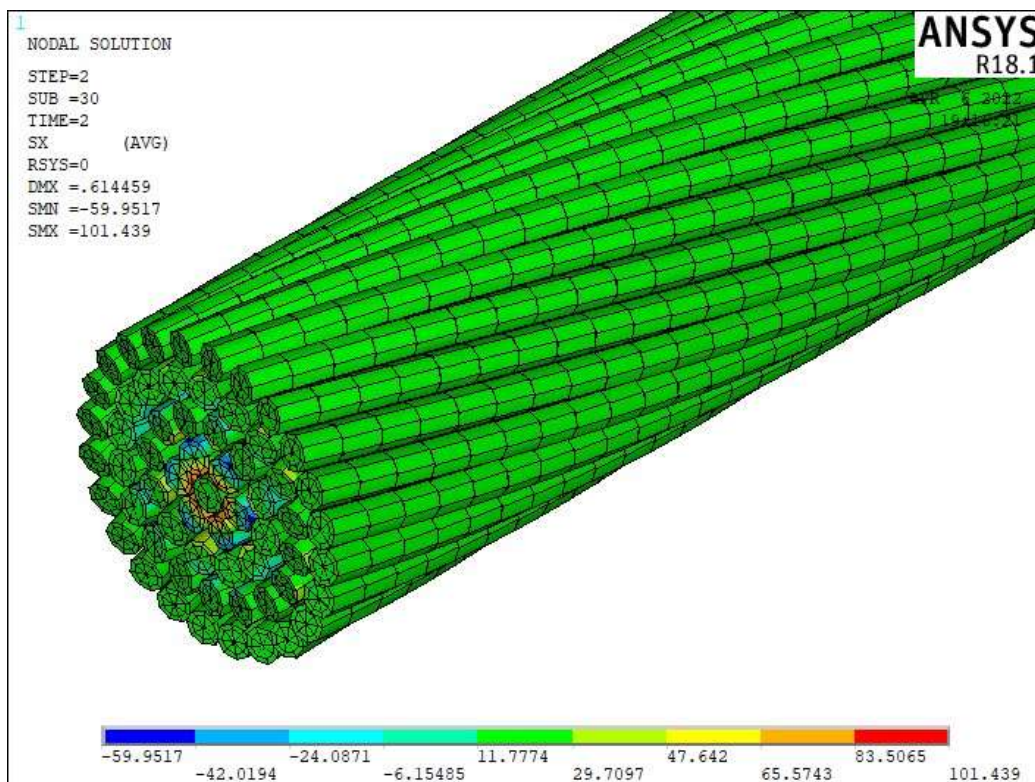


Figura 4.24: Tensão Normal no Condutor com $V_w = 0, 5m/s$ e $T = 20\%$ UTS.

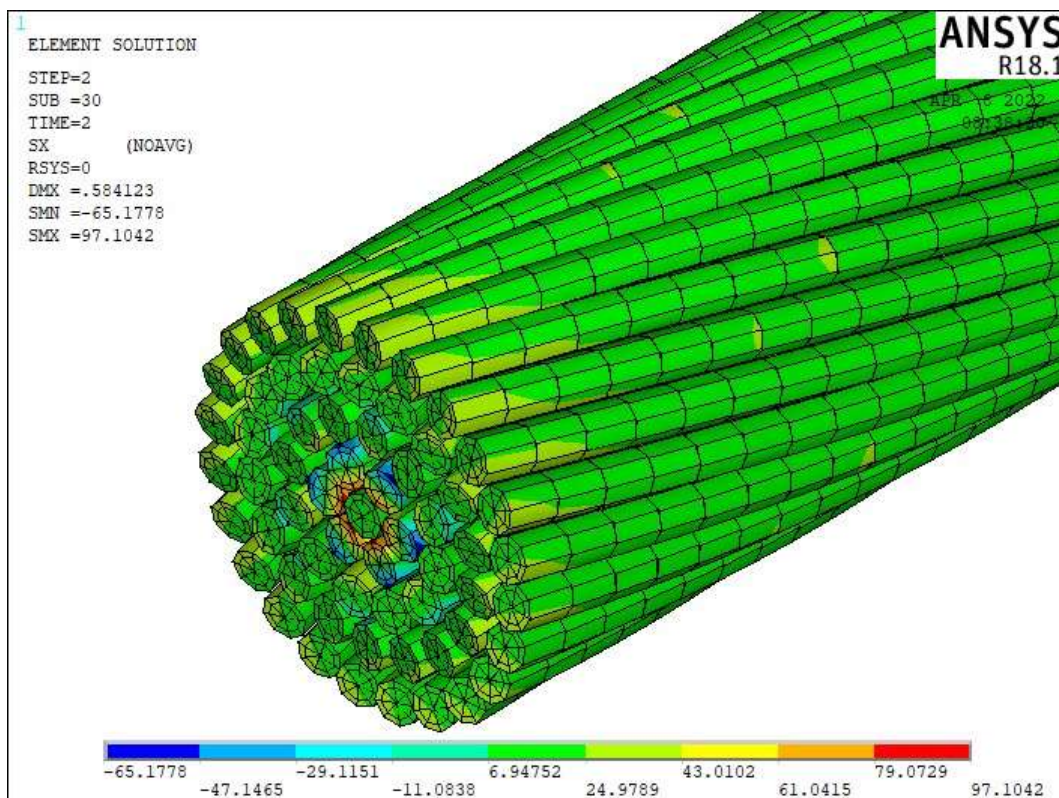


Figura 4.25: Tensão Normal no Condutor com $V_w = 2, 5m/s$ e $T = 20\%$ UTS.

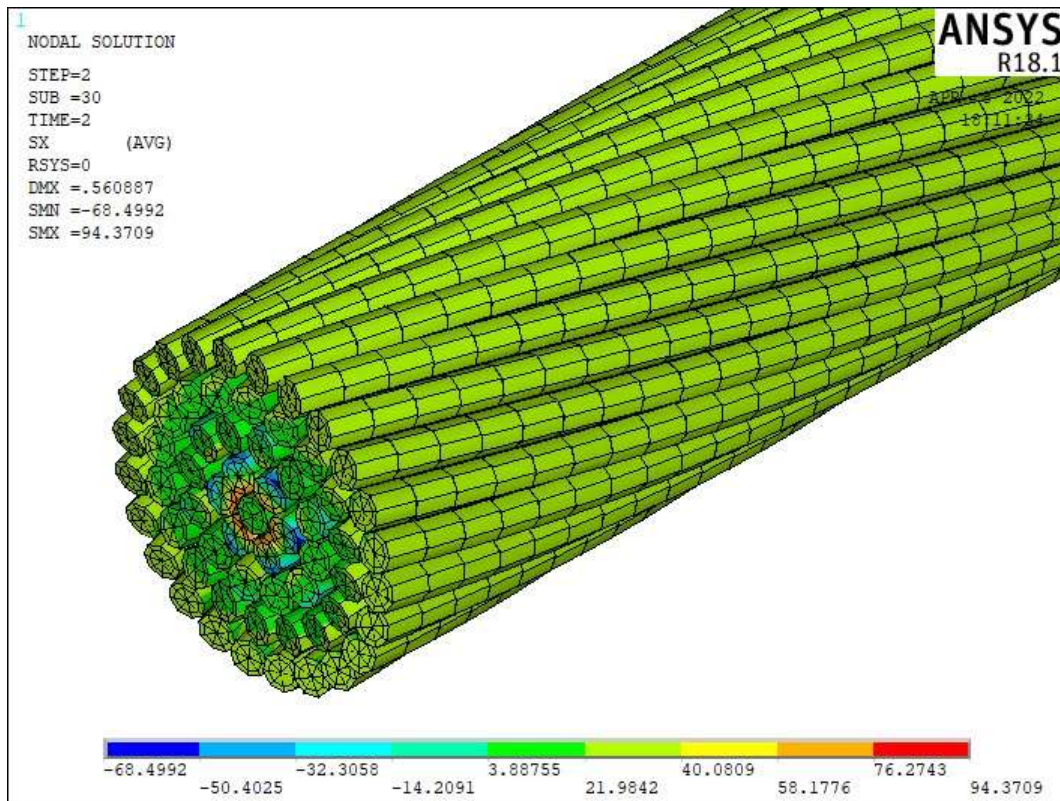


Figura 4.26: Tensão Normal no Condutor com $V_w = 4, 5m/s$ e $T = 20\%$ UTS.

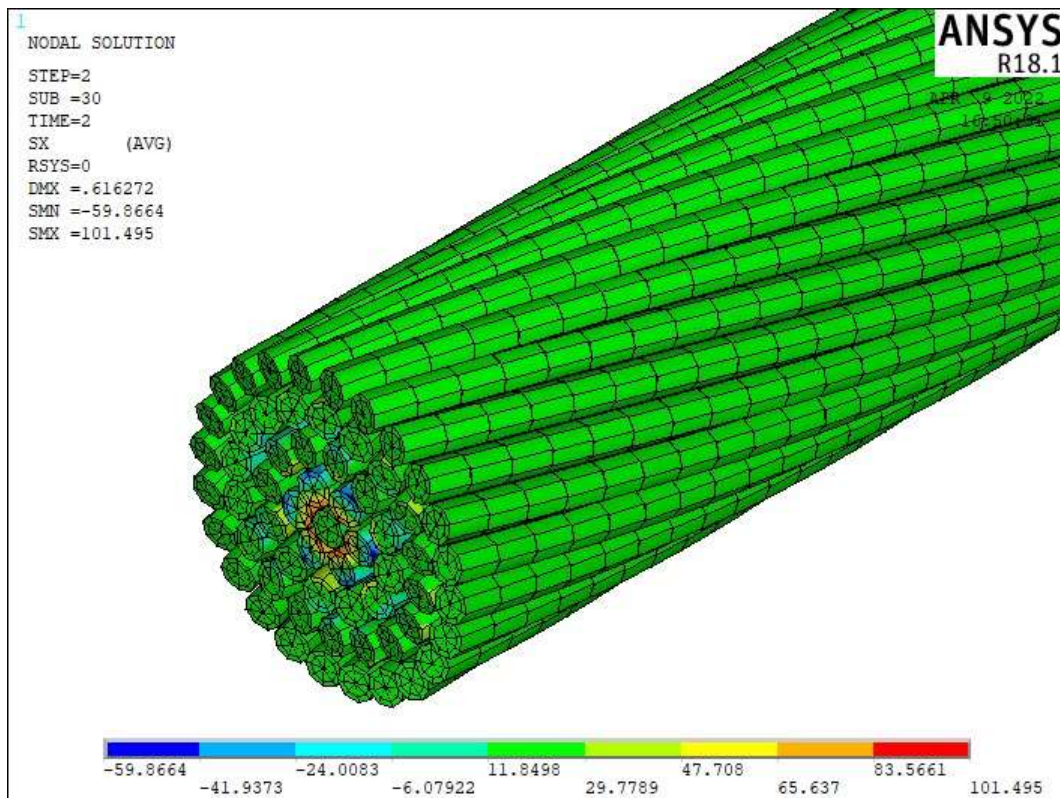


Figura 4.27: Tensão Normal no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ e $T = 20\%$ UTS.

4.2.2.3 Tensões Normais para $T = 30\%$ UTS

As figuras mostram o comportamento da tensão normal no condutor na extremidade onde a força de tração de $16033,41N$ é aplicada, em $z = 400mm$.

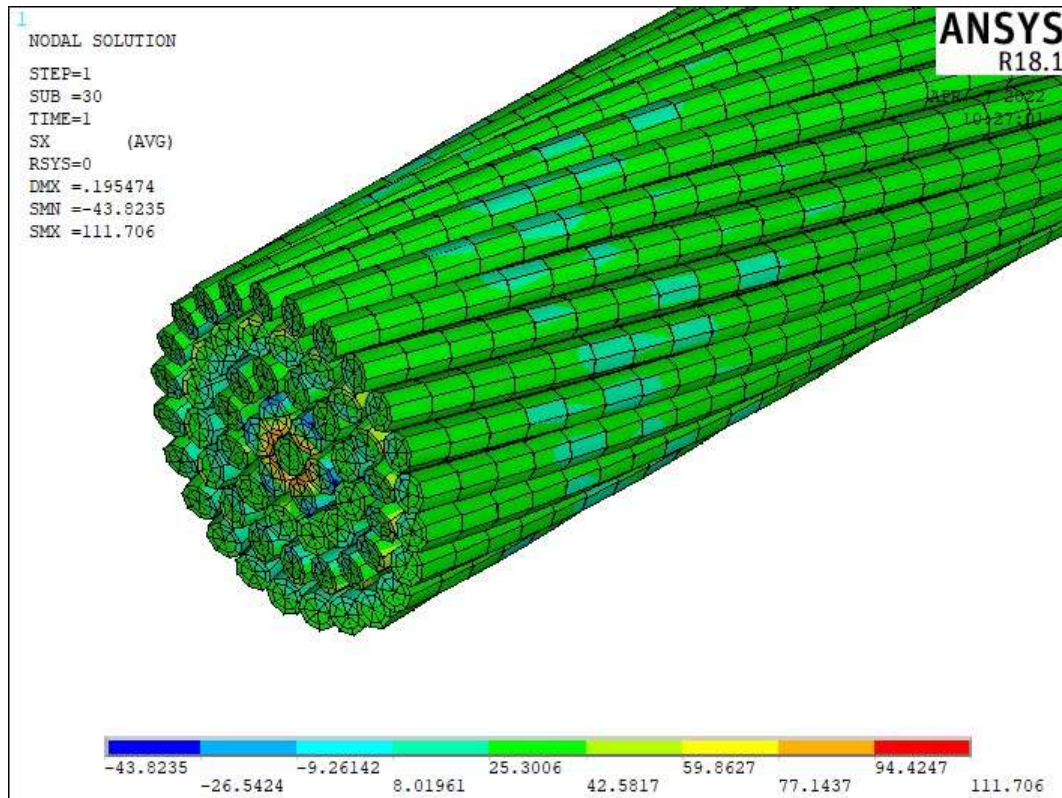


Figura 4.28: Tensão Normal no Condutor a Temperatura Ambiente com $T = 30\%$ UTS.

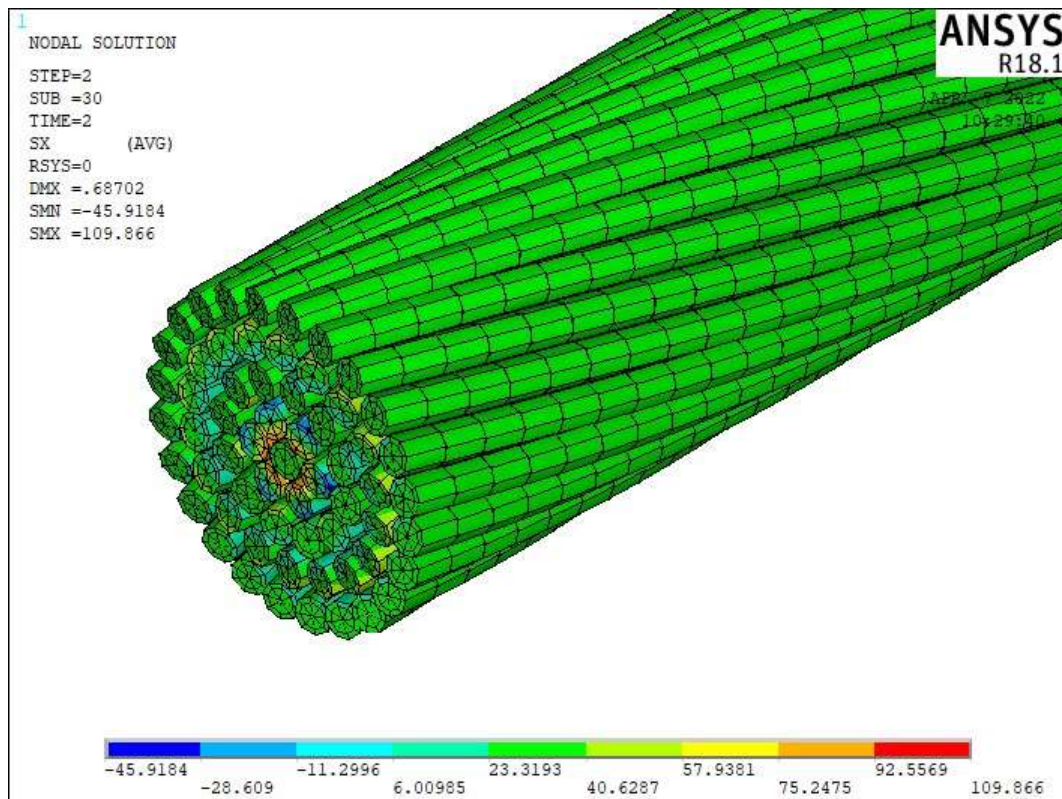


Figura 4.29: Tensão Normal no Condutor com $V_w = 0, 5m/s$ e $T = 30\%$ UTS.

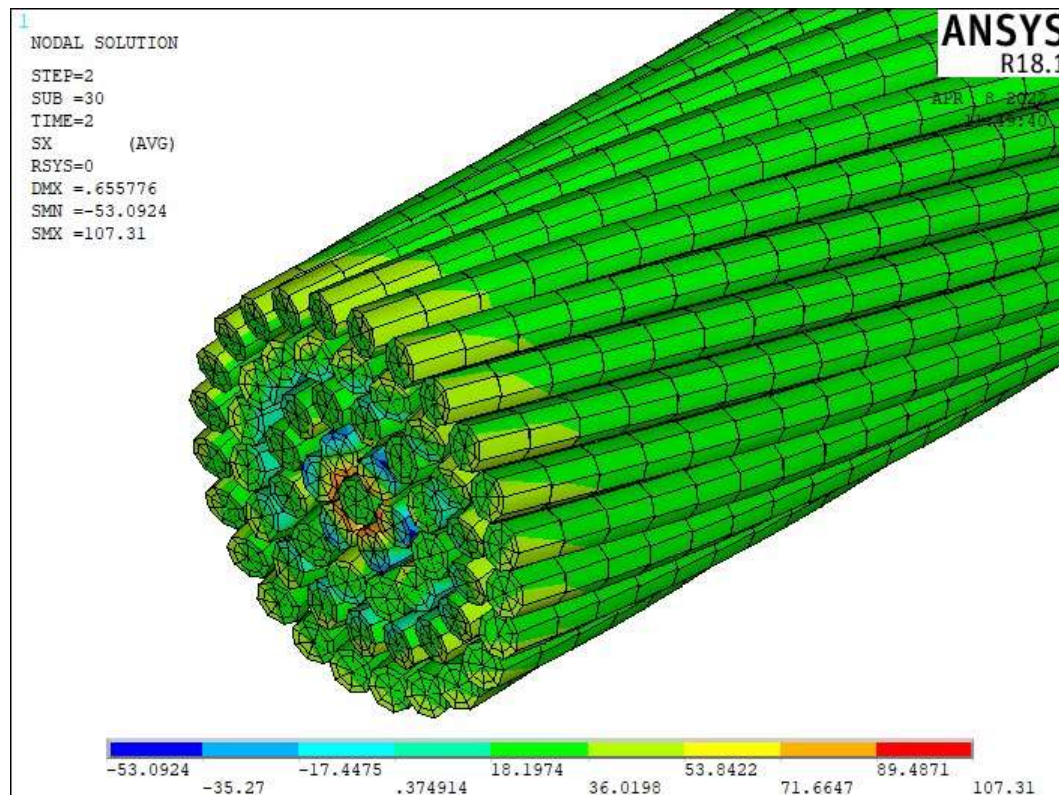


Figura 4.30: Tensão Normal no Condutor com $V_w = 2, 5m/s$ e $T = 30\%$ UTS.

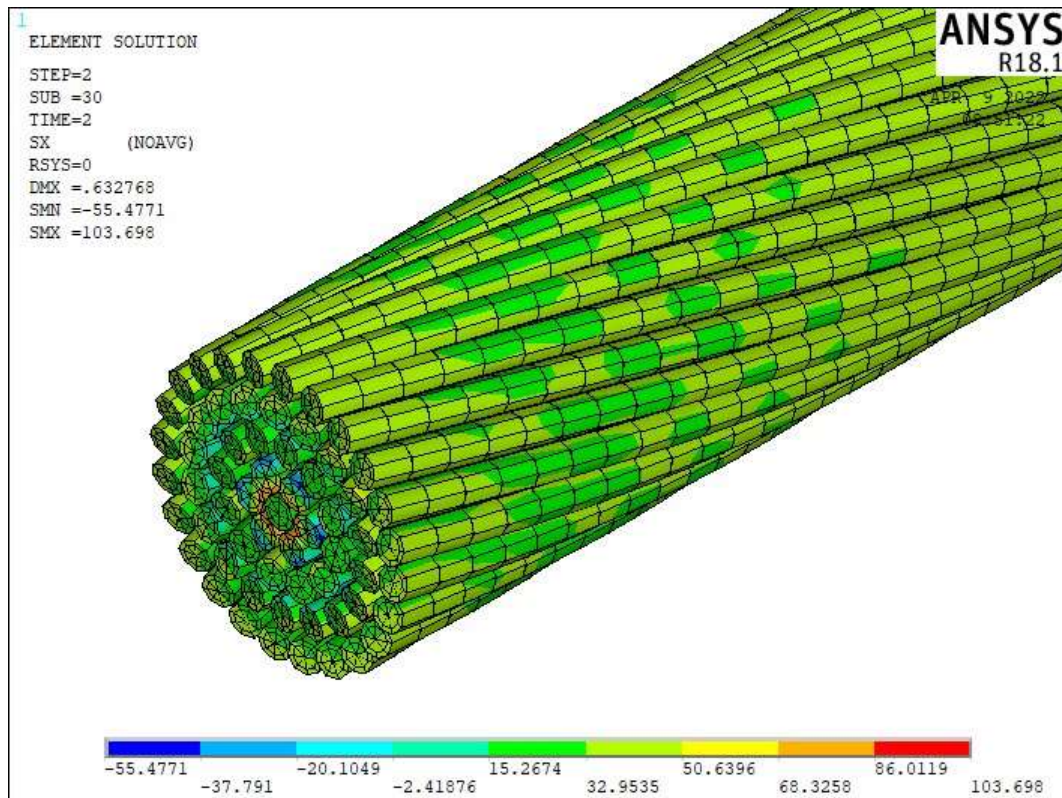


Figura 4.31: Tensão Normal no Condutor com $V_w = 4,5 m/s$ e $T = 30\%$ UTS.

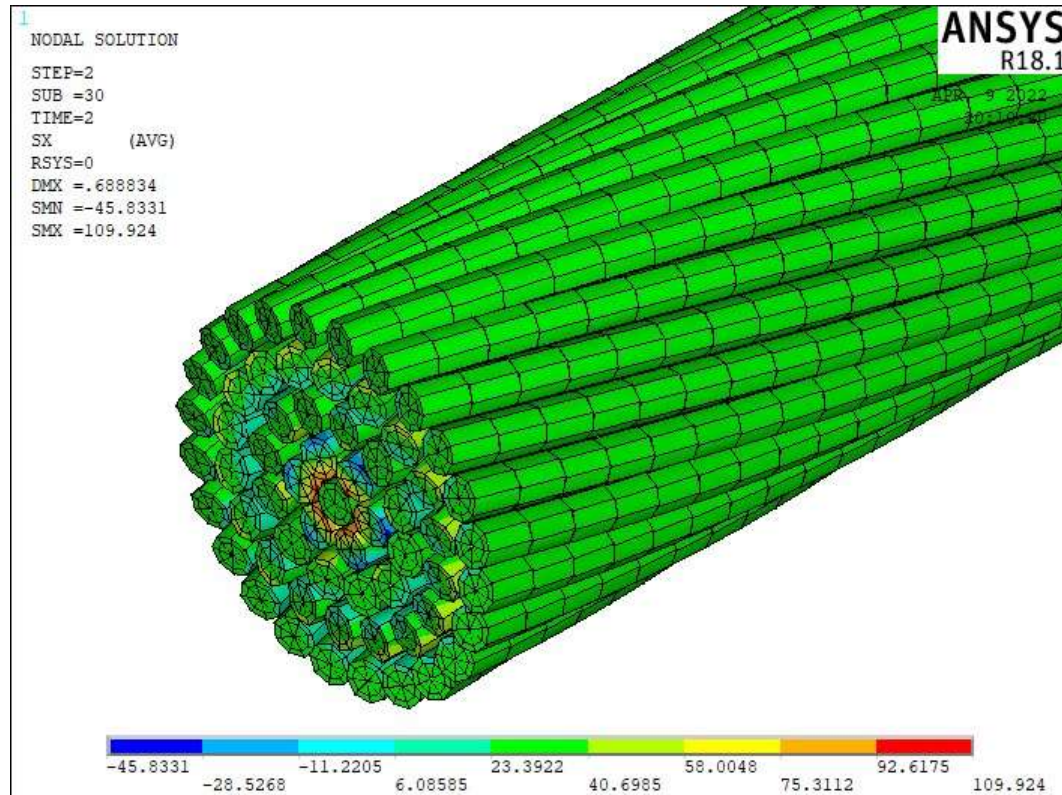


Figura 4.32: Tensão Normal no Condutor com $I = 30\%I_{ccc} - > 200\%I_{ccc}$ e $T = 30\%$ UTS.

4.3 Análise dos Resultados

Foram apresentadas no subcapítulo 4.2 os resultados do deslocamento e da tensão normal na extremidade do condutor, onde $z = 400\text{mm}$. A tabela 4.1 e a figura 4.33 exibem os resultados de deslocamento para cada nível de tração de esticamento.

Tabela 4.1: Deslocamento na Extremidade do Condutor.

| | T = 10% UTS | T = 20% UTS | $\Delta(T_{20\%} - T_{10\%})$ | T = 30% UTS | $\Delta(T_{30\%} - T_{20\%})$ |
|--------------------------------------------|---------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|
| Em temperatura ambiente | 0,05 mm (#1) | 0,12 mm (#2) | 0,07 mm | 0,19 mm (#3) | 0,07 mm |
| $V_w = 0, 5\text{m/s}$ | 0,54 mm (#4) | 0,61 mm (#5) | 0,07 mm | 0,69 mm (#6) | 0,08 mm |
| $V_w = 2, 5\text{m/s}$ | 0,51 mm (#7) | 0,58 mm (#8) | 0,07 mm | 0,66 mm (#9) | 0,08 mm |
| $V_w = 4, 5\text{m/s}$ | 0,49 mm (#10) | 0,56 mm (#11) | 0,07 mm | 0,63 mm (#12) | 0,07 mm |
| $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ | 0,54 mm (#13) | 0,62 mm (#14) | 0,08 mm | 0,69 mm (#15) | 0,07 mm |

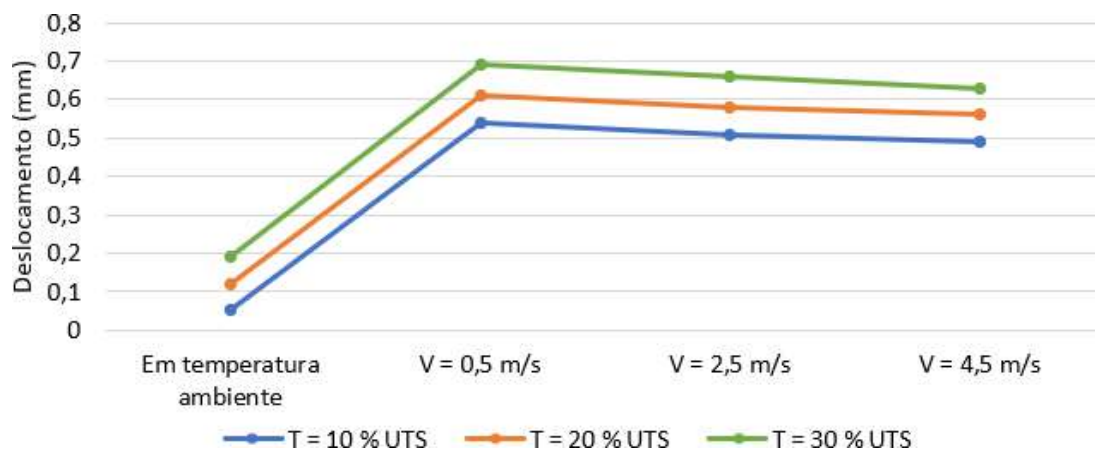


Figura 4.33: Deslocamento do Condutor Considerando o Efeito da Carga de Tração e o Vento.

Segundo IEEE (2013), um condutor homogêneo de alumínio em temperatura constante, terá um alongamento a uma taxa linear com o aumento da tração. Nesse caso, o aumento da tração de esticamento gerou basicamente o mesmo acréscimo no deslocamento independente da condição climática e operacional, conforme colunas 4 e 6 da tabela 4.1.

Analisando os deslocamentos do cabo considerando o efeito combinado da carga de esticamento e a temperatura, observa-se que o fator mais importante para o deslocamento

do condutor é a temperatura. Especificamente, os testes computacionais realizados a 10% de UTS com efeito da temperatura (testes #4, #7, #10 e #13) apresentaram deslocamentos da aproximadamente 9 vezes maior que o deslocamento a temperatura ambiente (teste #1). Aumentando-se a carga de tração no cabo para 30% de UTS, o aumento do deslocamento nas simulações com efeito da temperatura (#6, #9, #12, #15) foi de aproximadamente 3,5 vezes maior que o deslocamento a temperatura ambiente (#3). Mostrando que com o aumento da carga de tração, há uma diminuição relativa do efeito da temperatura no deslocamento total do cabo. Por fim, observa-se que o aumento da velocidade do vento causa uma redução variando entre 10% a 8,7% nos deslocamentos do cabo para os níveis de 10% e 30% de UTS, testes #10 e #4 e testes #12 e #6, respectivamente. Essa redução ocorre devido a um maior resfriamento do cabo, sobretudo nas camadas mais externas.

Isso tudo evidencia que o fator mais influente na dilatação do condutor é a sua temperatura de trabalho, dado que o condutor usado nesse estudo é feito totalmente de liga de alumínio, que possui grande coeficiente de dilatação térmica em comparação a outros materiais tipicamente usados em cabos condutores, como, por exemplo, o aço, que expande termicamente a uma taxa de cerca de 50% menor que o alumínio (IEEE, 2013).

Nas figuras 4.34 a 4.38, estão apresentadas as tensões médias dos fios ao longo do comprimento do condutor, em função da carga de esticamento e da velocidade de vento, do núcleo à quarta camada, respectivamente. Os resultados das simulações com $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ foram muito similares àqueles das simulações com $V_w = 0, 5m/s$, por isso foram ocultados dos gráficos. Isso ocorreu, pois, o gradiente de temperatura que acontece no condutor ao sofrer um aumento da corrente de 30% a 200% da ampacidade é análogo ao gradiente presente nessa velocidade do vento.

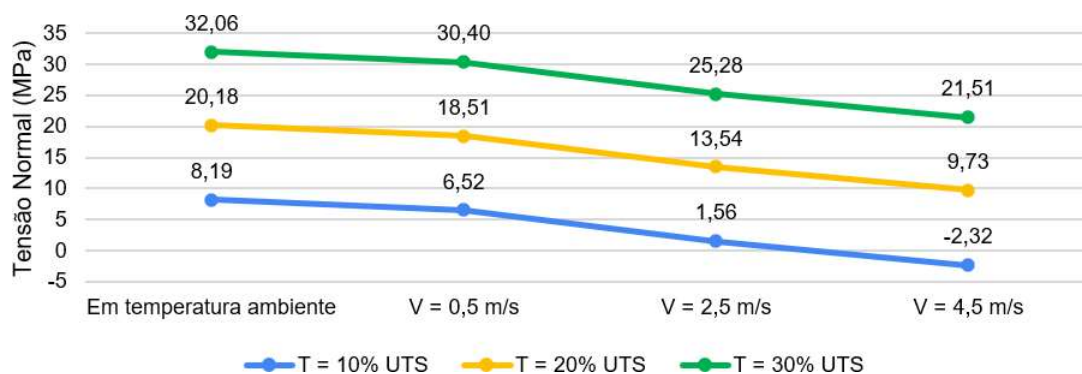


Figura 4.34: Tensões Normais no Núcleo em Função da Velocidade do Vento.

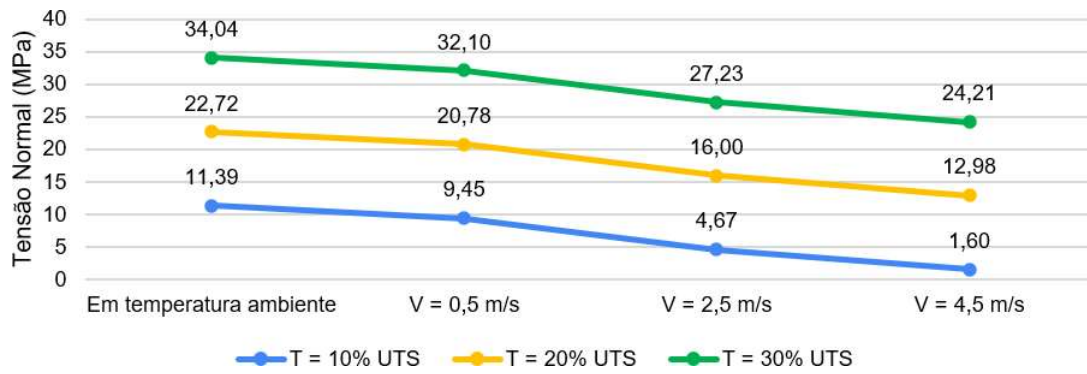


Figura 4.35: Tensões Normais na 1ª Camada em Função da Velocidade do Vento.

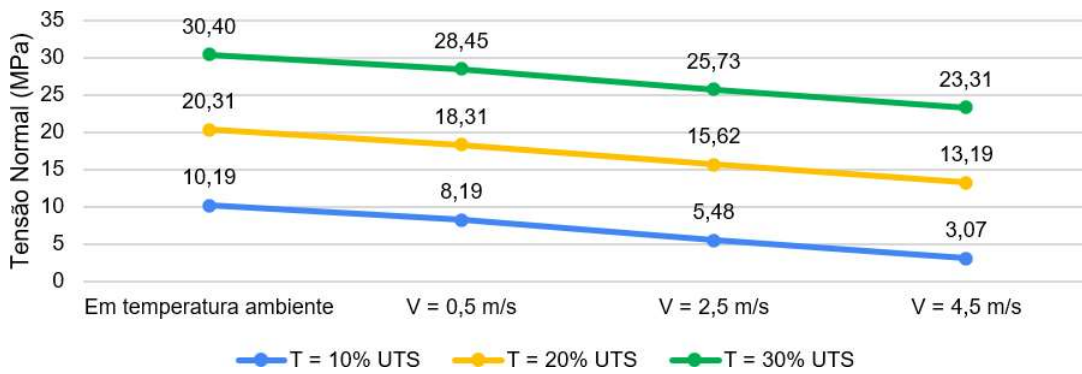


Figura 4.36: Tensões Normais na 2ª Camada em Função da Velocidade do Vento.

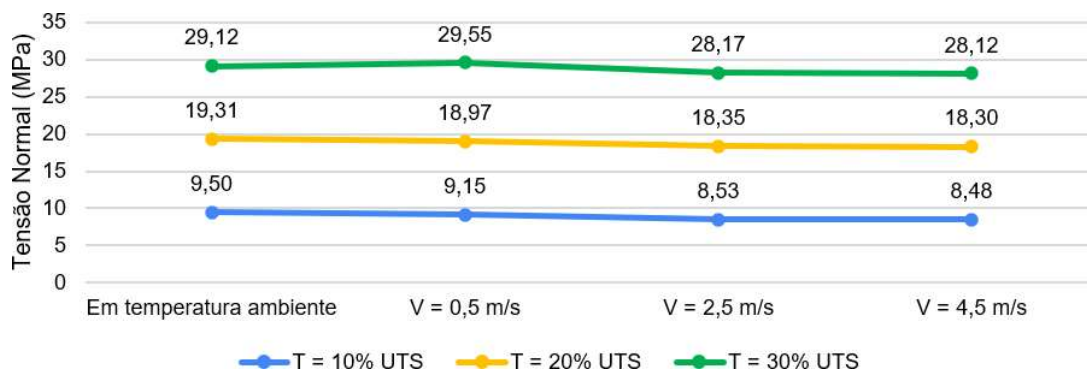


Figura 4.37: Tensões Normais na 3ª Camada em Função da Velocidade do Vento.

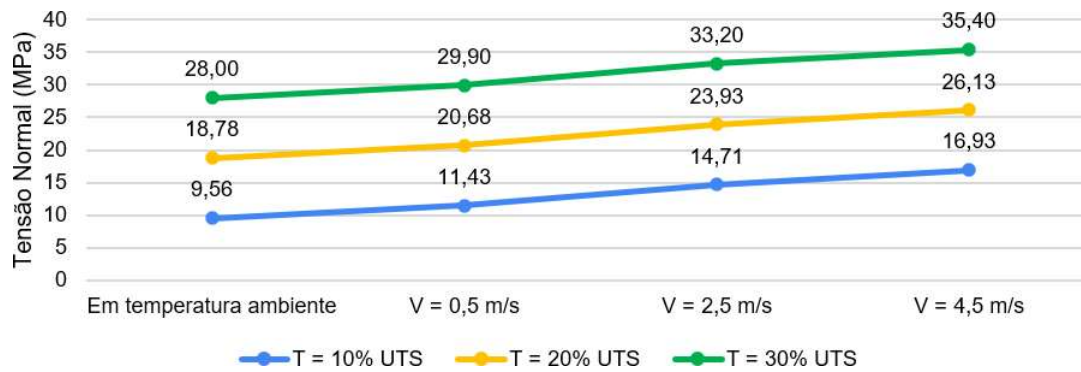


Figura 4.38: Tensões Normais na 4ª Camada em Função da Velocidade do Vento.

Inicialmente, verifica-se que em temperatura ambiente, as tensões nos fios do núcleo e das camadas têm a mesma ordem de grandeza, para uma mesma carga de tração. Com a ocorrência de gradientes de temperatura no cabo devido ao vento, causando um resfriamento das camadas mais externas em direção ao centro do cabo, observou-se redistribuição de tensões nos fios. O núcleo e as camadas mais internas (1 e 2) apresentaram redução na tensão normal dos fios. Nesse caso, observa-se que fio do núcleo quando submetido a uma carga de tração de 10% de UTS passa a ficar comprimido na condição de maior resfriamento do cabo ($V_w = 4,5 \text{ m/s}$). A terceira camada não teve alterações significativas nas tensões, enquanto que a última camada apresentou acréscimos significativos de tensão. Esse fato pode ser justificado pela hiperestaticidade do conjunto. Pois, com o resfriamento da última camada, há uma tendência de encurtamento relativo da última camada em relação às demais. Porém, como há restrição ao movimento, surgem tensões de tração adicionais ocasionando o aumento de tensões nos fios da última camada.

A figura 4.39 exibe a média da variação da tensão no condutor a cada acréscimo de $0,5 \text{ m/s}$ na velocidade do vento. Para gerar esse gráfico, a simulação com o condutor a temperatura ambiente foi considerada como $V_w = 0 \text{ m/s}$. Foi calculada a diferença de tensão entre as simulações com gradiente de temperatura e aquelas em temperatura ambiente. Em seguida, o resultado foi dividido por 5 no caso de $V_w = 2,5 \text{ m/s}$ e por 9 no caso de $V_w = 4,5 \text{ m/s}$, a fim de ambos refletirem as tensões para o mesmo intervalo de acréscimo da velocidade do vento. Por último, foi feito a médias desses resultados.

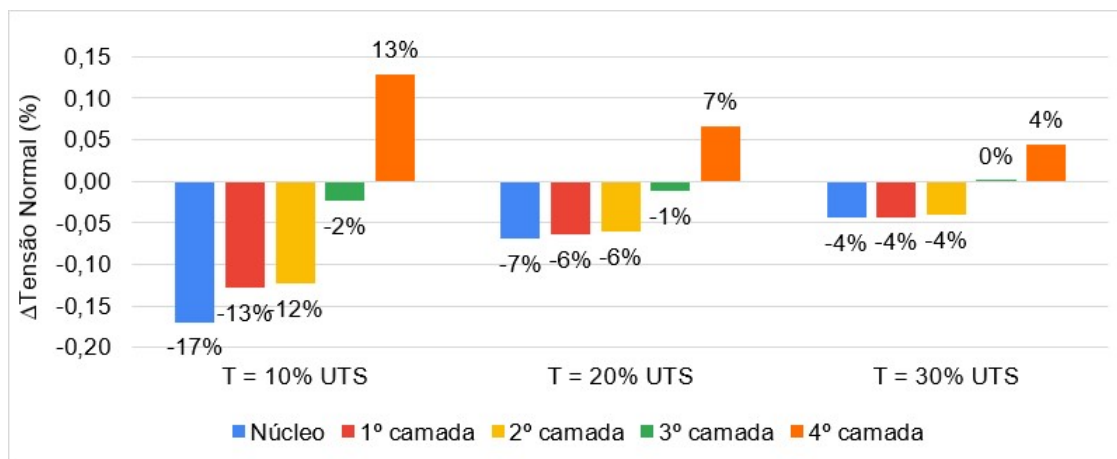


Figura 4.39: Variação Média da Tensão Normal a Cada Aumento de 0,5 m/s na Velocidade do Vento.

A figura 4.39 ilustra a redistribuição das tensões nos fios devido ao efeito da temperatura, onde o núcleo e as duas primeiras camadas apresentam redução de tensão, a terceira camada permanece praticamente alterada e aumento de tensão na camada mais externa. Além disso, observa-se que o aumento de tensão na camada mais externa é mais significativo para as menores cargas de esticamento do condutor.

Um estudo experimental feito por Bedialauneta et al. (2012) mostra que a elevação da temperatura média do condutor gera significante redução na carga de tração sentida pelo condutor. No presente estudo, não foram coletadas as cargas presentes nos elementos, somente tensão e deslocamento. No entanto, a redução da carga de tração presente no estudo de Bedialauneta et al. (2012) gera redução na tensão média do condutor. A figura 4.40 mostra a tensão média no condutor para cada simulação. A referida figura evidencia o alívio de tensões gerado no condutor conforme há o aumento do gradiente de temperatura (maior velocidade do vento) independentemente da carga de tração aplicada, em conformidade com os resultados de Bedialauneta et al. (2012).

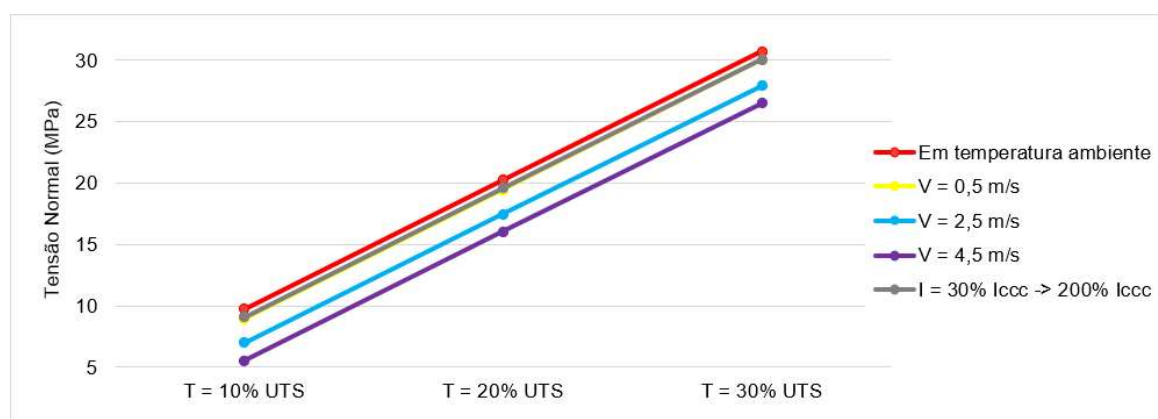


Figura 4.40: Tensão Média no Condutor.

Juntamente a esse gráfico, foram obtidos os desvios padrões da tensão média de cada camada, na tabela 4.2. Nota-se na tabela que o desvio padrão em $V_w = 4, 5m/s$ é consideravelmente maior que nas outras simulações. Isso pode ser justificado pelo fato dessas simulações possuírem gradiente de temperatura maior e, conseqüentemente, a distribuição da tensão do condutor de alumínio nas camadas é de forma não uniforme (IEEE, 2013).

Tabela 4.2: Desvio Padrão das Tensões Médias das Camadas do Condutor.

| Força | Em temperatura ambiente | $V_w = 0, 5m/s$ | $V_w = 2, 5m/s$ | $V_w = 4, 5m/s$ | $I = 30\%I_{ccc} \rightarrow 200\%I_{ccc}$ |
|-------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------|
| T = 10% UTS | 1,2 | 1,8 | 5,0 | 7,4 | 1,5 |
| T = 20% UTS | 1,5 | 1,2 | 4,0 | 6,4 | 0,9 |
| T = 30% UTS | 2,4 | 1,3 | 3,2 | 5,5 | 1,4 |

Capítulo 5

Conclusão

No presente trabalho, foram feitas simulações computacionais em um condutor de liga de alumínio sujeito a carga de tração, considerando seu gradiente interno de temperatura, equivalentes a diferentes condições ambientais e operacionais. Os resultados de deslocamento na extremidade, tensões nas camadas e tensão média no condutor foram analisados.

Os deslocamentos da extremidade do condutor à temperatura ambiente, para diferentes cargas de esticamento, mostraram-se consideravelmente menores que os deslocamentos apresentados pelos gradientes de temperatura que correspondem a diversas condições ambientais e de operação do condutor. Esse fato demonstra que o efeito da temperatura é preponderante sobre a carga de esticamento, devido ao elevado coeficiente de dilatação térmica do alumínio. Entretanto, para as condições ambientais e de operação estudadas, o efeito da temperatura sobre o deslocamento do cabo tende a reduzir-se com o aumento da carga de esticamento do condutor.

Em relação às tensões, foi observado que o aumento da velocidade de vento (ou do gradiente de temperatura com resfriamento das camadas externas em direção ao centro do cabo) gera diminuição das tensões normais nos fios do núcleo e das duas primeiras camadas, onde a terceira camada permanece praticamente inalterada, enquanto que há um acréscimo de tensões na última camada. Esse fato pode ser justificado pela hiperestaticidade do conjunto. Pois, com o resfriamento da última camada, há uma tendência de encurtamento relativo da última camada em relação às demais. Porém, como há restrição ao movimento, surgem tensões de tração adicionais ocasionando o aumento de tensões nos fios da última camada. No entanto, esse efeito é mais relevante para menores cargas de tração no condutor.

Em relação às tensões médias, verificou-se que o aumento da carga de esticamento gera um aumento linear da tensão média no condutor, enquanto que o aumento do gradiente de temperatura gera uma redução dessa tensão, figura 4.40. Em relação à variação da tensão

normal ao longo da seção transversal, o aumento do gradiente de temperatura com o resfriamento maior em direção ao centro do cabo provoca uma maior variação das tensões na seção.

Apesar do caráter introdutório da pesquisa, foi demonstrado a importância da consideração do efeito da temperatura nas tensões do condutor. O aumento das tensões nos fios da última camada do condutor que normalmente é a camada que é, em geral, a mais suscetível a falha por fadiga justifica a continuidade dos estudos considerando carregamentos de flexo-tração conjuntamente com o efeito térmico. Por fim, sugere-se a condução de um estudo de tensão considerando o efeito térmico em condutores do tipo ACSR (condutor de alumínio reforçado de aço), onde as diferenças entre os coeficientes de dilatação térmica e de módulos de elasticidade dos dois materiais pode acentuar esses efeitos.

Referências Bibliográficas

- (Abbasi e Aman, 2018) ABBASI, M.; AMAN, E. Sag-tension analysis of aaac overhead transmission lines for hilly areas. *International Journal of Computer Science and Information Security*, v. 16, p. 111–114, 12 2018.
- (Abbasi et al., 2018) ABBASI, M. et al. An investigation of temperature and wind impact on acsr transmission line sag and tension. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, Vol 8,, 06 2018.
- (ABNT, 1995) ABNT. *NBR 5422/1985, Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica: Procedimento*: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica: Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995.
- (Ansys, 2020) ANSYS. *Ansys apdl user's guide, 2020r1*. 2020. Disponível em: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/ans_elem/Hlp_E_TARGE170.html>. Acesso em: 23 out. 2021.
- (Ansys, 2020) ANSYS. *Thermal Strain*. (S.l.): Ansys Innovation Courses, 2020.
- (Armstrong e Southern, 2018) ARMSTRONG, O.; SOUTHERN, G. Low wind speed occurrences and aging conductors: More than just a sag problem? In: . (S.l.: s.n.), 2018. p. 1–5.
- (BAUMANN e NOVAK, 2017) BAUMANN, R.; NOVAK, P. Efficient computation and experimental. *Cigré Science Engineering*, p. 5–16, 2017.
- (Bedialauneta et al., 2012) BEDIALAUNETA, M. T. et al. Monitoring the tension and the temperature in an overhead line. In: *2012 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*. (S.l.: s.n.), 2012. p. 245–248.
- (Callister e Soares, 2008) CALLISTER, W.; SOARES, S. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. (S.l.): Livros Técnicos e Científicos, 2008. ISBN 9788521615958.
- (Cardou, 2013) CARDOU, A. *Stick-slip Mechanical Models for Overhead Electrical Con-*

- ductors in Bending; with MatLab Applications*. (S.l.): Alian Cardou, 2013. ISBN 9782981233721.
- (Chen et al., 2012)CHEN, G. et al. Damage investigation of the aged aluminium cable steel reinforced (acsr) conductors in a high-voltage transmission line. *Engineering Failure Analysis*, v. 19, p. 13–21, 01 2012.
- (CIGRE, 2002)CIGRE. *WG 22:12:TB 207, Thermal Behaviour of Overhead Conductors: Thermal behaviour of overhead conductors*. Paris: (s.n.), 2002.
- (CIGRE, 2014)CIGRE. *WG B2-42-601: guide for thermal rating calculations of overhead lines*. 2014.
- (CIGRE, 2017)CIGRE. *Overhead Lines (CIGRE Green Books)*. (S.l.): SPRINGER REFERENCE, 2017.
- (Costa et al., 2020)COSTA, E. et al. Development of controlled heating for fatigue test in overhead conductors at high temperature. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 42, 07 2020.
- (Dastous, 2005)DASTOUS, J.-B. Nonlinear finite-element analysis of stranded conductors with variable bending stiffness using the tangent stiffness method. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 20, p. 328 – 338, 02 2005.
- (Feyrer, 2007)FEYRER, K. K. *Wire ropes : tension, endurance, reliability*. (S.l.): Springer, 2007.
- (Havard et al., 1992)HAVARD, D. et al. Aged acsr conductors. ii. prediction of remaining life. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 7, p. 588 – 595, 05 1992.
- (IEC, 2015)IEC. *62568:2015*. (S.l.): Overhead lines—method for fatigue testing of conductors Lignes, 2015.
- (IEEE, 2013)IEEE. Ieee guide for determining the effects of high-temperature operation on conductors, connectors, and accessories. *IEEE Std 1283-2013 (Revision of IEEE Std 1283-2004)*, p. 1–47, 2013.
- (Incropera e DeWitt, 2005)INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4th edition. ed. New York City, New York: John Wiley Sons, Inc., 2005.
- (Judge et al., 2012)JUDGE, R. et al. Full 3d finite element modelling of spiral strand cables. *Construction and Building Materials*, v. 35, p. 452–459, 10 2012.
- (JUNIOR, 2021)JUNIOR, J. F. d. S. *Formulação e Validação de Modelo Numérico para Cabos Condutores de Energia Baseados em Elementos Finitos de Viga*. 102 p.

Dissertação (Tese de Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

(Kalentev et al., 2017)KALENTEV, E. et al. Numerical analysis of the stress-strain state of a rope strand with linear contact under tension and torsion loading conditions. *Advances in Science and Technology Research Journal*, v. 11, p. 231–239, 06 2017.

(Kang, Strobach e Franck ,2013)KANG, M.; STROBACH, M. M.; FRANCK, C. M. C. M. Radial temperature distribution of aac overhead line in stationary and transient conditions. *18th international symposium on High Voltage Engeneering*, 2013.

(Kiessling et al., 2003)KIESSLING, F. et al. *Overhead Power Lines*. (S.l.: s.n.), 2003. ISBN978-3-642-05556-0.

(Kopsidas et al., 2010)KOPSIDAS, K. et al. Power transfer capacity improvements of existing overhead line systems. In: . (S.l.: s.n.), 2010. p. 1 – 5.

(Lalonde, Guilbault e Langlois, 2016)LALONDE, S.; GUILBAULT, R.; LANGLOIS, S. Modeling multilayered wire strands, a strategy based on 3d finite element beam-to-beam contacts - part ii: Application to wind-induced vibration and fatigue analysis of overhead conductors. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 126, 12 2016.

(Lalonde, Guilbault e Legeron, 2016)LALONDE, S.; GUILBAULT, R.; LEGERON, F. Modeling multilayered wire strands, a strategy based on 3d finite element beam-to-beam contacts - part i: Model formulation and validation. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 126, 12 2016.

(Langlois, Legeron e Lévesque, 2014)LANGLOIS, S.; LEGERON, F.; LÉVESQUE, F. Time history modeling of vibrations on overhead conductors with variable bending stiffness. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 29, p. 607–614, 04 2014.

(MA, GE e ZHANG, 2008)MA, J.; GE, S.-r.; ZHANG, D.-k. Distribution of wire deformation within strands of wire ropes. *Journal of China University of Mining and Technology*, v. 18, p. 475–478, 09 2008.

(Maduro-Abreu et al., 2010)MADURO-ABREU, A. et al. *Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão*. 1ª. ed. (S.l.): Teixeira Gráfica e Editora, 2010. 372 p.

(NAKAI et al., 1975)NAKAI, M. et al. On the creep and the relaxation of spiral ropes. *Bulletin of JSME*, v. 18, n. 125, p. 1308–1314, 1975.

(Nawrocki e Labrosse, 2000)NAWROCKI, A.; LABROSSE, M. Finite element model for simple straight wire rope strands. *Computers Structures*, v. 77, p. 345–359, 07 2000.

- (Papailiou, 1995)PAPAILIOU, K. Bending of helically twisted cables under variable bendingstiffness due to internal friction, tensile force and cable curvature. 10 1995.
- (Paradis e Legeron, 2011)PARADIS, J.; LEGERON, F. Modelling of the free bending behavior of a multilayer cable taking into account the tangential compliance of contact interfaces. *Proceedings of the 9th international symposium on cable dynamics, October 18-20, 2011, Shanghai, China*, 01 2011.
- (Pedrosa, 2021) PEDROSA, B. J. *Análise Computacional de Esforços em Cabos Condutores de Linhas de Transmissão*. 98 p. Dissertação (Monografia) — Universidade de Brasília, São Paulo, 2021.
- (Poffenberger e Swart, 1965)POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. Differential displacement and dynamic conductor strain. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 84, n. 4, p. 281–289, 1965.
- (Rodrigues, 2021)RODRIGUES, R. L. d. S. *Análise da influência da temperatura na vida em fadiga de cabos condutores de energia em alumínio liga (CAL) 6201-T81*. 112 p. Dissertação (Tese de Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.
- (Stanová et al., 2011)STANOVÁ, E. et al. Computer modelling of wire strands and ropes part ii: Finite element-based applications. *Advances in Engineering Software*, v. 42, p. 322–331, 06 2011.
- (Wu, 2014)WU, J. J. The finite element modeling of spiral ropes. *International Journal of Coal Science Technology*, v. 1, p. 346–355, 09 2014.