

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Especialização e Soldagem e Qualificação

Pedro Aparecido da Silva
Fabiano Fernandes Campos

**ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DO PROJETO DE UMA VIGA EM FILTRO
PRENSA DE GRANDE PORTE APÓS FALHA UTILIZANDO MÉTODO
POR ELEMENTOS FINITOS.**

Belo Horizonte
2020

Pedro Aparecido da Silva
Fabiano Fernandes Campos

**ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DO PROJETO DE UMA VIGA EM FILTRO
PRENSA DE GRANDE PORTE APÓS FALHA UTILIZANDO MÉTODO
POR ELEMENTOS FINITOS.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Especialização
Soldagem e Qualificação Universidade
Federal de Minas Gerais – UFMG, como
requisito parcial para obtenção do título
Especialista em Soldagem.
Orientador Tutor: Ariel Rodriguez Arias.

Belo Horizonte
2020

Silva, Pedro Aparecido da; Campos, Fabiano Fernandes.

S586a Análise e verificação do projeto de uma viga em filtro prensa de grande porte após falha utilizando método por elementos finitos [recurso eletrônico] / Pedro Aparecido da Silva; Fabiano Fernandes Campos. – 2020.

1 recurso online (100 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Ariel Rodriguez Arias.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”

Anexos: f. 92-100.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Soldagem. 2. Engenharia mecânica. 3. Método dos elementos finitos. 4. Projetos. 5. Vigas. I. Arias, Ariel Rodríguez. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Curso de Especialização em Soldagem

Ata 02ª/2020 da Defesa de Monografia de Especialização

No dia 15 de julho de 2020, às 10:00 h, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: " ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DO PROJETO DE UMA VIGA EM FILTRO PRENSA DE GRANDE PORTE APÓS FALHA UTILIZANDO MÉTODO POR ELEMENTOS FINITOS".

Aluno: FABIANO FERNANDES CAMPOS – Matrícula: 2018701023
PEDRO APARECIDO DA SILVA – Matrícula: 2018701198

Local: Remotamente via plataforma "TEAMS".

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 60 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 30 minutos, é de parecer FAVORÁVEL à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 90 (noventa) e COM (com ou sem) sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 60 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias.

Assinaturas:

Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias
DEMEC/UFMG – Orientador

Prof. Dr. Alexandre Q. Bracarense
DEMEC/UFMG - Avaliador

Aluno: Fabiano Fernandes Campos

Aluno: Pedro Aparecido Da Silva

RESUMO

Com o aumento do volume de rejeitos gerados no processo de beneficiamento de minério de ferro e estimulado pela lavra crescente de jazidas com menor teor metálico, tem se despertado o interesse de se estudar novos métodos para tratar rejeito do processo de beneficiamento. Motivado pelo aumento da necessidade de não se usar mais barragens rejeito em mineração e com a premissa de recuperar de água no processo, foi implantada a ideia de se usar sistema do tipo filtro prensa em mineradora de grande porte na região central de Minas Gerais. Mas em função da escala, ainda inédita no Brasil e no mundo para minério de ferro, problemas de engenharia surgiram no piloto montado, tendo de ser resolvidos. Um destes problemas e a quebra por fadiga (precoce), surgida ao longo das vigas longitudinais após carregamento por força hidráulica de travamento nos testes de performance. Sendo as vigas elementos estruturais importantes do equipamento, precisaram ser analisadas para a identificação da causa raiz com base nas análises de ferramenta computacional (CAE/MEF), devido à complexidade do projeto e as possíveis soluções, sendo o objetivo deste trabalho de Conclusão de Curso de Especialização.

Palavras-chave: *Engenharia Mecânica, *Filtro Prensa, *Recuperação Viga, *Projeto.

ABSTRACT

With the increase in the volume of tailings generated in the iron ore beneficiation process and stimulated by the growing mining of deposits with less metallic content, the interest in studying new methods to treat tailings in the beneficiation process has been aroused. Motivated by the increased need to no longer use tailings dams in mining and with the premise of recovering water in the process, the idea of using a filter press system in a large mining company in the central region of Minas Gerais was implemented. But due to the scale, still unprecedented in Brazil and in the world for iron ore, engineering problems arose in the assembled pilot, which had to be resolved. One of these problems is the fatigue break (early), which arose along the longitudinal beams after loading by hydraulic locking force in the performance tests. Since the beams are important structural elements of the equipment, they needed to be analyzed to identify the root cause based on the analysis of the computational tool (CAE / MEF), due to the complexity of the project and the possible solutions, being the objective of this Course Conclusion work Specialization.

Keywords: Mechanical Engineering, * Filter Press, * Beam Recovery, * Project

Sumário

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2 JUSTIFICATIVA	18
1.3 OBJETIVO	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 MATERIAIS	20
2.2 MÉTODO DE ANÁLISE	25
2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	26
2.4 ESTRUTURA METÁLICA E VIGAS	32
2.5 INFORMAÇÕES DO EQUIPAMENTO	33
2.6 CARREGAMENTOS	37
3 METODOLOGIA	40
3.1 ANÁLISE ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	40
3.2 FALHA APRESENTADA	46
3.3 SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO EQUIPAMENTO	47
3.4 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	50
3.5 TENSÕES ATUANTES	50
3.6 FADIGA	50
3.7 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 ANÁLISE DA ESTRUTURA ORIGINAL PELO PROJETISTA	52
4.2 REFORÇO NA ESTRUTURA SUGERIDO PELO FORNECEDOR	62
4.3 REFORÇO NA ESTRUTURA SUGERIDO PELO PROJETISTA	67
5 CONCLUSÃO	88
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
ANEXOS	92

Lista de Abreviações

ABS	Associação Brasileira de Soldagem
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CAE	Computer Aided Engineering.
CYLINDER HEAD	Cabeça do Cilindro
EPC-M	Engineering Procurement Construction Management
EPS	Especificação do procedimento de soldagem
EVS	Ensaio Visual de Solda
FEEDING HEAD	Cabeça de Alimentação
FCAW	Flux-cored arc welding
ISO	International Organization for Standardization
LP	Líquido Penetrante
MEF	Métodos dos Elementos Finitos
METAL CORED	Arame tubular
MOBILE HEAD	Cabeça Móvel
NI-HARD	Ferro fundido ligado
RQPS	Registro de qualificação de procedimento de soldagem
SAW	Submerged Arc Welding
SUMP	Caixa de Drenagem
TORTA	Concentrado com uma certa Umidade
TMS	Temperatura de Fusão de soldagem
TTAT	Tratamento Térmico de Alívio de Tensão
TURN KEY	Chave na mão = Modalidade contratação
RCM	Reliability Centered Maintenance

Lista de Figuras

Figura 1 – Visão Geral de Conjunto Filtro Prensa. Completo	18
Figura 2A – Representação de Exemplo de Fraturas Dúcteis	22
Figura 2B – Representação de exemplo de Fraturas Frágeis	22
Figura 3 – Sequência do Processo de Fadiga.....	22
Figura 4 - Sequência para Discretização para Geometria, Cargas e Malhas de Elementos Finitos.....	29
Figura 5 - Condição de contorno no Ansys – Pontos de apoio.....	31
Figura 6 - Representação Ilustração 3D - Filtro Prensa	34
Figura 7 - Sistema Hidráulico - Cilindros de Compressão - Filtro Prensa	36
Figura 8 - Região onde se Retirou o Sensor de Controle de Velocidade	37
Figura 9 - Divisão das Estruturas que Compõem o Filtro Pensa	38
Figura 10 - Carga de Trabalho dos Cilindros – “Feeding Head”.....	39
Figura 11 - Objeto de estudo - Estrutura - Modelagem 3D – ANSYS.....	41
Figura 12 - Solda da Chapa de Apoio Superior com perfil tubular.....	42
Figura 13 - Solda dos Perfis Tubulares Com as Chapas	43
Figura 14 - Solda de Ligação das Chapas Laterais – Lado Cilindro.....	43
Figura 15 - Solda de Ligação das Chapas laterais – Lado Alimentação	44
Figura 16 - Detalhes construtivos Extremidade (LADO A)	45
Figura 17 - Detalhes construtivos Extremidade (LADO B).	45
Figura 18 - Parte Interna, Malhas Extremidade da Viga (LADO C).	45
Figura 19 - Parte Interna, Malhas Extremidade da Viga (LADO D).	45
Figura 20 - Malhas na extremidade da viga.	45

Figura 21 - Malhas na extremidade da viga	45
Figura 22 - Desenho Esquemático da Região da Trinca na Viga do Filtro Prensa....	46
Figura 23 - Detalhe das Trincas na Região Interna dos Perfis Tubulares.....	46
Figura 24 - Deformação da Estrutura do Filtro Prensa. Vista lateral	47
Figura 25 – Deformação da Estrutura do Filtro Prensa. Vista de topo.....	48
Figura 26 - Deformação da Estrutura do Filtro Prensa. Vista de frente.....	48
Figura 27 – Deformação da Estrutura do Filtro Prensa. Perspectiva 1	49
Figura 28 - Deformação da Estrutura do Filtro Prensa. Perspectiva 2	49
Figura.29 – Detalhes Estrutura da Viga de Sustentação - Parafusos sem Pretensão	52
Figura 30 - Distribuição das Tensões na Região de Interesse	53
Figura 31 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.....	53
Figura 32 - Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindro.....	54
Figura 33 – Detalhe da tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Externo da Viga.....	54
Figura 34 – Detalhe da tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno	55
Figura 35 – Detalhe da Deformação na Direção X para Região de Interesse.....	55
Figura 36 – Detalhe da Deformação na direção Y para Região de Interesse	56
Figura 37 – Detalhe da Deformação na Direção Z para Região de Interesse	56
Figura.38 – Análise de Fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.....	57

Figura 39 – Análise de Fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindros	57
Figura 40 – Detalhe dos Parafusos e valores de Pretensão Aplicados na Região de Interesse.....	58
Figura 41 – Distribuição das Tensões na Região de Interesse	59
Figura 42 – Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.	59
Figura 43 – Detalhe análise de fadiga para Região de Interesse – extremidade lado cilindros	60
Figura 44 – Tensão máxima na Região de Interesse – Vista Lado Externo da Viga.	60
Figura 45 – Detalhe da tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno da Viga	61
Figura 46 – Reforço Sugerido pelo Fornecedor. (Detalhes e Aplicação)	62
Figura 47 – Distribuição das Tensões na Região de Interesse	62
Figura 48– Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.....	63
Figura 49 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindro	63
Figura 50 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Externo da Viga	64
Figura 51 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno da Viga	64
Figura 52 – Detalhe análise de fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.....	65
Figura 53 – Detalhe análise de Fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindros.	65

Figura 54 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Vista lado Externo da Viga	66
Figura 55 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno da Viga	66
Figura 56 – Reforço 01 – Detalhe de uma das Extremidades da Viga de Sustentação e Tala Interna	67
Figura 57 – Reforço 01 – Detalhe da Tala Interna ao Perfil Tubular e Parafusos de Fixação.....	68
Figura 58 – Distribuição das Tensões na Região de Interesse.	69
Figura 59 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.....	69
Figura 60 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindro	70
Figura 61 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Vista lado Externo da Viga	70
Figura 62 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno da Viga	71
Figura 63 – Detalhe Análise de Fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.....	71
Figura 64 – Detalhe análise de fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindros	72
Figura 65 – Reforço 02 – Apoio Superior relocado 40 mm na direção +Y	73
Figura 66 – Reforço 02 – Chapa reforçada que faz o contato do apoio superior com a Viga de Sustentação	73
Figura 67 – Reforço 02 – Reforço sobre o perfil tubular de ambas as vigas de sustentação	73
Figura 68 – Detalhes do Reforço 02 – Perfil tubular como reforço e o apoio fixo	73

Figura 69 – Distribuição das Tensões na Região de Interesse	74
Figura 70 – Detalhe da Tensão máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.....	74
Figura 71 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindro.....	75
Figura 72 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Externo da Viga	75
Figura 73 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno da Viga	76
Figura 74 – Análise de Fadiga Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação	76
Figura 75 – Detalhe Análise de Fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindros	77
Figura 76 – Reforços 01 e 02 – Lado dos Cilindros. (Ação).....	78
Figura 77 – Reforços 01 e 02 – Lado da Alimentação. (Reação).....	78
Figura 78 – Reforço 01 – Talas de Reforço Fixadas na Parte Interna do Perfil Tubular.	79
Figura 79 – Reforço 01 – Talas de Reforço e Elementos de Fixação	80
Figura 80 – Reforço 01 – Talas de Reforço e Elementos de Fixação Prensa	80
Figura 81 – Reforço 01 – Interferência das Talas de Reforço com a Parede do Tubo.	80
Figura 82 – Reforço 02 – Relocação dos Apoios Superiores do “Cylinder Head” e “Feeding Head”	81
Figura 83 – Reforço 02 – Relocação dos Apoios Superiores do “Cylinder Head” e “Feeding Head”	82
Figura 84 – Reforço 02 – Chapas de reforço na estrutura da Viga de Sustentação	83

Figura 85 – Reforço 02 – Chapas de reforço na estrutura da Viga de Sustentação”	83
Figura 86 – Reforço 02 – Chapas de reforço na estrutura da Viga de Sustentação	.83
Figura 87 – Reforço 02 – Chapas de reforço na estrutura da Viga de Sustentação	.83
Figura 88 – Esquema de identificação dos Pontos de Medição Localizados nas Vigas do Filtro Prensa lado esquerdo e direito.....	86
Figura 89 – Identificação dos Pontos de Medição no Modelo - VISTA A	86
Figura 90 – Identificação dos Pontos de Medição no Modelo - VISTA B	87

Lista de Quadros

Quadro 1 – Propriedade dos Mecânicas dos Aços Carbono.....	24
Quadro 2 – Propriedades dos Materiais.....	35
Quadro 3 – Casos de Carregamento aplicados ao Equipamento	37
Quadro 4 – Lista dos pesos do Equipamento.....	38
Quadro 5 - Critérios de avaliações de tensões.....	50
Quadro 6 – Lista de Quantitativo de material para Reforço 01.....	81
Quadro 7 – Lista de Quantitativo de material para Reforço 02.....	84
Quadro 8 – Resumo das Tensões Máximas	84
Quadro 9 – Resumo do ciclo de vida à fadiga.....	85
Quadro 10 – Filtro prensa valores médios de variação de tensão	85

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Gráfico CURVA – (S-N)	51
---	----

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os rejeitos de mineração são os resíduos gerados diretamente nas usinas de tratamento de minérios que não apresentam valor econômico associado. Como a maior parte dos processos de beneficiamento de minérios são realizados por via úmida, os rejeitos em geral se apresentam em forma de polpa, isto é, uma fração aquosa contendo diferentes partículas minerais em suspensão e/ou íons dissolvidos.

E dentro deste contexto, a planta de filtragem ocupa um papel relevante em função das restrições imposta pelas legislações e normas governamentais, as companhias mineradoras, baseadas na necessidade de proteção de pessoas e meio ambiente.

Um sistema especial, tem relevante papel. Conhecido com sistema de filtragem de rejeito. E dentro sistema existem alternativas e que atendem a necessidade de volume e disponibilidade, dentre-elas, temos Filtro a disco¹, LAROX ²e Filtro Prensa³ entre outros.

Fruto desta necessidade uma empresa mineradora de grande porte situada na região Central de Minas Gerais, resolveu investir em uma solução tipo Filtro Prensa como solução para geração de filtrado a partir de concentrado do rejeito. Tendo um fabricante internacional de equipamentos de origem europeia como parceiro para o desafio de tornar possível processar um volume, 550 t/mês. Com uma proposta de trabalho de 7 dias por semana e 365 dias por ano.

A partir desta iniciativa foi adquirido equipamentos 9 completos montados em duas plantas, em regime de Turn-Key na modalidade EPC-M. Após montados ocorreram a fase do Ramp-up⁴, porem alguns equipamentos falharam verificado que a falha mais significativa foi nos Filtros Prensa, objeto desta monografia.

¹ Estes filtros compreendem uma membrana esticada sobre um quadro em forma de disco – Fonte: <https://www.mecanicaindustrial.com.br/785-resumo-das-aplicacoes-de-um-filtro-de-disco/>

² LAROX: são filtros totalmente automático do diafragma da intervalo-placa com câmaras horizontalmente orientadas – Fonte: <https://www.directindustry.com/pt/prod/outotec/product-91205-1852484.html>

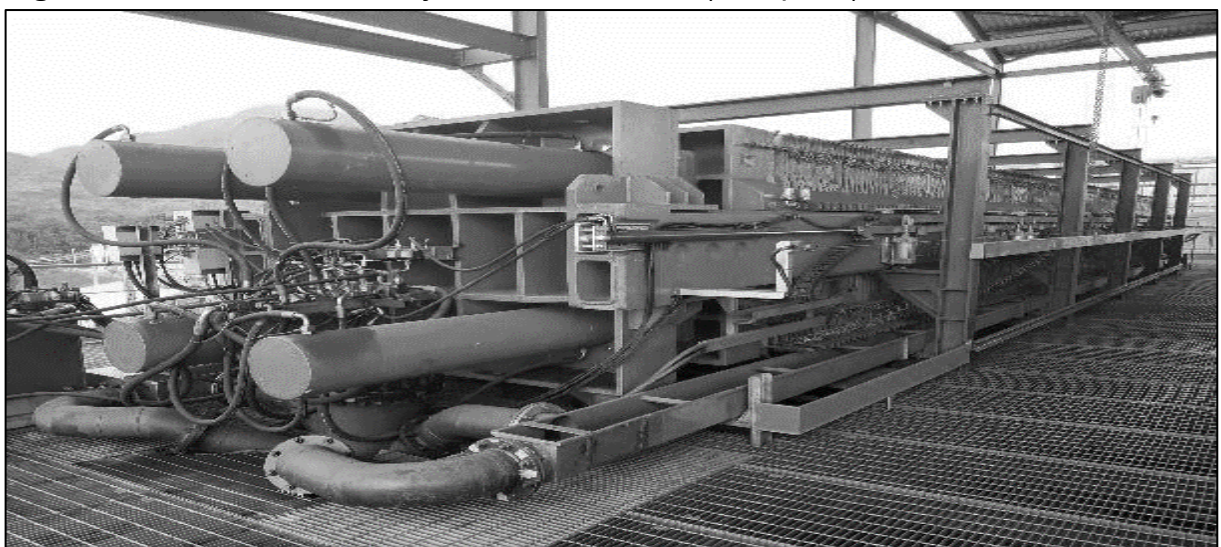
³ O filtro prensa é composto de várias placas, com extensão para acréscimo de mais unidades. Considerável redução nos custos de destinação de resíduos. – Fonte: <https://www.michelon.ind.br/produtos/br/1/filtro-prensa>.

⁴- O termo Ramp-up significa a fase inicial da produção industrial, visando a comercialização de um novo produto. Fonte: <https://www.dicionariofinanceiro.com/ramp-up/>

1.2 JUSTIFICATIVA

A busca por equipamentos mais eficientes, redução de massa, peças e sistemas vem se tornando um dos pilares no desenvolvimento de produtos e em áreas de pesquisa e desenvolvimento, visando a diminuição de custos de fabricação, aumento de produtividade, otimização de processos, aumento de eficiência, desempenho e autonomia dos produtos, tudo isso para alcançar um único objetivo, aumentar a competitividade das empresas. Devido a competitividade, atualmente, é preciso projetar o melhor sistema. A ideia de melhor submete a um sistema que seja versátil, eficiente e tenha uma boa relação custo-benefício. Para alcançar este objetivo o engenheiro deve aplicar ferramentas analíticas, numéricas e experimentais. Conceitos de otimização e minimização são empregados para implementar uma sistemática de busca por soluções ótimas (COUTINHO, 2006). Com o desenvolvimento de projetos, isso não seria diferente, e a demanda de projetos inovadores com massa reduzida, se tornou um ponto decisivo de competitividade entre os fabricantes. Por se tratar de um sistema robusto, é necessário que se tenha a melhor eficiência e durabilidade do equipamento, uma vez que é extremamente complicado fazer manutenção e reparo. Neste sentido, a utilização de software de cálculos estruturais MEF, vem ganhando destaque e importância cada vez maior. O conjunto que será analisado, é a viga do filtro prensa, ilustrado conforme a Figura 1.

Figura 1: Visão Geral de Conjunto Filtro Prensa. (Completo).



Fonte: Autores, Belo Horizonte - 2019.

1.3 OBJETIVO

Realizar a verificação da integridade estrutural da Viga do Filtro prensa, utilizada por uma grande empresa do ramo de mineração para a filtragem de rejeitos de minério de ferro, por meio da simulação por Método de Elementos Finitos (MEF) utilizando softwares comerciais afim de garantir que a estrutura tenha vida útil adequado a necessidade do projeto.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se organizado em sete capítulos. No primeiro compreende a estrutura da análise que será realizada. No segundo capítulo destaca-se a Revisão Bibliográfica do assunto a ser abordado. Este capítulo tão importante discorre sobre o histórico, utilização, classificação, e tipos de falhas de materiais, além dos utilizados em estruturas. Em seguida o capítulo apresentou os métodos de análise de projetos tais como: método analítico, método empírico e simulação numérica, enfatizando o método dos elementos finitos e considerando o software a ser utilizado. Além disso, o capítulo trata sobre a origem das estruturas, e descreve conceitos importantes sobre vigas, estrutura real do equipamento, funcionamento, carregamentos experimentados com todas as informações pertinentes tais como projeto e aplicação. O terceiro capítulo apresenta a metodologia de análise, sendo utilizado o cálculo com base na normas ISO 5049-1/NBR 8400/NBR 8800, sendo consideradas na simulação pelo ANSYS, o planejamento do trabalho, tipo de falha assim como o método utilizado. No quarto são demonstrados os resultados e discussão da análise detalhada através do método dos elementos finitos por diferentes abordagens, sendo a primeira do projeto original feita pelo projetista, a segunda com a sugestão de reforço pelo fornecedor e a terceira com sugestão de reforços pelo projetista com os resultados obtidos nos métodos e discussões. O quinto capítulo estabelece a conclusão da análise e verificação realizada. O sexto capítulo trata da sugestão para trabalhos futuros e por fim, o sétimo capítulo referências bibliográficas e anexos com documentos e imagens gerais dos trabalhos de recuperação emergencial pela engenharia de manutenção in-loco.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 MATERIAIS

Van Vlack (1984) afirma que todo engenheiro independentemente da especialidade (mecânico, civil, eletricitista, etc...) está vitalmente interessado nos materiais que lhe são disponíveis. Quer seu produto seja uma ponte, um computador, um veículo espacial, ou um automóvel deve ter um profundo conhecimento das propriedades características e do comportamento dos materiais que serão utilizados na aplicação do projeto.

Schackelford (2008) destaca a importância por vivermos em um mundo de posse de materiais que definem, em grande parte, nossos relacionamentos sociais e nosso padrão econômico. Portanto, as posses materiais de nossos ancestrais provavelmente eram suas armas e ferramentas e, na verdade, a denominação mais popular dada à antiga civilização humana baseada no material a partir do qual essas armas e ferramentas eram feitas.

Shackelford (2008) ainda menciona que na Idade da Pedra nossos ancestrais lascavam pedras para a caça. Já na Idade do Bronze representou a base da metalurgia no qual as ligas de cobre foram descobertas para produzir ferramentas e armas superiores. Porém na Idade do Ferro as ligas de ferro substituíram largamente o bronze na fabricação de ferramentas e armas da Europa. Ainda destaca que, embora os arqueólogos não se refiram a uma “Idade Cerâmica”, a presença de vasos domésticos feitos de barro queimados ofereceu uma das melhores descrições das culturas humanas por milhares de anos. A cultura moderna da segunda metade do século XX, que às vezes é denominada “idade do plástico”, poderia também ser identificada como “idade do silício”, dado o impacto penetrante da eletrônica moderna, em grande parte baseada na tecnologia do silício.

Para Callister (2008) o desenvolvimento de muitas tecnologias que tornam nossa existência tão confortável tem estado intimamente associado com a acessibilidade de materiais adequados e um avanço na compreensão de um tipo de material é frequentemente precursor da progressão escalonada de uma tecnologia.

2.1.1 Classificação

Os materiais têm sido convenientemente agrupados em três classificações básicas: metais, cerâmicos e polímeros. Esse esquema está baseado principalmente na composição química e na estrutura atômica, e a maioria dos materiais se encaixa em um ou outro grupamento distinto, embora existam alguns materiais intermediários, sendo que adicionalmente, existem outros três outros grupos de materiais importantes na engenharia – compósitos, semicondutores e biomateriais (CALLISTER, 2008).

2.1.2 Falhas

Falha pode significar que uma peça tenha se separado em duas ou mais partes; tenha se tornado permanentemente distorcida, arruinando assim a sua geometria; tenha tido a sua confiabilidade depreciada ou sua função comprometida, qualquer que seja a razão. Um projetista falando de falha pode se referir a qualquer uma destas possibilidades. (BUDYNAS, 2011).

(NORTON, 2013) complementa a definição afirmando que, uma peça pode falhar se suas deformações e distorções forem grandes o suficiente para que não funcione da maneira a qual foi projetada e também pela ruptura ou separação. Apesar de ambas as condições serem falhas, os mecanismos que causam são diferentes, pois materiais dúcteis deformam significativamente até romper, mas materiais frágeis rompem sem mudanças na forma.

Para materiais na engenharia são possíveis dois modos de fratura por cargas estáticas: dúctil e frágil, sendo que qualquer processo de fratura envolve duas etapas, a formação e a propagação de trincas. (CALLISTER, 2008).

A fratura dúctil, conforme Figura 2A, é caracterizada por uma extensa deformação plástica na vizinhança de uma trinca que está avançando. O processo prossegue de maneira relativamente lenta à medida que o comprimento de trinca se estende. Por outro lado, a fratura frágil, conforme Figuras 2B, as trincas podem se espalhar de maneira extremamente rápida com o acompanhamento de muito pouca deformação (CALLISTER, 2008).

Figuras 2A-2B: Representação de exemplo de Fraturas Dúcteis e Frágeis;

Figura 2A: Fratura Dúctil



Figura 2B: Fratura Frágil



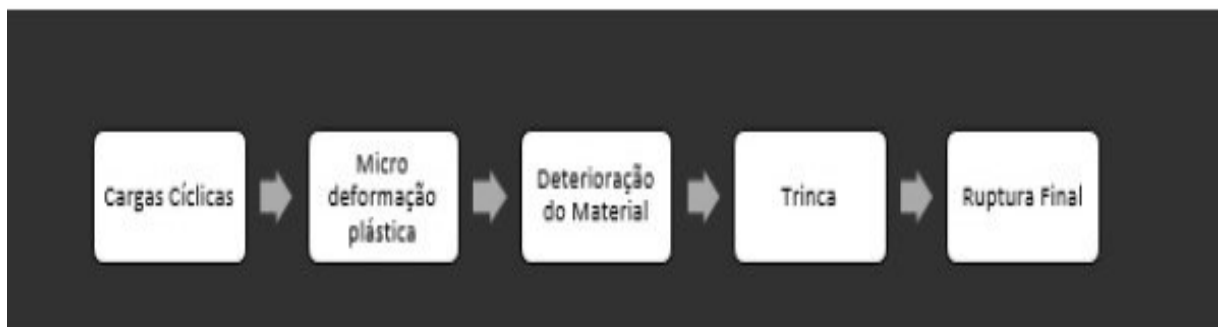
Fonte: Callister, 2008.

A fratura dúctil objeto deste estudo é caracterizada por uma extensa deformação plástica na vizinhança de uma trinca que está avançando. O processo, prossegue de maneira relativamente lenta à medida que o comprimento de trinca se estende.

Outra forma é a fadiga, que é uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes. Sob essas circunstâncias é possível a ocorrência de uma tensão consideravelmente ao limite de resistência a tração ou ao limite de escoamento para uma carga estática (CALLISTER, 2008).

Segundo a norma ASTM E 1823-96, a sequência fadiga (Figura 3) é o processo, de mudança localizada, permanente e progressiva na estrutura, que ocorre no material sujeito a flutuações de tensões e deformações que pode culminar em trincas ou completa fratura depois de um número suficiente de flutuações”.

Figura 3: Sequência do Processo de Fadiga



Fonte: Ensus Advanced Engineering, 2020

Esse fenômeno foi observado pela primeira vez por volta de 1800, quando os eixos de um vagão ferroviário começaram a falhar após um pequeno período de serviço. Rankine publicou um artigo em 1843 dizendo que o material havia “cristalizado” e se tornado frágil devido às tensões flutuantes. Mais tarde houve outros estudiosos que se aprofundaram na análise neste tipo de falha como o Engenheiro alemão August Woler e Poncelet. (NORTON, 2013).

As características de uma falha por fadiga possuem três estágios:

- Estágio I é a iniciação de uma ou mais micro trincas.
- Estágio II progride de micro trincas para macro trincas, formando superfícies de fraturas tal qual platôs paralelos separados por sulcos paralelos denominados por marcas de praia.
- Estágio III ocorre no ciclo de tensão final quando o material remanescente não consegue suportar as cargas, resultando em uma fratura rápida e repentina. (BUDYNAS, 2011).

As falhas por fadiga constituem um custo significativo para a economia, estimado em 1982 para os EUA por volta de U\$ 100 bilhões, além da possibilidade de envolver vidas humana, como por exemplo o avião a jato comercial de passageiros, o inglês Comet, que despedaçou em 1954 devido a falhas por fadiga em sua fuselagem, como consequência dos ciclos de pressurização e despressurização da cabine. (NORTON, 2013).

2.1.3 Materiais das Estruturas Metálicas

O material mais utilizado para estruturas metálicas é o aço, que é uma liga de ferro carbono em que o teor deste varia desde 0,008% até 2,11%. Os aços para estruturas são requeridas propriedades de boa ductilidade, homogeneidade e soldabilidade, além de grande elevação entre a tensão resistente e a de escoamento.

A resistência à corrosão é também importante só sendo, entretanto, alcançada com pequenas adições de cobre. Para atender a esses requisitos, utilizam-se aços-carbono e os aços em baixo teor de liga ou micro ligados, ambos com baixos e médios teores de carbono (PFEIL, 2009).

“O aumento do teor de carbono eleva a resistência do aço, porém diminui a sua ductilidade (capacidade de se deformar) o que conduz a problemas na soldagem. Em estruturas usuais de aço, utilizam-se aços com baixo teor de carbono, que podem ser soldados sem precauções especiais.” (PFEIL, 2009, p.10). “Os principais tipos de aço-carbono usados em estruturas, segundo os padrões da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), da ASTM (American Society for Testing and Materials) e das normas europeias EN, são os apresentados no Quadro 1. Em,” (PFEIL, 2009, p.10)”.

Quadro 1 – Exemplo: Propriedades mecânicas de alguns aços-carbono.

Especificação	Teor de carbono %	Limite de Escoamento f_y (MPa)	Resistência ruptura f_u (MPa)
ABNT MR250	baixo	250	400
ASTM A7		240	370 – 500
ASTM A36	0,25 – 0,29	250 (36ksi)	400 – 500
ASTMA307 (parafuso)	baixo	-	415
ASTMA325 (parafuso)	médio	635 (min)	825 (min)
EM S235	Baixo	235	360

Fonte: PFEIL, <https://kaiohdutra.files.wordpress.com/2016/02/estruturas-de-aco-dimensionamento-pratico.pdf> - 2009

2.2 METODO DE ANÁLISE

Budynas (2011) propõe três tipos de métodos para avaliação e análise: Análise Matemática, Protótipo em Laboratório e **Simulação Computacional**.

Soriano (2003, p.1) reafirma essa informação dizendo: “Em estudo do comportamento de sistemas físicos são utilizados modelos físicos (usualmente em escala reduzida, de laboratório) e/ou **modelos matemáticos**.”

2.2.1 Análise Matemática

Os componentes mecânicos na forma de barras simples, vigas etc. podem ser analisados de forma relativamente fácil utilizando métodos básicos de mecânica que fornecem soluções analíticas. (BUDYNAS, 2011, p.960).

Tanto a análise quanto a otimização exigem que sejam construídos modelos abstratos que possibilitarão o emprego de alguma forma de análise, sendo denominados modelos matemáticos, com o objetivo de encontrar uma resposta mais adequada ao resultado real. (BUDYNAS, 2011).

Um dos métodos analíticos é destacado por PFEIL (2008 p.36), chamado de método das tensões admissíveis:

Já Pinheiro (2005) destaca o método dos Estados Limites Último (ELU), tendo uma tendência a ruptura mecânica do elemento estrutural ou seu deslocamento excessivo, que tornem a estrutura inadequada. No método dos estados limites, tem-se a inclusão dos estados elástico e plástico na formação de mecanismos nas peças estruturais.

2.2.2 Simulação Computacional

Componentes reais são mais complexos para aproximações de soluções analíticas, experimentação ou métodos numéricos. Assim utilizam-se programas (CAD-CAE) que permitem o desenvolvimento de desenhos tridimensionais (3D), possibilitando realização de cálculos rápidos e precisos de propriedades de massa,

centro de gravidade e momentos de inércia das massas. Alguns pacotes de programas realizam tarefas de análise de engenharia e/ou simulações específicas que são capazes de realizar análise de tensão, deflexão, vibração e até mesmo transferência de calor. (BUDYNAS, 2011). Um dos mais utilizados é de Elementos Finitos. (SORIANO, 2003).

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE ELEMENTOS FINITOS

2.3.1 Origem

O Método de Elementos Finitos (MEF) surgiu em 1955 como evolução da análise matricial de modelos reticulados (concebida no início da década de 1930 na indústria aeronáutica) com a disponibilidade de computadores. Os primeiros elementos foram concebidos por engenheiros aeronáuticos para análise de distribuição de tensões em chapas de asas de avião, assim o computador digital e a engenharia aeronáutica são responsáveis pela origem do método de elementos finitos, sendo Argyris e Kesley, Turner, Clough, Martin e Topp os pioneiros. (SORIANO, 2003).

Em 1962 Gallagher e Padlog (1963) arbitraram pioneiramente campos de deslocamentos em vigas e placas, na concepção de elementos finitos, para considerar efeito de não linearidade e determinar cargas críticas. (SORIANO, 2003).

E. Wilson desenvolveu um dos primeiros programas em elementos finitos que foi amplamente utilizado. A rápida popularidade deve-se a ao fato de o programa ser de livre acesso (gratuito), o que era muito comum no início dos anos 60, pois o valor comercial não era conhecido na época, mas o programa era limitado à análise de tensões bidimensionais. No entanto, o programa foi usado por acadêmicos de pesquisa e laboratórios industriais, e foi um instrumento que comprovou a força e a versatilidade dos elementos finitos a muitos usuários. (FISH, 2007).

Em 1965, a NASA iniciou um projeto conhecido como NASTRAN, liderado por Dick MacNeal que incluiu análise de estruturas mais complexas. Na mesma época John Swanson desenvolveu um programa para a Westinghouse Electric Corp. para análise de reatores nucleares. Em 1969 ele deixou a empresa e lançou o programa

ANSYS no mercado que tinha a capacidade de resolver problemas lineares e não lineares e foi amplamente adotada pelas companhias. (FISH, 2007).

O ABAQUS foi desenvolvido por uma companhia chamada HKS, que foi fundada em 1978. O programa foi amplamente usado por pesquisadores, porque HKS introduziu portas que permitiam o desenvolvimento de novos modelos e elementos. (FISH, 2007).

Atualmente existem opções de programas utilizam um banco de dados para elementos finitos com interface com dados CAD, mas em ambientes diferentes. Portanto sistema de elementos finitos contém tradutores, que geram malhas de elementos finitos a partir do banco de dados CAD. (FISH, 2007). A análise que usa o MEF é chamada de Análise por Elementos Finitos (FEA). (SolidWorks,2020).

O método dos elementos finitos está cada vez mais popular, sendo que nos Estados Unidos é gasto mais de US\$ 1 bilhão por ano em programas de computador sobre MEF ou FEA. Além disso, registra-se mais de 400 livros sobre o assunto em vários idiomas e em uma pesquisa em 2006 para a frase “elementos finitos”, usando o programa Google, encontrou mais de 14 milhões de páginas de resultados. (SORIANO, 2003).

2.3.2 Definições e Aplicações

“Há uma enormidade de aplicações para FEA, como análises estática e dinâmica, linear e não linear, de tensão e deflexão; vibrações livres e forçadas; transferência de calor; instabilidade elástica (flambagem); acústica, eletrostática e magnética.” (BUDYNAS, 2011, p.960).

A grande maioria dos engenheiros especializados nos segmentos de sistemas para movimentação de cargas utiliza o método de elementos finitos para os cálculos,

permitindo que os esforços nas estruturas sejam analisados a cada ponto, permitindo projetos mais leves e econômicos.⁵

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um dos métodos numéricos para resolver equações diferenciais que descrevem muitos problemas de engenharia, sendo uma ferramenta muito poderosa. O principal motivo deve-se a utilização de programas computacionais versáteis que podem resolver problemas práticos e, em um futuro próximo pode se tornar o método preferido das engenharias e ciências aplicadas. (KIM, 2011).

O conceito da análise por elementos finitos (FEA) é muito simples, mas os cálculos que o acompanham são muito complexos, sendo que a utilização de softwares comerciais torna muito fácil obter resultados de análises pelo FEA, mas se o usuário não compreender de forma adequada os resultados existe uma grande possibilidade de ocorrência de resultados equivocados. Assim, torna-se importante que o profissional que ingressa na área de projetos mecânicos deve se especializar para na teoria e aplicação do método. (NORTON 2013).

A análise de elementos finitos tem por finalidade determinar a resposta (deslocamentos e tensões) de uma determinada estrutura, no caso de análise de problemas de mecânica, para um determinado conjunto de cargas e condições de contorno. É um procedimento de análise no qual a estrutura – sua geometria, propriedades do material, condições de contorno e cargas – é bem definida e o objetivo é determinar sua resposta. (KIM, 2011).

O MEF divide o modelo em muitas partes pequenas de forma simples, denominados elementos, substituindo um problema complexo por muitos problemas simples que podem ser resolvidos simultaneamente. (SolidWorks, 2013).

Os elementos compartilham pontos em comum, chamados de nós, e o processo de divisão dos modelos em pequenas partes é chamado de geração da malha. A resposta em um ponto qualquer de um elemento é interpolada a partir da resposta dos nós do elemento. Cada nó é completamente descrito por vários

⁵ (Fonte: <http://www.twn-eng.com/projetos.php?projeto=barra.manut>).

parâmetros, dependendo do tipo de análise e do elemento usado. Em análises estruturais a resposta de um nó é descrita por três translações e três rotações, sendo chamadas de graus de liberdade (SolidWorks,2013).

Para explicar a base de aproximação do MEF, Fish (2007) apresenta uma placa com um furo, como mostrado na Figura 4 sobre a qual deseja-se encontrar por exemplo a distribuição de temperatura. O corpo é dividido em elementos conectados por nós e se obtém uma solução aproximada através de uma malha.

Figura 4 – Sequência para Discretização para Geometria, Cargas e Malhas de Elementos Finitos.

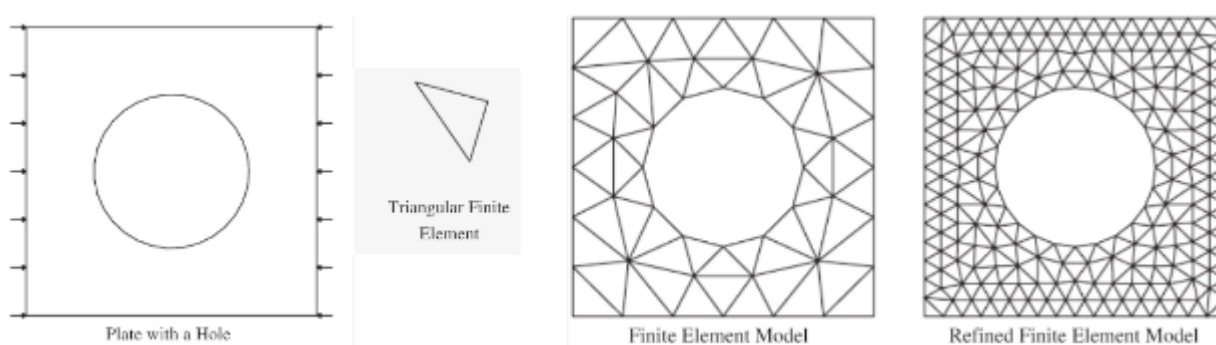


Figura 4 - Geometria cargas e malhas de elementos finitos Fonte: FISH, Jacob and BELYTSCHKO.

“Os resultados são apresentados geralmente como visualizações computacionais, tais como gráficos de contorno, embora os resultados sejam frequentemente produzidos em monitores.” (FISH. 2007, p.2).

Kim (2011) resumidamente divide o Método dos Elementos Finitos em cinco passos:

Pré-processamento:

- Geração de malha dos elementos;
- Formulação do elemento: desenvolvimento de equações que descrevam o comportamento de um elemento;
- Montagem (assembly): obtenção de um sistema de equações para o domínio global a partir dos elementos que compõem;
- Resolução do sistema de equações;
- Pós-processamento: determinação de grandezas de interesse (como tensões, deformações) e visualização da resposta.

A descrição do comportamento é feita, geralmente, através de equações diferenciais parciais para o problema - forma forte – e da respectiva forma fraca. Para obter o sistema de equações do sistema global é preciso combinar as equações que governam os elementos individuais, sendo que tais equações são expressas em forma matricial (KIM, 2011).

Para solução da equação utiliza-se aproximações por uma série de funções polinomiais simples em cada elemento para todo o domínio do problema. Assim quando forem utilizados mais elementos mais a solução aproximada convergirá para a solução exata. (KIM, 2011).

O que são as condições de contorno?

Na análise estrutural as condições de contorno são: os carregamentos, as restrições, cargas de corpos, tipos de contatos, etc. Ao se definir uma peça ou conjunto de peças montadas para análise, existem várias considerações e procedimentos que devem ser feitos que são preparatórias para análise denominadas, condições de contorno.

Bathe (1996), em seu livro “Finite element procedures in engineering analysis” e Reddy (1993), em seu livro “An introduction to the finite element method”, identificam duas classes de condições de contorno denominadas essencial e natural. A condição de contorno essencial também denominada condição de contorno geométrica corresponde a deslocamentos e rotações, enquanto a segunda classe é denominada condição de contorno natural e também chamada de condições de contorno de força, porque na mecânica estrutural as condições de contorno naturais correspondem a forças e momentos prescritos. Estas condições de contorno são fatores que influenciam o comportamento dos modelos de análise, alterando os resultados e devem ser atribuídos pelo usuário do software.

As condições de contorno são imprescindíveis para a análise e fazem parte do pré-processamento, assim como, a geometria, o material de cada componente e a malha.

Quanto mais próximas ou exatas forem aplicadas as condições de contorno das reais condições de trabalho da peça ou conjunto, mais confiáveis serão os resultados obtidos na análise.

Como saber quais condições utilizar na análise?

Avaliar quais são as cargas que atuam sobre componentes, a direção, sentido e intensidade. E também, quais são e onde estarão localizados os apoios, bem como, os tipos de contato entre os componentes de um conjunto são extremamente importantes para obter resultados confiáveis.

Vale lembrar que o software de MEF se comporta como uma simples calculadora, ou seja, os resultados obtidos dependem das informações que recebe. Simplificando: se entra lixo, sai lixo.

Ao engenheiro cabe definir exatamente quais as condições de contorno no programa MEF (figura 5) são adequadas à análise, pois os resultados dependem diretamente destas condições, se necessário deve-se preparar vários modelos de análise para que seja possível avaliar os resultados.

Verificando-se como irá trabalhar a peça ou conjunto de peças deve-se, no software, atribuir cargas e apoios que mais se aproximem as condições reais de trabalho. Para isto, devem-se conhecer as ferramentas disponíveis existentes do software e para distinguir a aplicação de cada uma delas.

Figura 5: Condição de contorno no Ansys – Pontos de apoio.

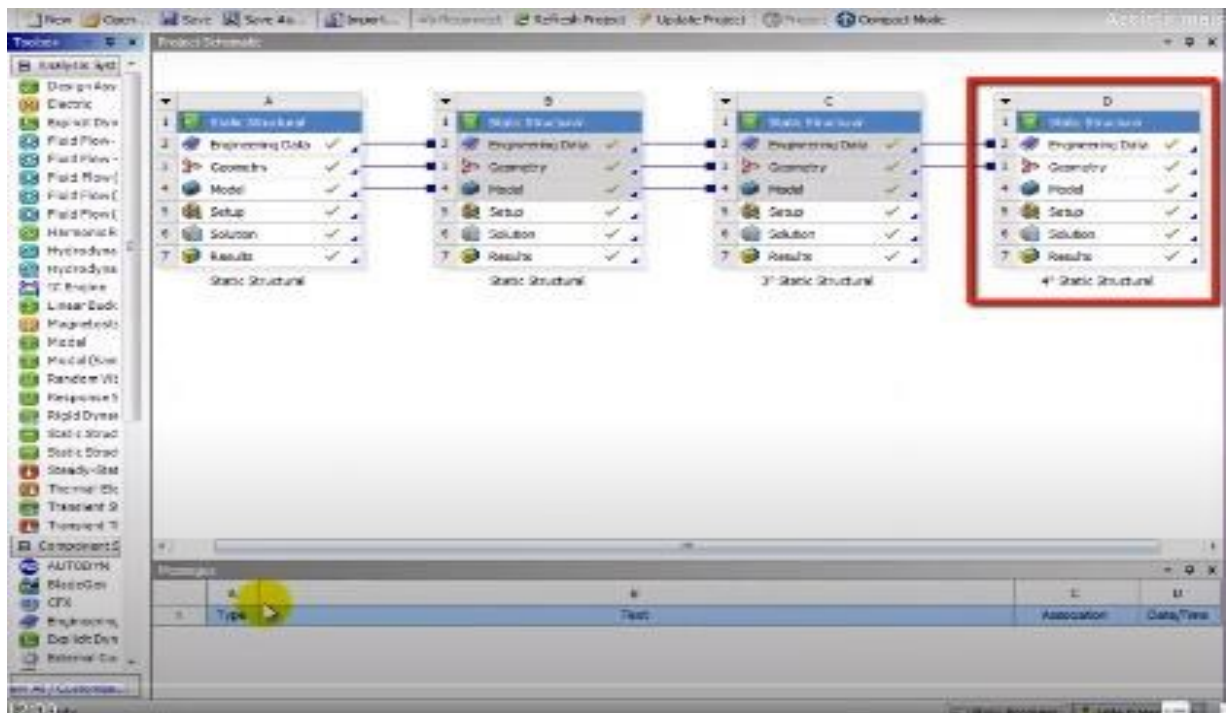


Figura 5 - Fonte: Autores- Belo Horizonte 2020

2.4 ESTRUTURAS METÁLICAS E VIGAS

2.4.1 Histórico

“O primeiro material siderúrgico empregado na construção foi o ferro fundido. Entre 1780 e 1820 construíram-se pontes em arcos ou treliçadas, com elementos em ferro fundido trabalhando em compressão.” (PFEIL, 2009, P.2).

O ferro forjado foi utilizado em fins do século XVIII, mas o aço rapidamente substituiu devido a produção em larga escala diminuindo o custo de produção. Os aços de baixo carbono foram utilizados até meados do século XX, mas a partir de 1950 aços de maiores resistência foram empregados em escala. As modernas estruturas de grande porte utilizam aços de diversas categorias. (PFEIL, 2009).

Para Pinheiro (2005), as estruturas metálicas, têm indicadores de sua utilização a partir de 1750 e no Brasil o início de sua fabricação foi no ano de 1812, sendo que o grande avanço de perfis de larga escala ocorreu com a implantação das grandes siderúrgicas, como por exemplo, a CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, que teve seu início de operação em 1946.

Carnasciali em 1974 já afirmava, a muitos anos atrás, que o desenvolvimento industrial está conduzindo as necessidades do aço nacional a uma cifra situada de 6.000.000 de toneladas anuais, sendo que o emprego das estruturas metálicas é encarado por um prisma de grande viabilidade de sua execução, como da reversão mais rápida do capital empatado, com grande redução de tempo obtida na montagem (CARNASCIALI, 1974).

Pinheiro (2005) indica como vantagens da utilização do aço estrutural: fabricação das estruturas com precisão milimétrica, garantia das dimensões e propriedades dos materiais, material resistente a vibrações e a choques, possibilidade de execução de obras mais rápidas e limpas, possibilidade de montagem e desmontagem em locais diferentes, alta resistência estrutural, e reaproveitamento de materiais em estoque. Carnasciali (1974) complementa relatando que existe possibilidade de vencer grandes vãos com o peso próprio reduzido, nos grandes edifícios comerciais realiza o máximo aproveitamento em termos de área útil e a grande rapidez de montagem.

Como desvantagem é possível citar: a limitação de execução em fábrica, necessidade de tratamento superficial das peças contra oxidação, necessidade de mão-de-obra e equipamentos para sua fabricação e montagem, e limitação de fornecimento de perfis estruturais. (PINHEIRO, 2005).

2.4.2 Vigas

Convenciona-se chamar de viga a uma peça estrutural que resiste principalmente a esforços de flexão. (CANASCIALLI 1974).

Vigas são elementos estruturais projetados para suportar cargas aplicadas perpendicularmente a seus eixos longitudinais. Se forem projetadas com base na resistência, deverão resistir as tensões de cisalhamento e flexões admissíveis. Ainda, considera-se que a tensão de flexão máxima na viga é muito maior do que as tensões localizadas provocadas pela aplicação de cargas na superfície da viga. (HIBBELER, 2010).

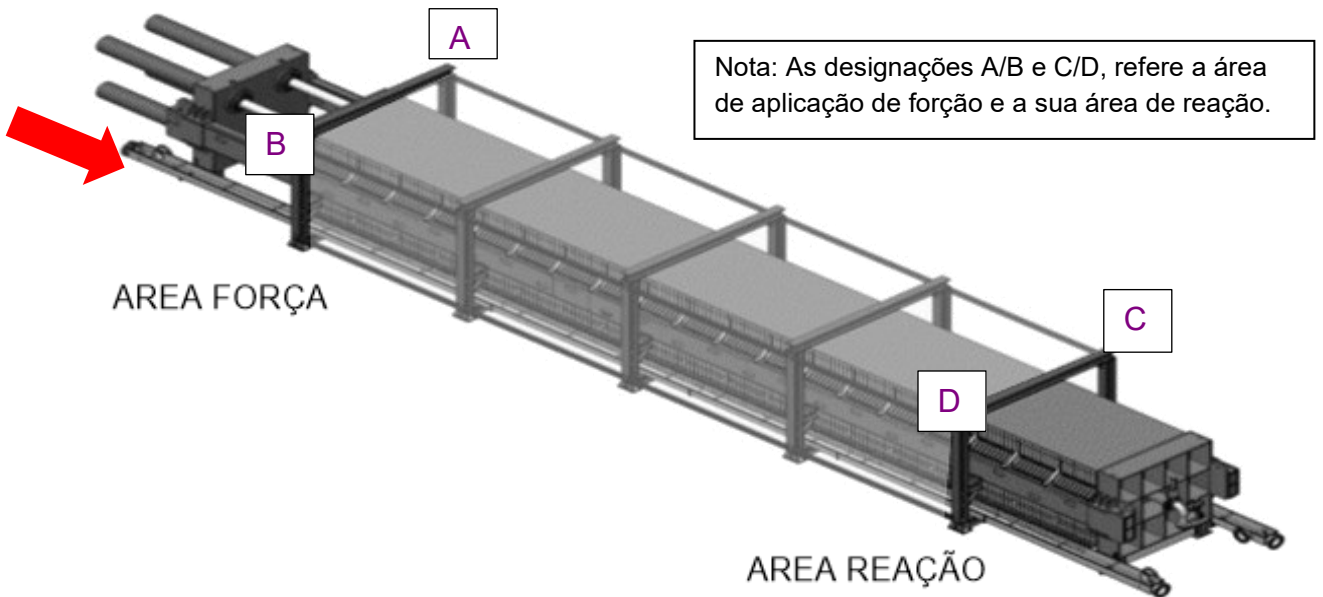
Quando são combinados vários perfis laminados , unindo-se com rebites ou soldagem, de maneira a formar um perfil composto, obtêm-se o que se chama de viga de alma cheia, ou seja, o elemento vertical (alma) é formado por uma chapa, que por sua vez é unida a elementos que formam a mesa superior e inferior. (CANASCIALLI 1974).

A função da alma é resistir principalmente à força cortante vertical e as mesas resistem à quase a sua totalidade ao momento fletor. O elemento de ligação entre a alma e as mesas deve resistir à força cortante horizontal. A alma é um elemento fraco para compressão por ser esbelta e delgada. (CANASCIALLI 1974).

2.5 INFORMAÇÕES DO EQUIPAMENTO

A imagem representativa do modelo desenvolvido pelo fabricante para o Filtro Prensa está apresentada conforme Figura 6:

Figura 6 – Representação Ilustração 3D - Filtro Prensa



Fonte: Autores - Belo Horizonte – 2020

Dados técnicos Filtro Prensa

- Modelo: 2000 x 2000 x190;
- Peso do equipamento: 83,0 ton.;
- Peso do equipamento em regime: 178,0 ton.;
- Pressão de trabalho dos cilindros: 300 bar;

2.5.1 Estrutura do Equipamento

A estrutura do equipamento Quadro 2 é composta pelo material ASTM A572 grau 50.

As propriedades definidas deste material estão conforme NBR 8800:2008.

Quadro 2 - Propriedades dos Materiais

Classificação	Denominação	Produto	Grupo de perfil ^{a b} ou faixa de espessura disponível	Grau	f_y MPa	f_u MPa
Aços-carbono	A36	Perfis	1, 2 e 3	-	250	400 a 550
		Chapas e barras ^c	$t \leq 200$ mm			
	A500	Perfis	4	A	230	310
				B	290	400
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica	A572	Perfis	1, 2 e 3	42	290	415
				50	345	450
			55	380	485	
			1 e 2	60	415	520
		65	450	550		
		Chapas e barras ^{e)}	$t \leq 150$ mm	42	290	415
			$t \leq 100$ mm	50	345	450
			$t \leq 50$ mm	55	380	485
	$t \leq 31,5$ mm		60	415	520	
				65	450	550
	A992 ^d	Perfis	1, 2 e 3	-	345 a 450	450

^a Grupos de perfis laminados para efeito de propriedades mecânicas:

- Grupo 1: Perfis com espessura de mesa inferior ou igual a 37,5 mm;
- Grupo 2: Perfis com espessura de mesa superior a 37,5 mm e inferior ou igual a 50 mm;
- Grupo 3: Perfis com espessura de mesa superior a 50 mm;
- Grupo 4: Perfis tubulares.

^b t corresponde à menor dimensão ou ao diâmetro da seção transversal da barra.

^c Barras redondas, quadradas e chatas.

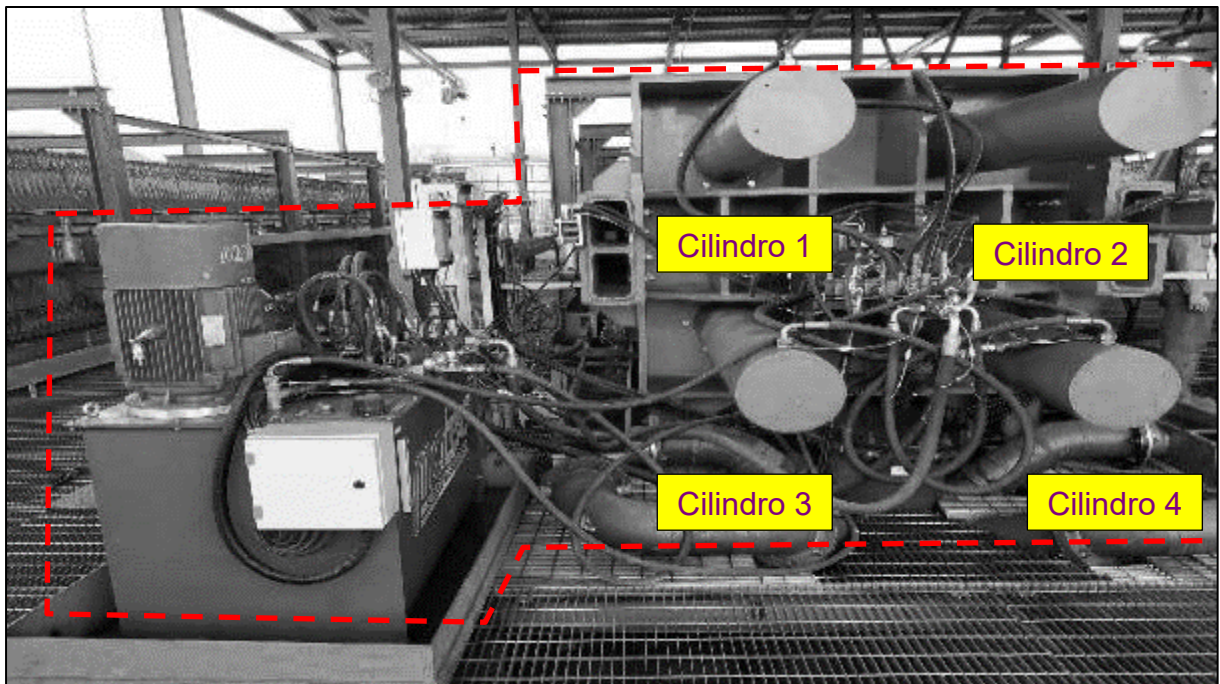
^d A relação f_u/f_y não pode ser inferior a 1,18.

Fonte: ABNT - NBR 8800: 2008

2.5.2 Funcionamento do Equipamento

O funcionamento normal do equipamento figura 7, indica que, de acordo com o balanceamento do fluxo, os cilindros hidráulicos, 1, 2, 3 e 4, trabalham em conjunto e de forma sincronizada. Com este sistema é possível garantir que não haja o desalinhamento durante a movimentação da haste do cilindro e as placas do filtro.

Figura 7 - Sistema Hidráulico - Cilindros de Compressão - Filtro Prensa

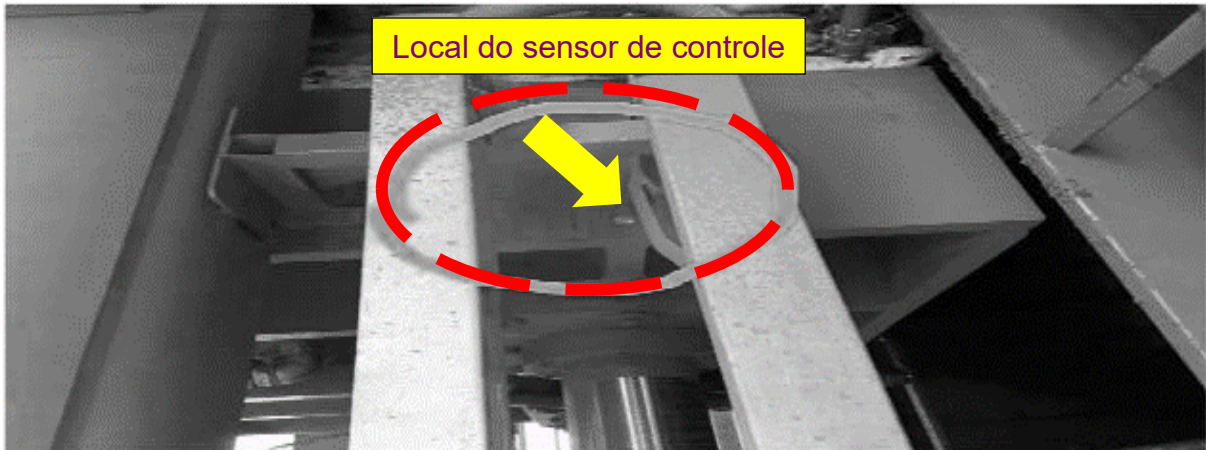


Fonte: Manutenção Cliente, Belo Horizonte - 2019.

Porém, de acordo com o funcionamento atual, o sistema de controle se encontra desativado com a remoção dos sensores e componentes eletrônicos, fazendo com que forças não previstas sejam descarregadas na Viga de Sustentação.

A figura 8 evidencia a retirada do sistema de controle, de acordo com o relatório procedimento de reparação da viga.

Figura 8 – Região onde se Retirou o Sensor de Controle de Velocidade



Fonte: manutenção Cliente – Belo Horizonte - 2019.

O Equipamento operou de agosto de 2018 a dezembro de 2019 - 15 meses com funcionamento de 40 ciclos por dia – Referência: Proprietário Equipamento.

2.6 CARREGAMENTOS

Hipóteses para carregamento (Estático e Dinâmico)

2.6.1 Condição de contorno

A análise da estrutura quadro 3 é realizada para a condição de operação da estrutura conforme ISO 5049-1 (Mobile Equipment for Continuous Handling of Bulk Materials).

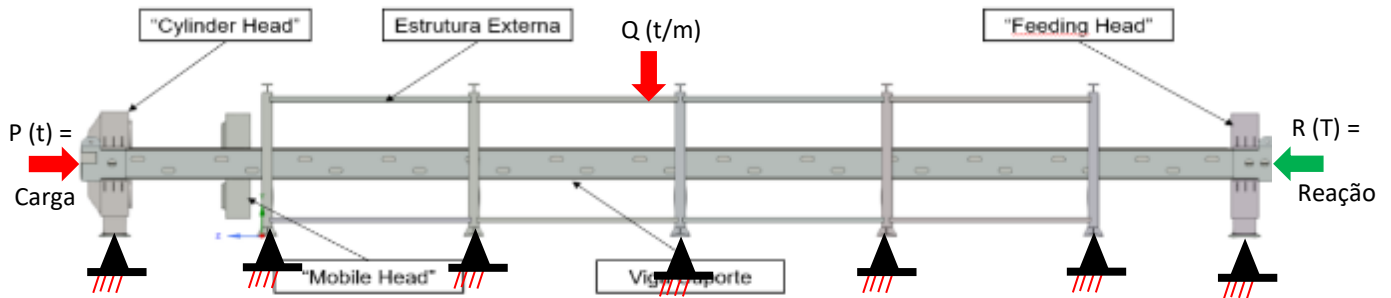
Quadro 3 – Carregamentos Aplicados ao Equipamento

CARREGAMENTOS	CARGAS PRINCIPAIS, ADICIONAIS E ESPECIAIS.
	COMBINAÇÃO 3
Peso Próprio	x
Material em Processo	x
Incrustação	x
Forças nos cilindros 300Bar	x
Vento	Não se aplica

Fonte: Autores, Belo Horizonte - 2019.

O peso próprio do equipamento é verificado com base nos desenhos de referência, para cada subestrutura do Filtro Prensa ver figura 9.

Figura 9 – Divisão das Estruturas que Compõem o Filtro Prensa



Fonte: Fornecedor, Belo Horizonte - 2020.

O peso próprio da estrutura do equipamento é calculado através software ANSYS, a partir das dimensões geométricas e da sua massa específica do seu material. O valor apresentado no quadro 4, uma boa exatidão em comparação aos dados apresentados no desenho de referência disponibilizado pelo cliente.

Quadro 4 – Lista dos Pesos do Equipamento

ESTRUTURA DO FILTRO PRENSA		
ESTRUTURA	DESENHO REFERÊNCIA	PESO (kg)
"Feeding Head"	xxxxx	4.170,0
"Cylinder Head"	xxxxx	4.485,0
Estrutura Externa	xxxxx	7.070,0
Cilindro	xxxxx	1.920,0
Viga Suporte	xxxxx	7.270,0
Placas de Filtro	xxxxx	38.000,0

Fonte: Fabricante, Belo Horizonte - 2020.

2.6.2 Pressão de Trabalho do Cilindro

Reforçamos aqui que a pressão de 300 bar foi informada pela Cliente e que não havia desenho disponível do cilindro. A determinação do diâmetro do embolo foi feita através da medição do diâmetro externo (366mm) e da espessura (32.5mm) da camisa do cilindro, em campo. Pela subtração destes valores chegamos ao diâmetro provável do embolo de 300 mm para o qual calculamos a força de avanço. Com base nesta medida, calcula-se o esforço que a estrutura sofre ver figura 10.

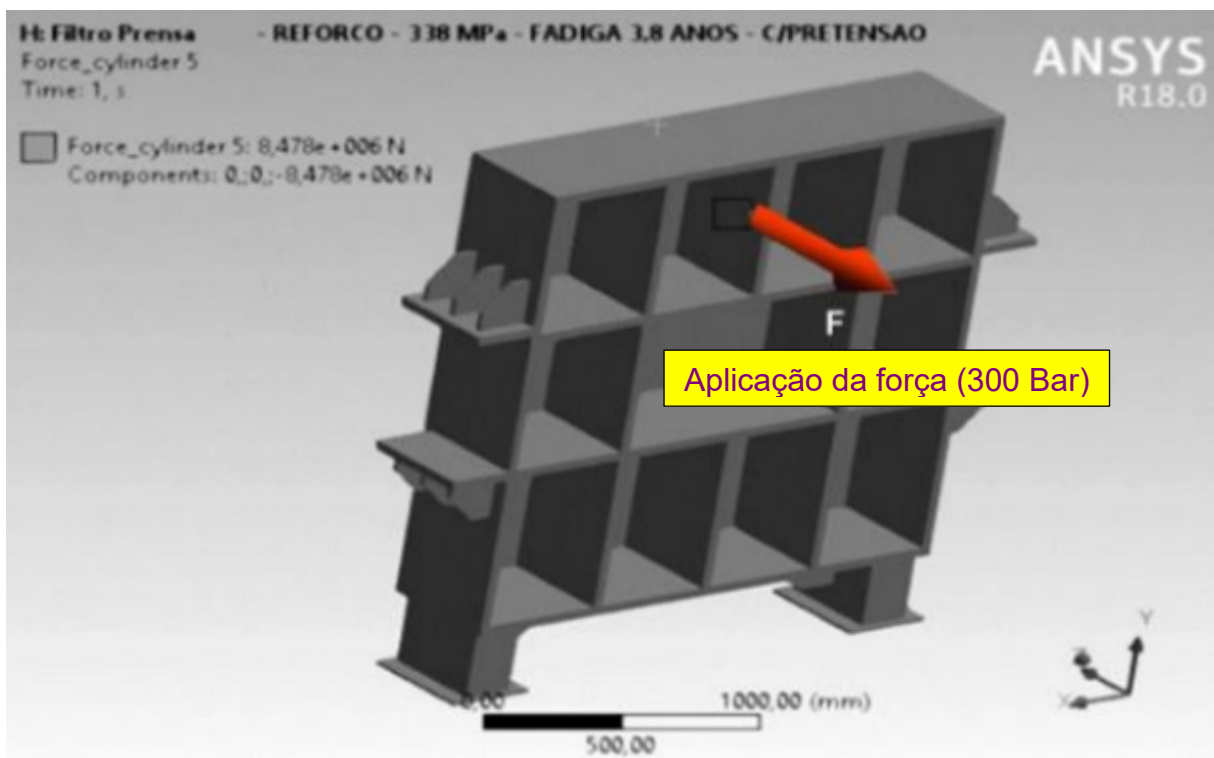
Pressão do Sistema: $P_c := 300\text{bar}$

Diâmetro do Embolo: $D_e := 300\text{mm}$

Área de contato do Fluido: $A_e := \frac{\pi \cdot D_e^2}{4} \quad A_e = 70686\text{mm}^2$

Força do Embolo: $F_e := P_c \cdot A_e \Rightarrow F_e = 2120575\text{ N}$

Figura 10 – Carga de Trabalho dos Cilindros – “Feeding Head”.



Fonte: Projetista– Belo Horizonte - 2019

3 METODOLOGIA

O método de análise aplicada consiste nas seguintes etapas:

- ✓ Criação do modelo computacional da estrutura do equipamento em três dimensões, através da técnica de elementos finitos, utilizando elementos de volume;
- ✓ Definição das combinações de cargas com base nas normas técnicas específicas;
- ✓ Ajuste do modelo computacional à condição real do equipamento e verificação das reações de apoio;
- ✓ Definição dos critérios de avaliação conforme normas técnicas específicas;
- ✓ Cálculos de tensões máximas, deformações e fadiga;
- ✓ Determinação e análise localizada dos pontos críticos;
- ✓ Projeto estrutural para alteração e reforço da estrutura do equipamento. (Ver anexo 1 – Projeto Fabricante)

3.1 ANÁLISE ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A condição da estrutura do equipamento Filtro Prensa é avaliada através do Método dos Elementos Finitos, para verificar o estado de tensão e a vida teórica à fadiga do equipamento. A avaliação de tensão se baseia nos critérios de análise da ISO 5049-1:1994, enquanto a vida à fadiga será definida conforme metodologias e teorias aplicáveis.

A presente análise foca nos pontos de interesse que consistem nos locais em que a estrutura da viga apresenta trincas e falhas. O restante da estrutura faz parte da análise, mas não serão apresentados seus resultados. As vigas de sustentação para o equipamento em estudo, o Filtro Prensa, são analisadas de acordo com os seguintes casos:

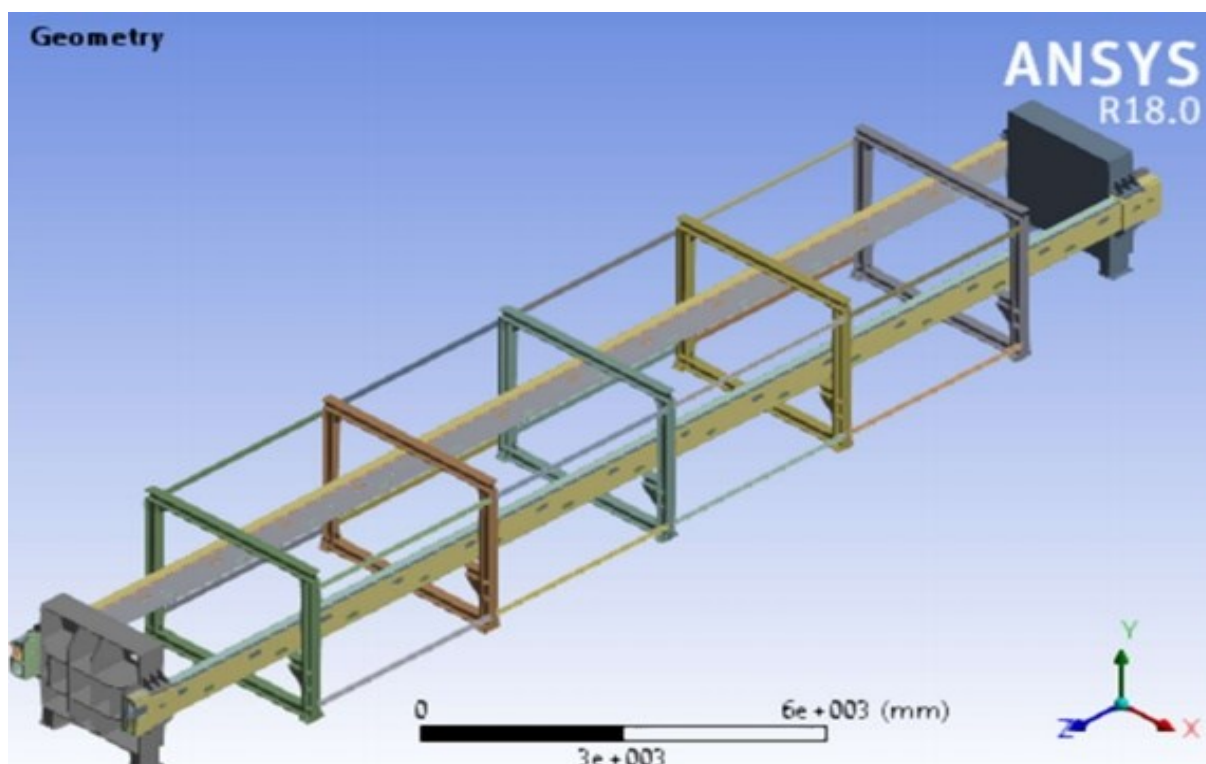
- Estrutura original com carga de pretensão nos parafusos de ligação;
- Estrutura original sem carga de pretensão nos parafusos de ligação;
- Estrutura reforçada com carga de pretensão nos parafusos de ligação;

Assim, serão apresentados os resultados da verificação estrutural do equipamento na sua condição original, correspondente à realidade construtiva levantadas em projeto, em campo e também se consideram os componentes soldados conforme é verificado no local. Logo em seguida a condição reforçada, apresentando os reforços necessários a serem instalados na estrutura da Viga de Sustentação. A seguir estão apresentados os resultados obtidos para a combinação 3 para o equipamento. Os resultados estão separados entre análise das tensões máximas, deslocamento estrutural e fadiga. Os resultados obtidos são avaliados conforme critério de avaliação apresentado no item “Critério de Avaliação”.

O equipamento em estudo é modelado em três dimensões no ambiente ANSYS Workbench, figura 11 software que utiliza o método de análise por elementos finitos. O modelo é construído em elementos volume e suas simulações desenvolvidas para condição de cargas estáticas.

A geometria modelada representa fielmente a geometria atual da estrutura do equipamento com suas devidas propriedades mecânicas incluindo módulos de elasticidade, Poisson e massa específica.

Figura 11 – Objeto de Estudo - Estrutura - Modelagem 3D – ANSYS



Fonte: Projetista – Belo Horizonte – 2019.

O desenvolvimento da modelagem do equipamento através do software de simulação computacional obedeceu a alguns requisitos, de acordo com a verificação construtiva do Filtro Prensa.

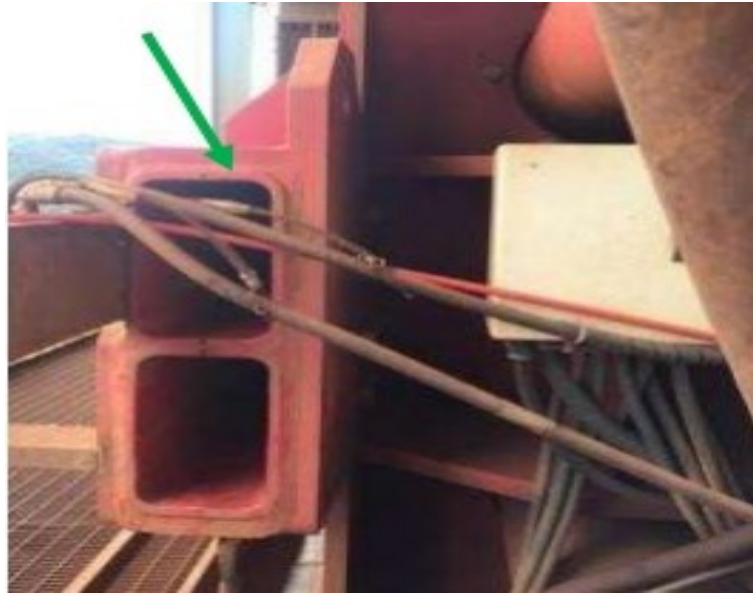
A estrutura da Viga de Sustentação é a região de interesse deste memorial de cálculo e a forma construtiva é disposta ao longo deste documento. A viga é composta por chapas, de espessuras diferentes (variam de 10 a 38 milímetros). Essas chapas são soldadas em todo o contorno nas suas emendas de linha com face (filete), como são apresentadas nas figura 12 a 16 abaixo:

Figura 12 – Solda da Chapa de Apoio Superior com perfil tubular



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2019.

Figura 13 – Solda dos Perfis Tubulares Com as Chapas



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2019.

Figura 14 – Solda de Ligação das Chapas Laterais – Lado Cilindro.



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2019.

Figura 15 – Solda de Ligação das Chapas Laterais – Lado Alimentação



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2019.

O modelo computacional apresenta a capacidade de também simular as ligações soldada de linha com face, como pode ser visto pelas figuras 16 a 21.

Pode-se ver também a disposição dos elementos de malha na Viga de Sustentação.

Figura 16 Detalhe construtivo da extremidade da viga

Figura 17 Detalhe construtivo da parte interna da viga - (Lado B)

Figura 18 Detalhe construtivo da extremidade da viga

Figura 19 Detalhe construtivo da parte interna da viga

Figura 20 Malhas na extremidade da viga

Figura 21 Malhas na extremidade da viga

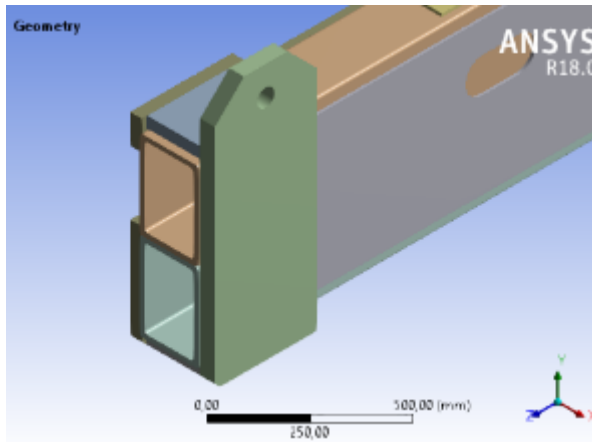


Figura: 16

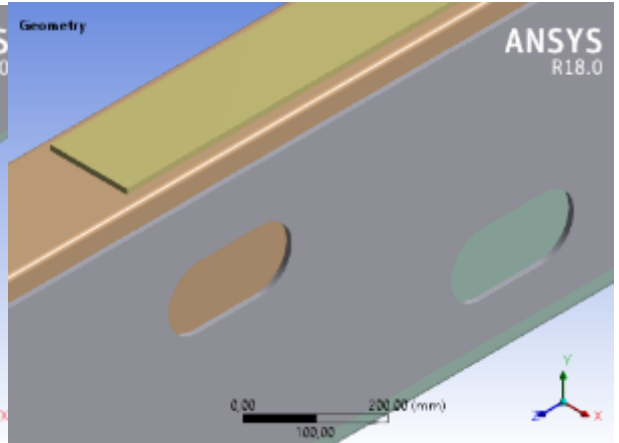


Figura: 17

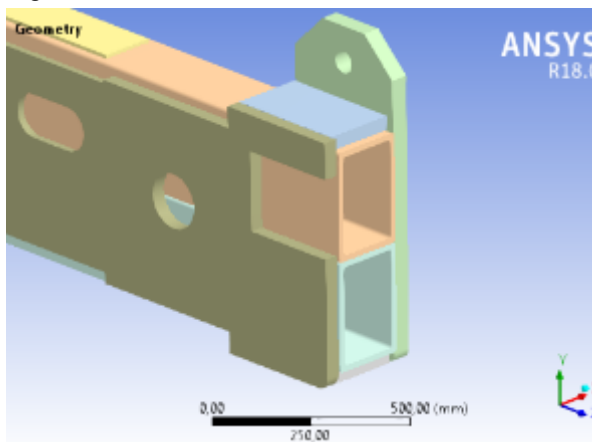


Figura: 18

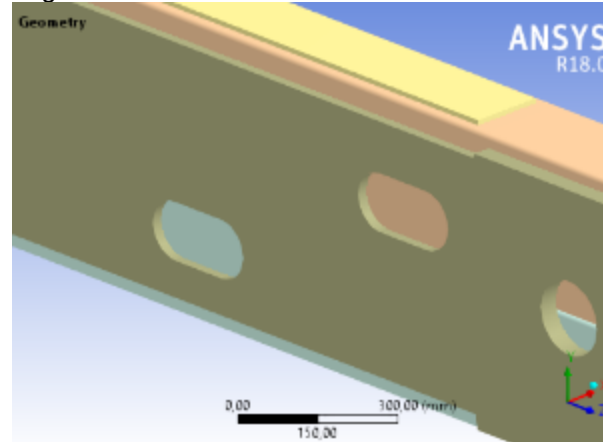


Figura: 19

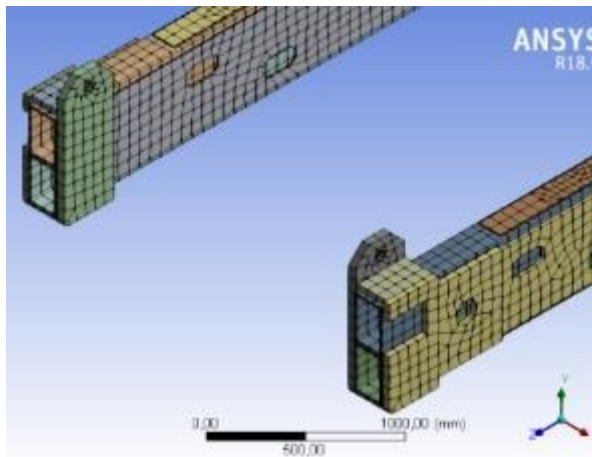


Figura: 20

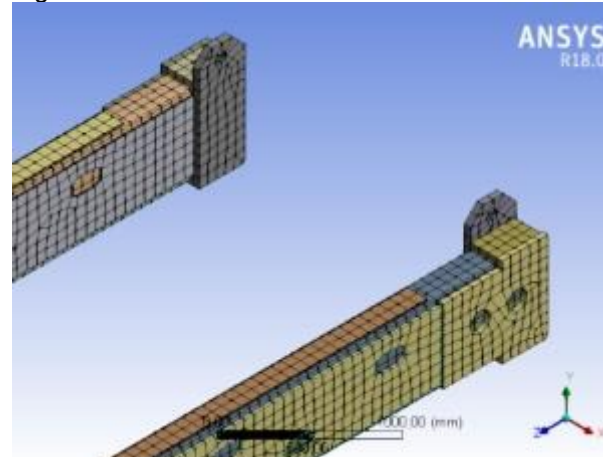


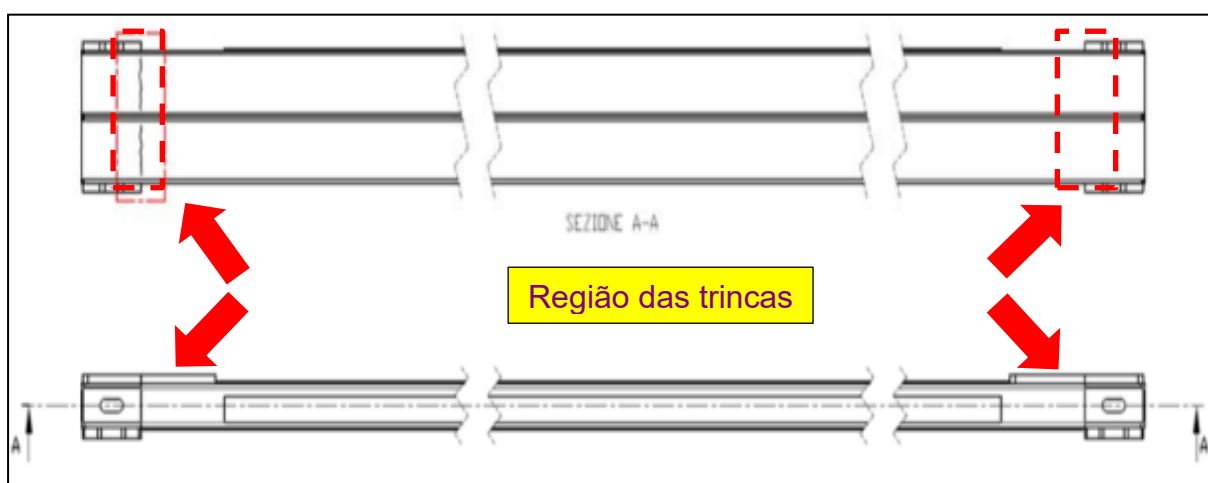
Figura: 21

Fonte: Projetista – Belo Horizonte - 2019.

3.2 FALHA APRESENTADA

A estrutura das vigas de sustentação do equipamento figura 5, apresenta trincas que foram constatadas a uma distância aproximada de 350 mm de ambas das extremidades, localizadas na face interna da viga, de acordo com o procedimento de reparação da viga. A análise estrutural do equipamento é capaz de comprovar esta constatação. A figura 22 apresenta, em forma de esquema, a região onde se apresenta a trinca, ainda de acordo com o procedimento de reparo da viga.

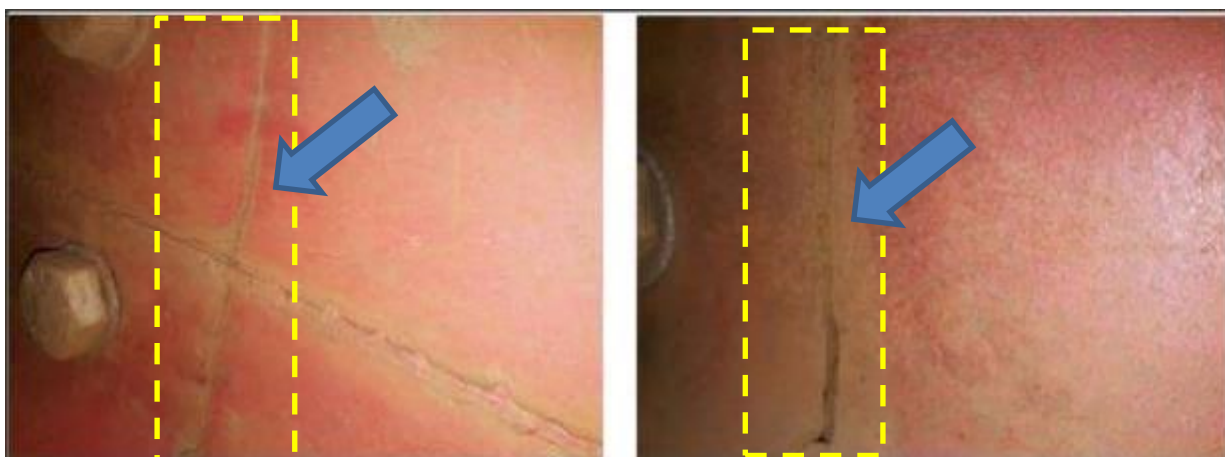
Figura 22 – Desenho Esquemático da Região da Trinca na Viga do Filtro Prensa.



Fonte: Projetista– Belo Horizonte - 2019

Na figura 23 é apresentada imagens das trincas constatadas em campo, na região interna do perfil tubular, que compõe a Viga de Sustentação do Filtro Prensa.

Figura 23 – Detalhe das Trincas na Região Interna dos Perfis Tubulares

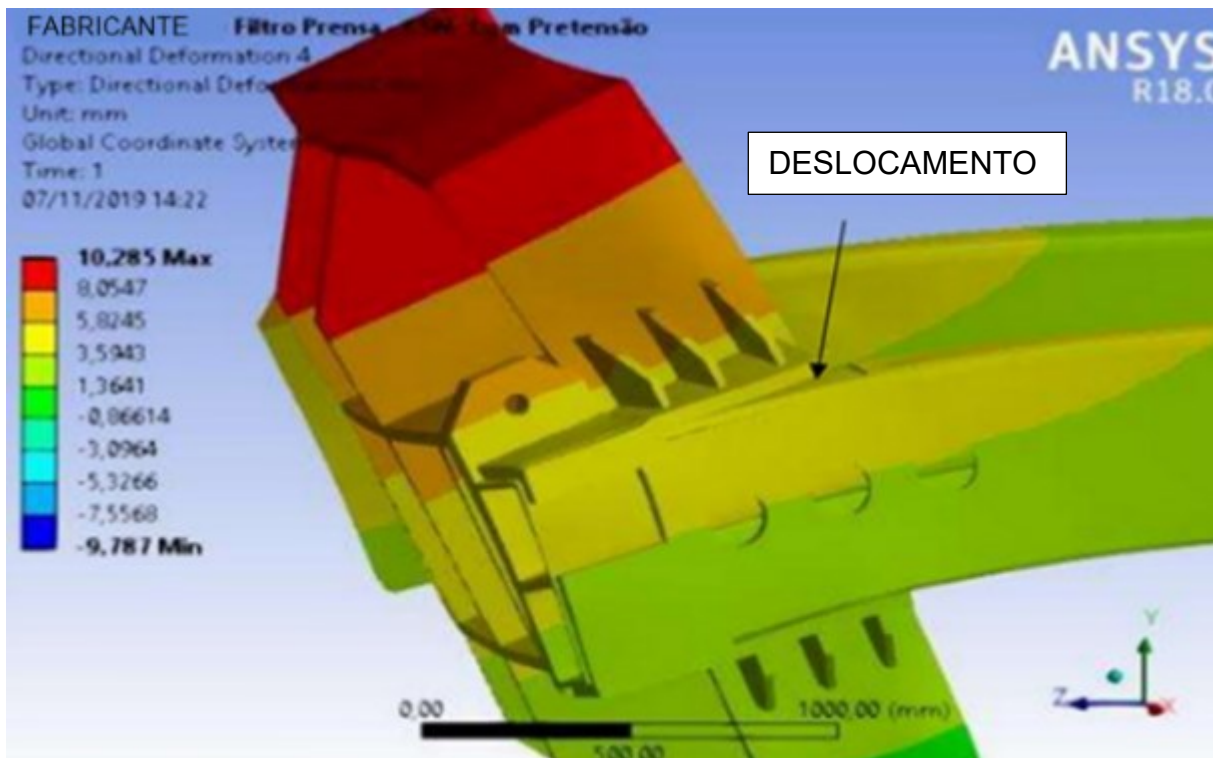


Fonte: Manutenção Cliente – Belo Horizonte - 2019.

3.3 SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO EQUIPAMENTO

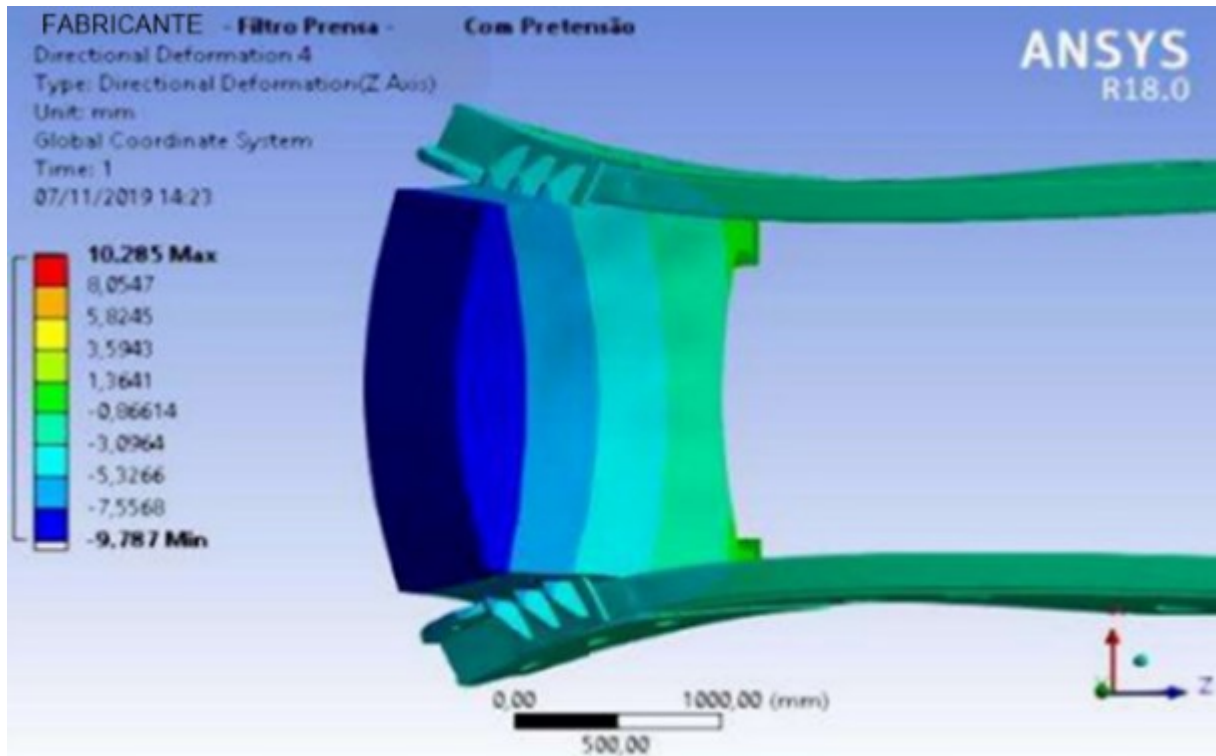
Conforme simulação de todo o equipamento. As figuras 24 a 28 demonstram em escala a deformação aumentada 50x para apresentar a qualidade do modelo que simula as condições de contato e atrito abrindo inclusive folgas entre os apoios em função do carregamento.

Figura 24 – Deformação da Estrutura do Filtro Prensa. Vista de lado - (Proj. fabricante)



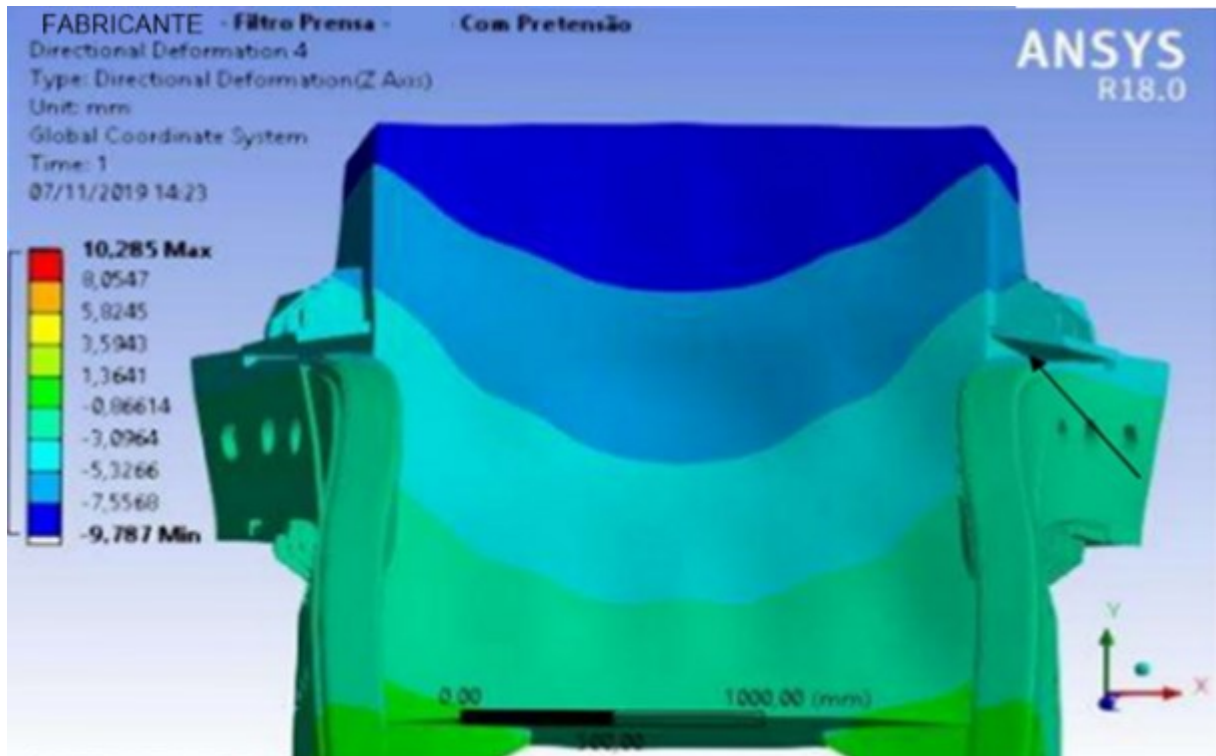
Fonte: Projetista – Deformação da Estrutura do Filtro Prensa - Belo Horizonte – 2019.

Figura 25 – Deformação da Estrutura do Filtro Prensa. Vista de topo.



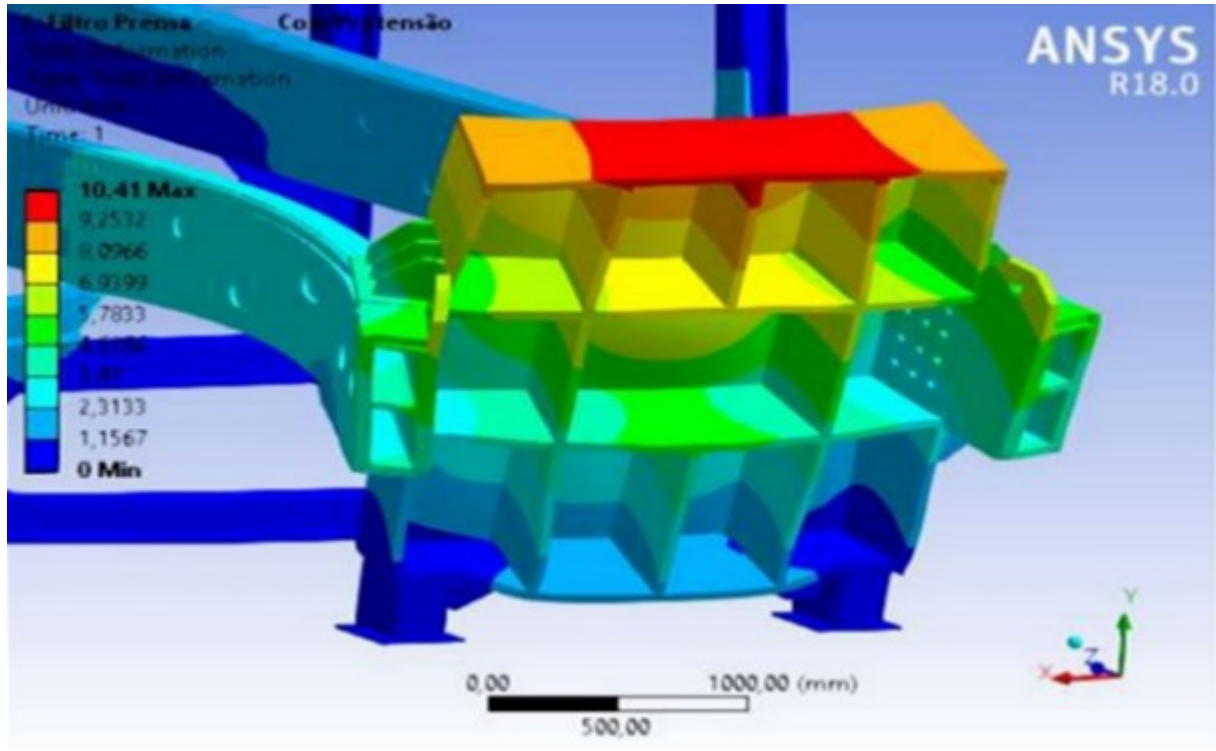
Fonte: Projetista, Belo Horizonte - 2019.

Figura 26 – Deformação da Estrutura do Filtro Prensa. Vista de frente



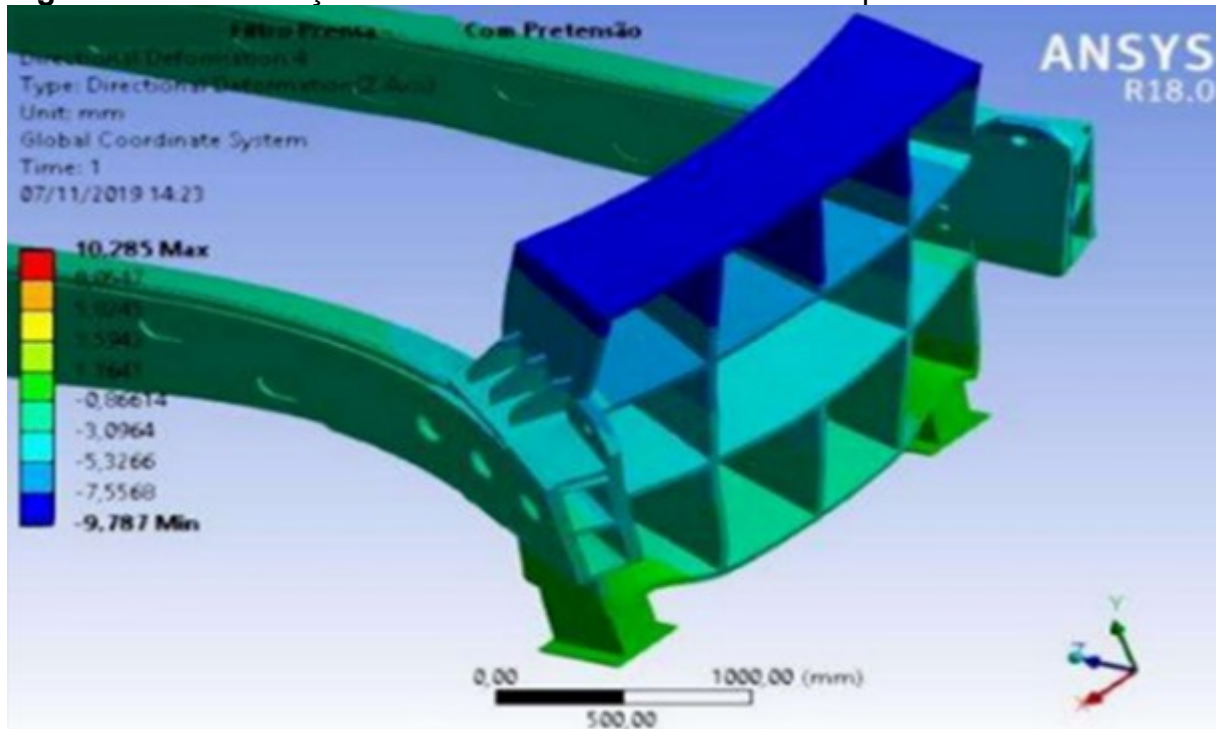
Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 27 – Deformação da Estrutura do Filtro Prensa. Perspectiva 1



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 28 – Deformação da Estrutura do Filtro Prensa. Perspectiva 2



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

3.4 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Os critérios de avaliação levam em consideração as tensões máximas atuantes, que se relacionam ao material do equipamento e consideram também a condição de fadiga, relacionadas ao número de ciclos de funcionamento.

3.5 TENSÕES ATUANTES

Os modelos simulados por elementos de volume são avaliados segundo os critérios da norma ISO 5049. A estrutura é composta pelo aço ASTM A572 GRAU 50. Tomam-se como referência os casos de solicitação mais severos previstos pela norma, para o qual as tensões admissíveis são: Ver quadro 5 abaixo.

Quadro 5 – Critérios de Avaliações de Tensões

ASTM A572 GRAU 50		
TIPO DE CARREGAMENTO	CRITÉRIO DE TENSÕES	TENSÃO ADMISSÍVEL [MPA]
CASO 3 (ver tabela norma página 33)	$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\varepsilon\sigma\gamma} / 1,2$	290

Fonte: ASTM, Norma A572- 2020

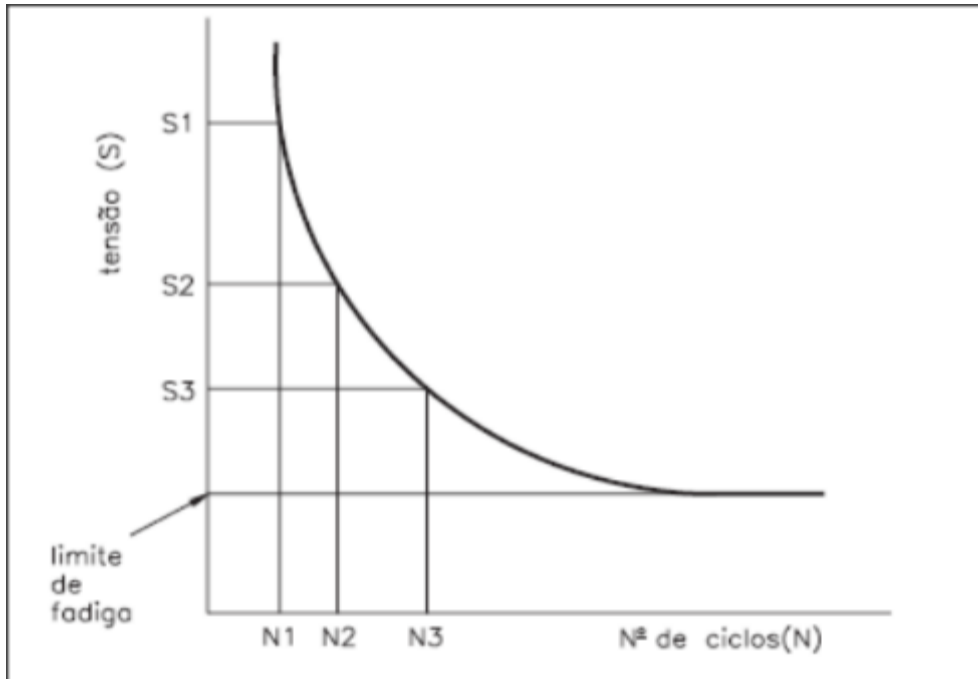
3.6 FADIGA

O cálculo de fadiga desenvolvido se baseia nos Métodos de Elementos Finitos utilizando as teorias aceitas e eficazes. O modelo de falha por fadiga utiliza a curva S-N, que consiste na relação entre tensão atuante e número de ciclos de trabalho do equipamento.

O ideal para não haver trincas ou falhas por fadiga é manter as tensões cíclicas abaixo do limite de fadiga, para vida infinita teórica. A vida infinita teórica consiste no número de ciclos requeridos de no mínimo **10⁶ ciclos**. Caso o equipamento atinja este valor de ciclos possíveis, conforme as teorias o equipamento, não apresentará falha por fadiga.

O comportamento de um material sobre fadiga com tensões alternadas (0 a máximo e retorna a 0) é descrito por curvas S-N, gráfico 1, onde S é a tensão e N é o número de ciclos até a falha.

GRÁFICO 1 – Gráfico CURVA -S-N.



Fonte: <http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/ea000753.pdf> -2020

3.7 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Os seguintes documentos são referenciados como base pela projetista são:

- Arranjo Geral – Filtro Prensa;
- Diagrama de Montagem – Filtro Prensa;
- Filter Press – Procedimento de Reparação da Viga – Fornecedor Externo Equipamento;
- Relatório de Extensometria – Fornecedor Externo;

Nota: Foram realizados, também, levantamentos de campo, pois os desenhos existentes são na maioria esquemáticos sem espessuras ou dimensões.

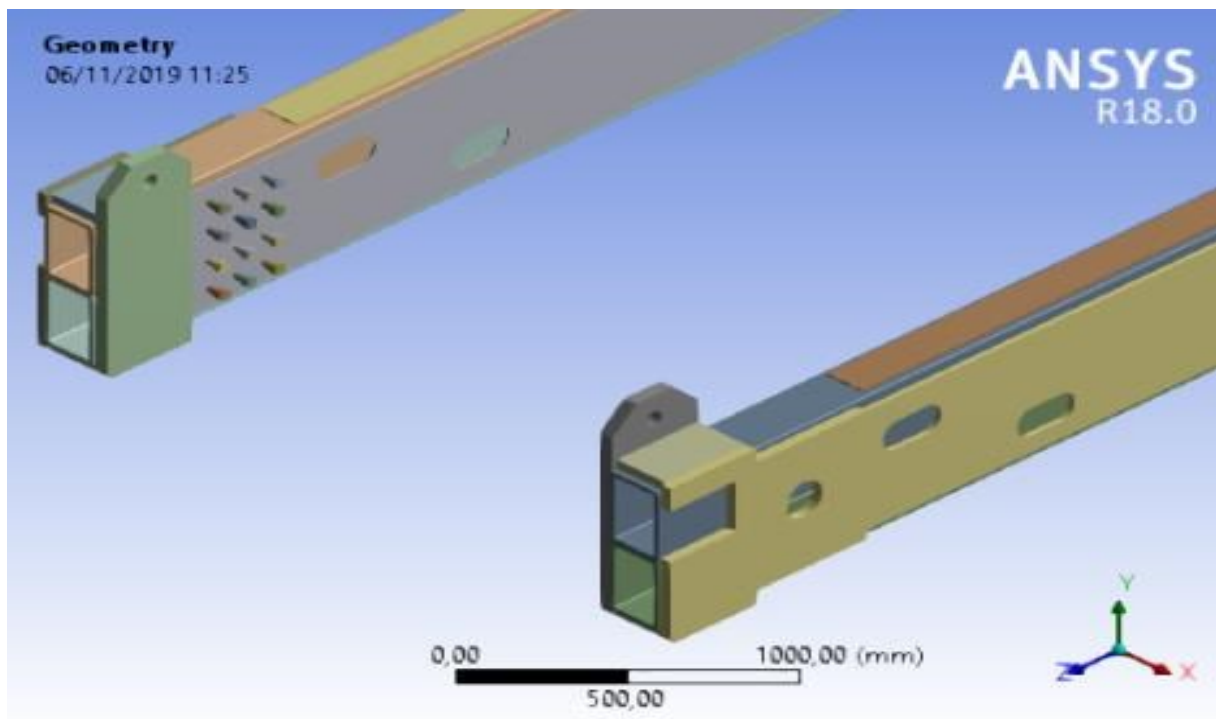
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DA ESTRUTURA ORIGINAL PELO PROJETISTA

4.1.1 Estrutura Original Sem Pretensão nos Parafusos

A análise sem pretensão nos parafusos (ver figura 29), visa verificar a condição da estrutura na condição em que os parafusos de ligação se encontram com baixo torque de aperto.

Figura 29 - Detalhes Estrutura da Viga de Sustentação - Parafusos sem Pretensão.

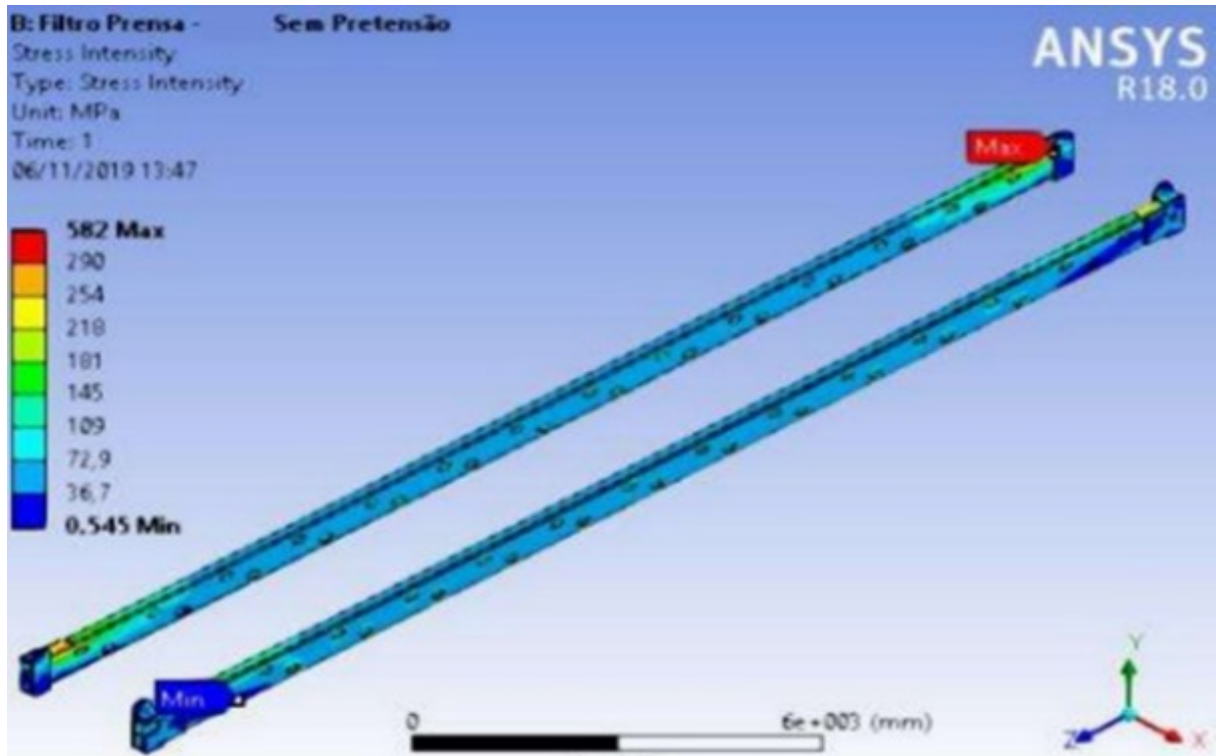


Fonte: Projetista – Belo Horizonte - 2019

Análise das Tensões – (Tensões Máximas)

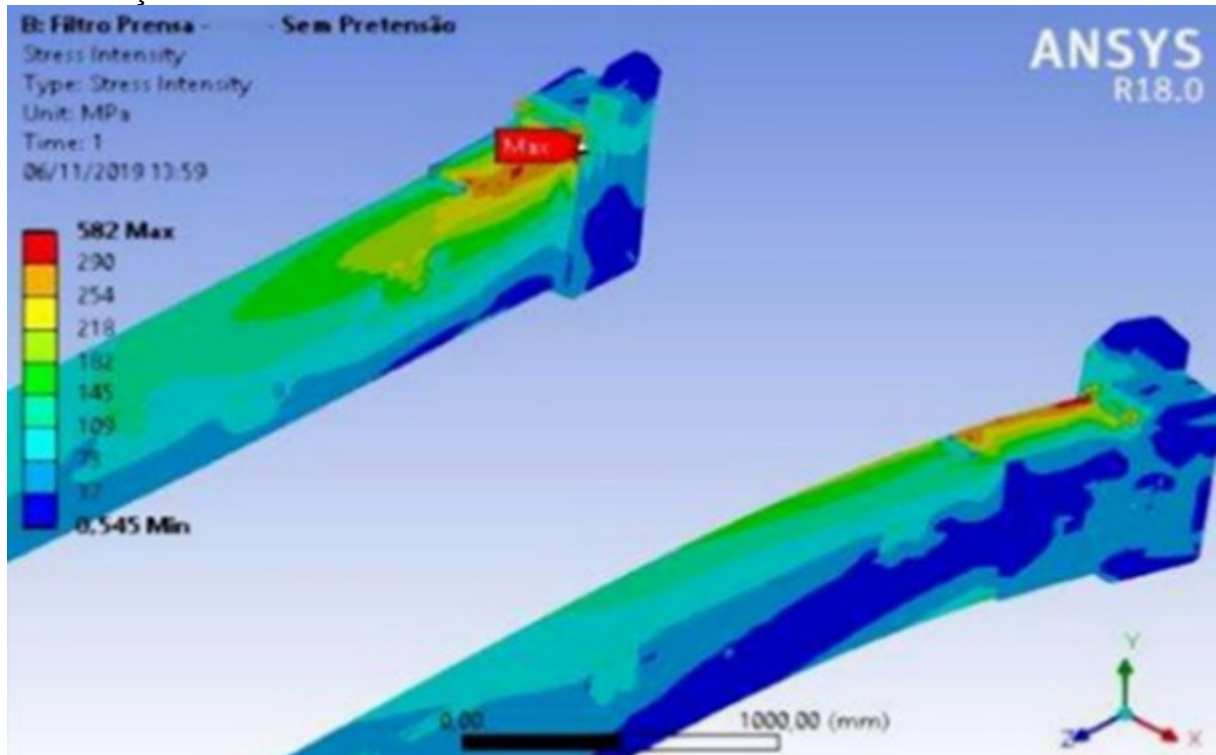
As figuras: 30, 31, 32, 33 e 34, apresentam as tensões obtidas para a estrutura de interesse Viga de Sustentação. Observa-se que a tensão máxima atinge cerca de **582 MPa** na estrutura da Viga de Sustentação, o valor limite de tensão é **290 Mpa**, portanto superior ao limite admissível.

Figura 30 – Distribuição das Tensões na Região de Interesse.



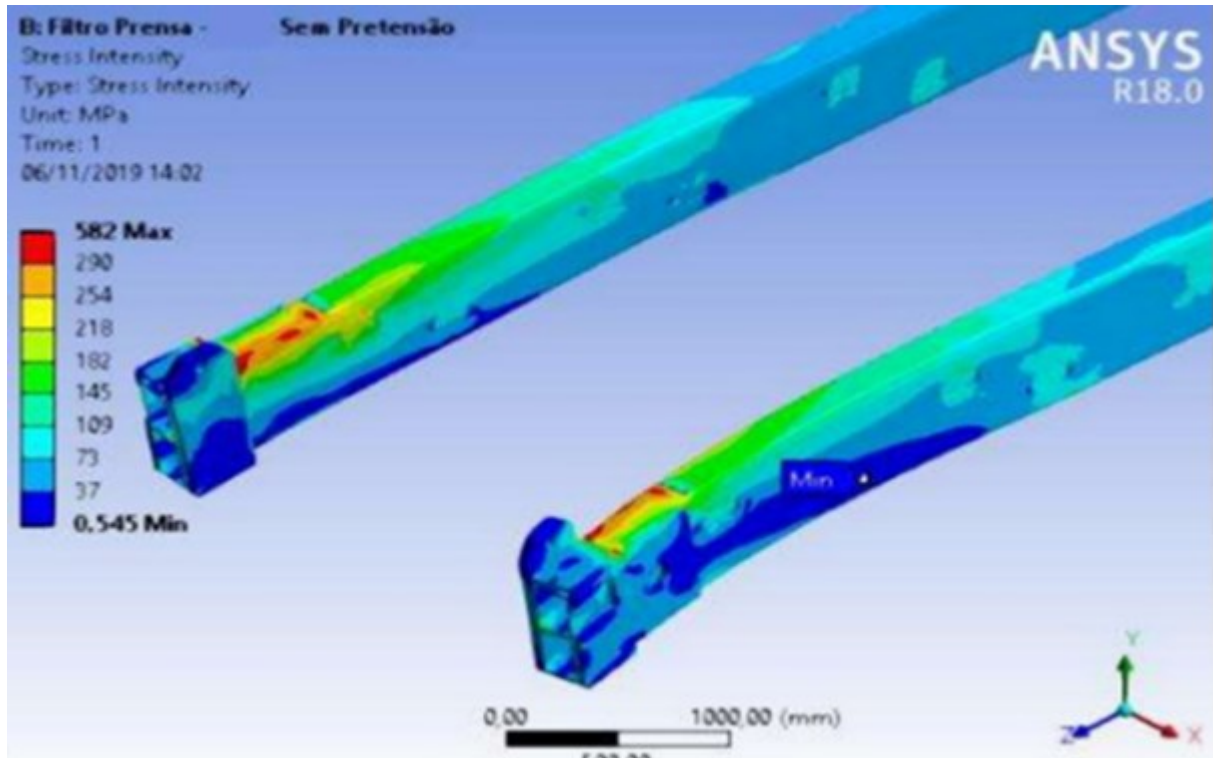
Fonte: Distribuição das Tensões na Região de Interesse - Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 31 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.



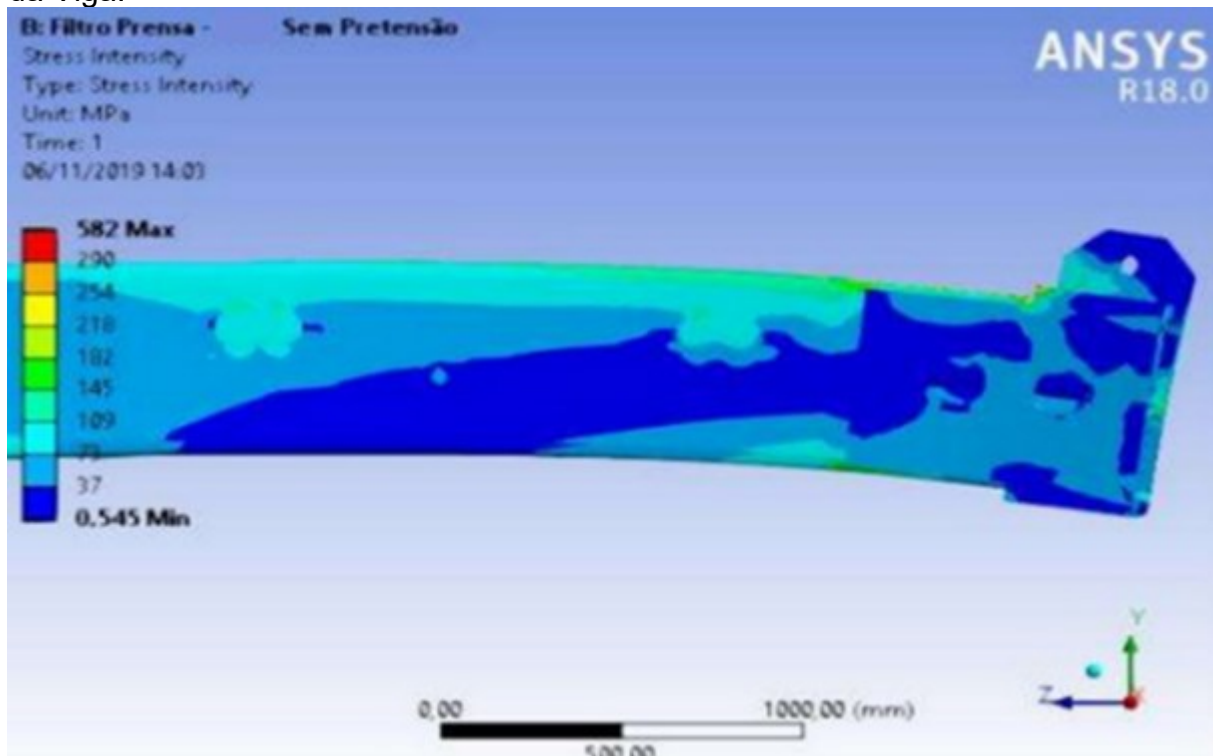
Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 32 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindro.



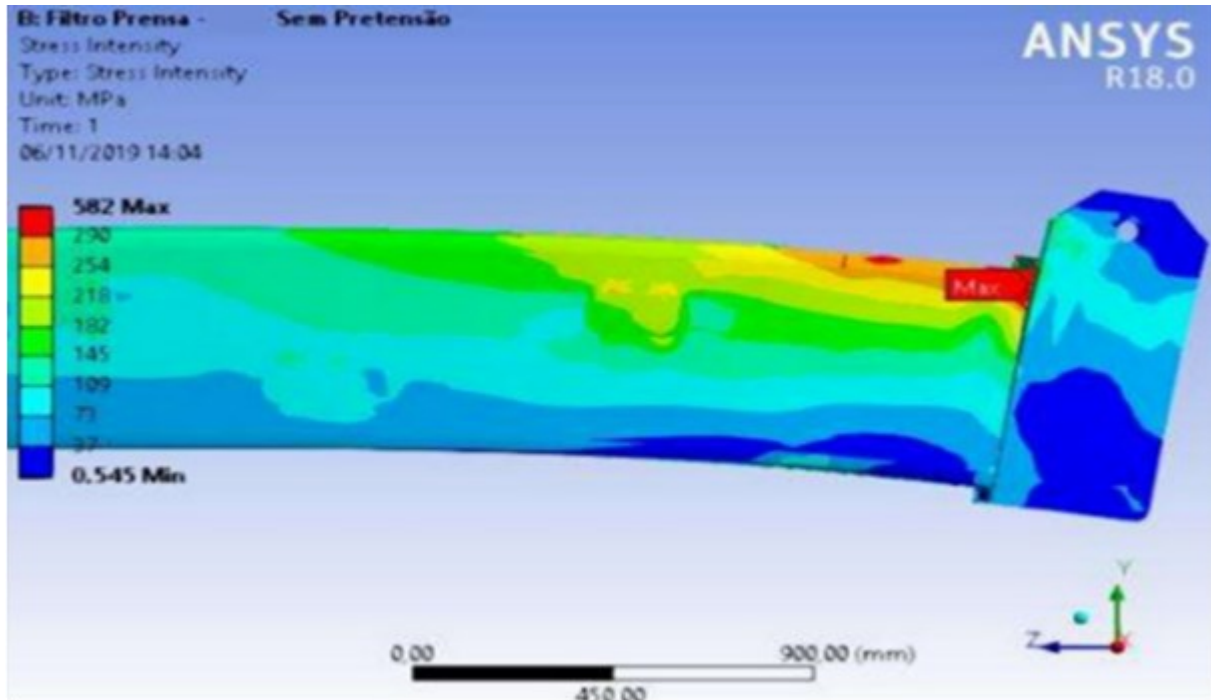
Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 33 – Detalhe da tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Externo da Viga.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 34 – Detalhe da tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno.

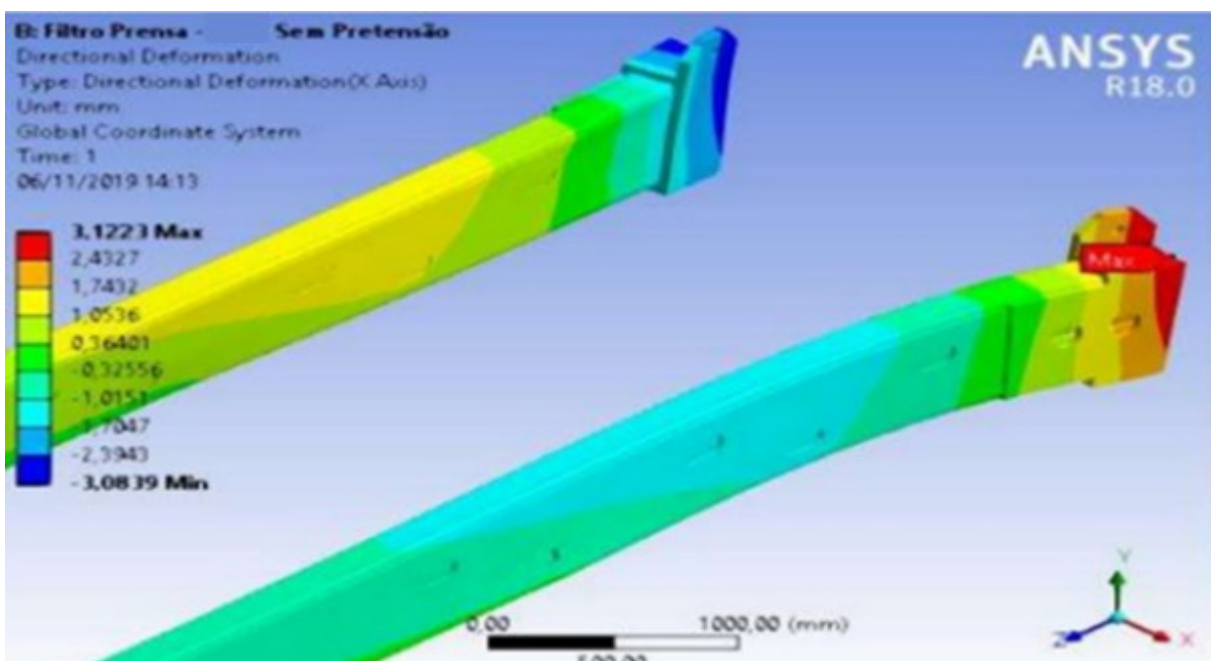


Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Análise da Deformação – Direção “X, Y e Z”.

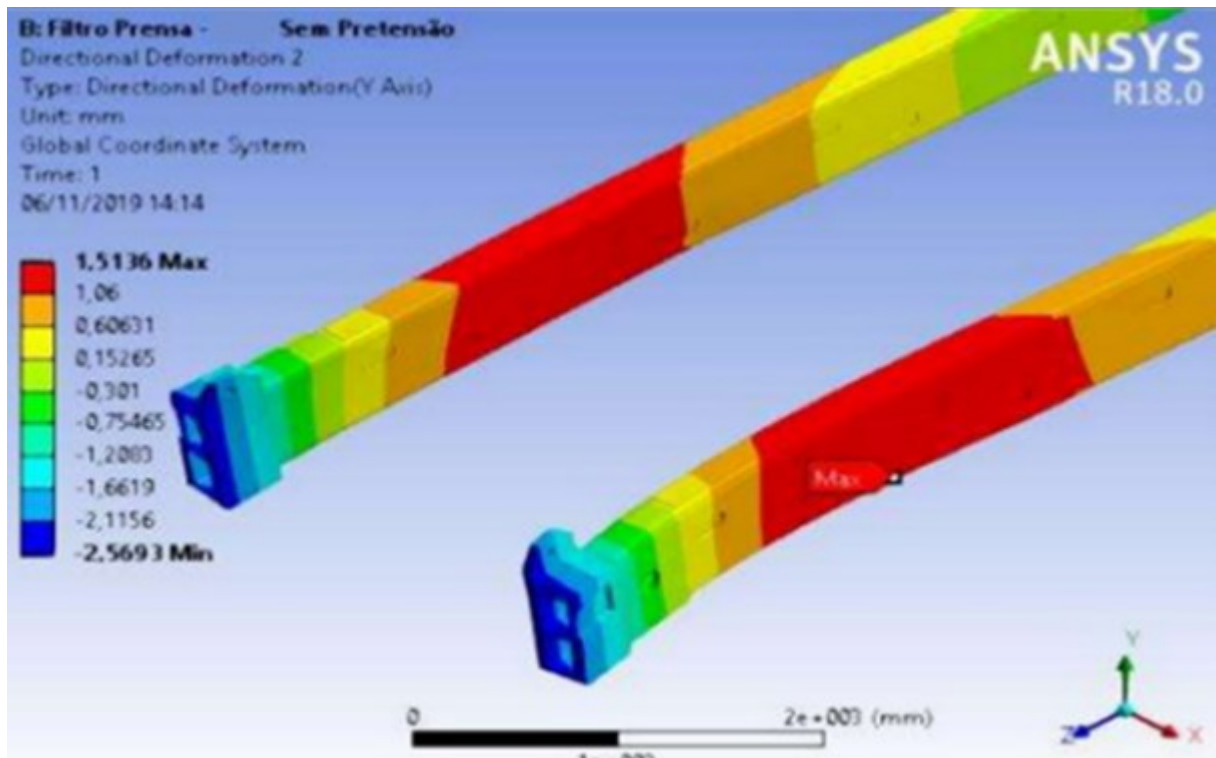
As figuras: 35, 36, e 37, apresentam as tensões obtidas para a estrutura de interesse Viga de Sustentação. Nas direções X, Y e Z.

Figura 35 – Detalhe da Deformação na Direção X para Região de Interesse.



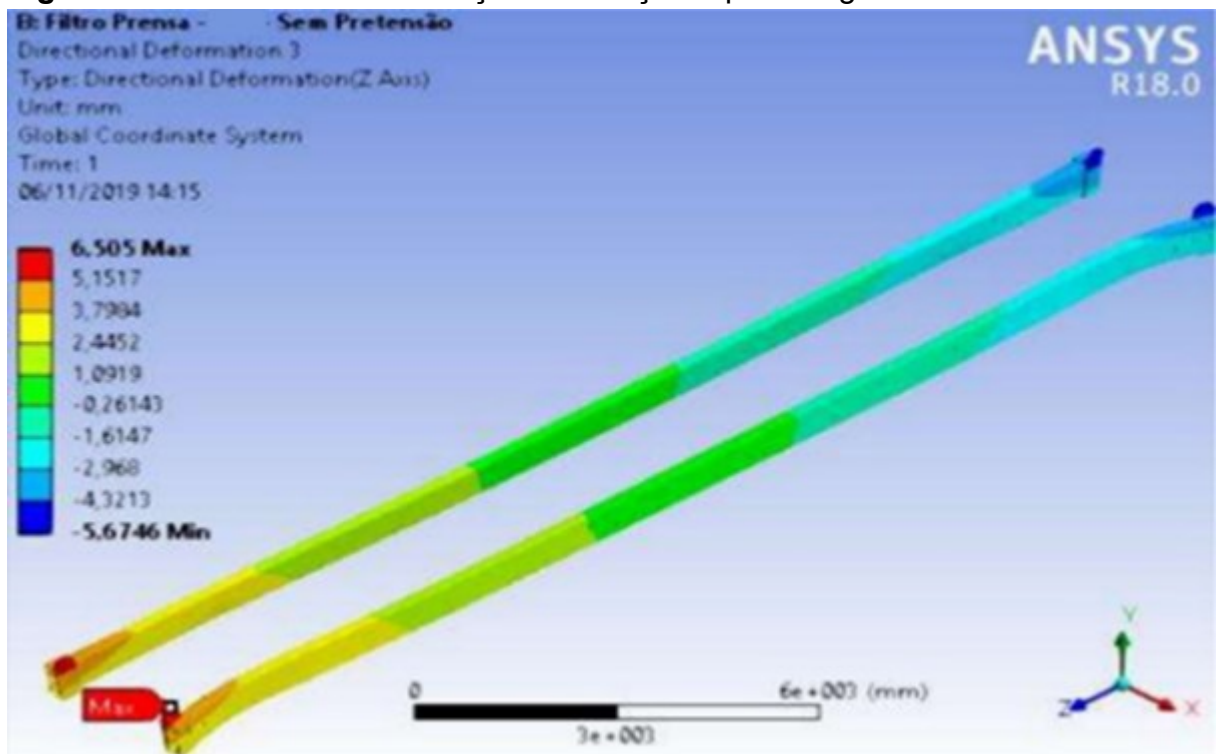
Fonte: Projetista - Belo Horizonte – 2019

Figura 36 – Detalhe da Deformação na direção Y para Região de Interesse.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 37 – Detalhe da Deformação na Direção Z para Região de Interesse.

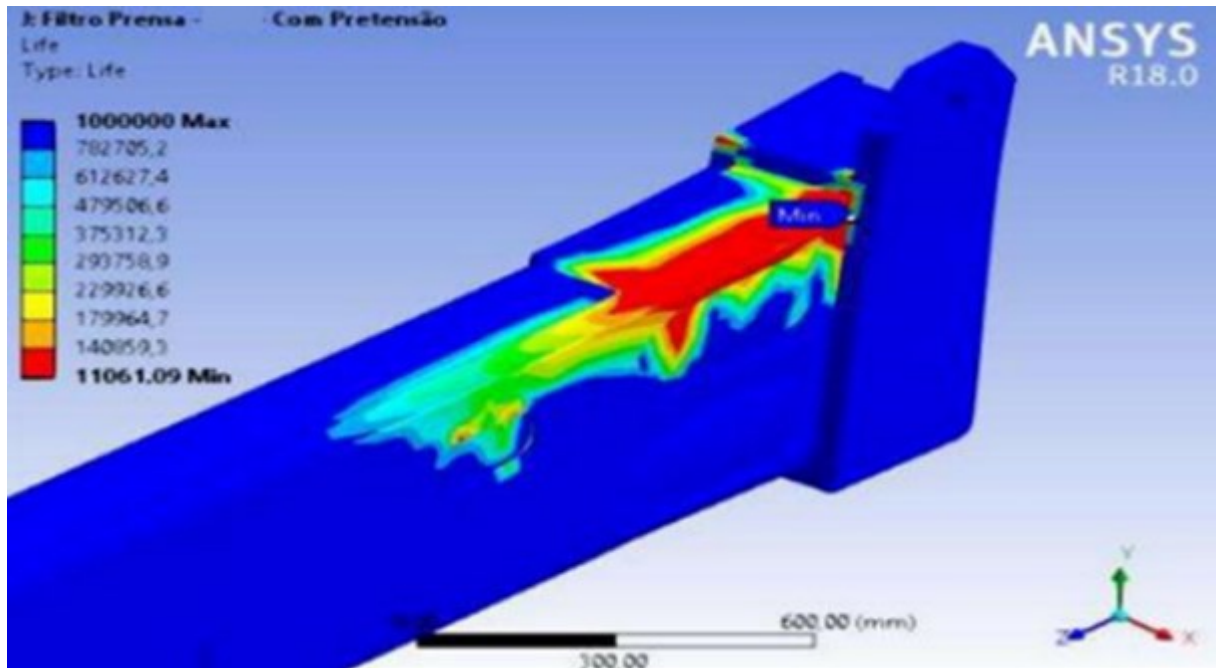


Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019

Análise da Fadiga

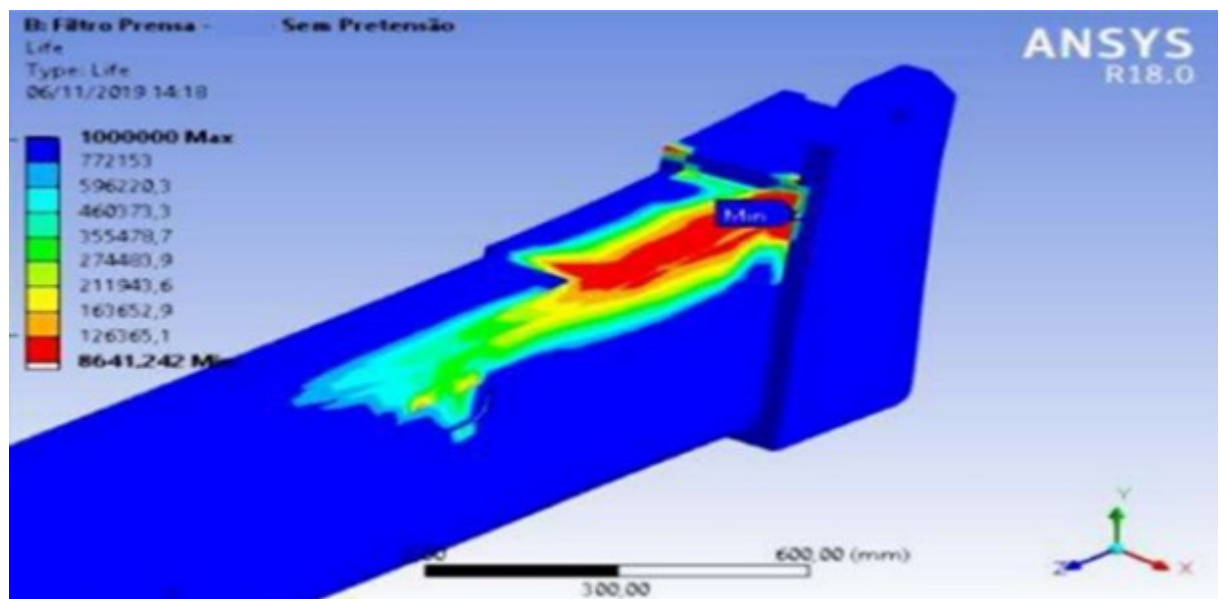
As figuras 38 e 39 mostram a condição atuação geradora de fadiga lado oposto aos cilindros hidráulicos (Aplicação da força).

Figura 38 – Análise de Fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2020.

Figura 39 – Análise de Fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindros.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte – 2020.

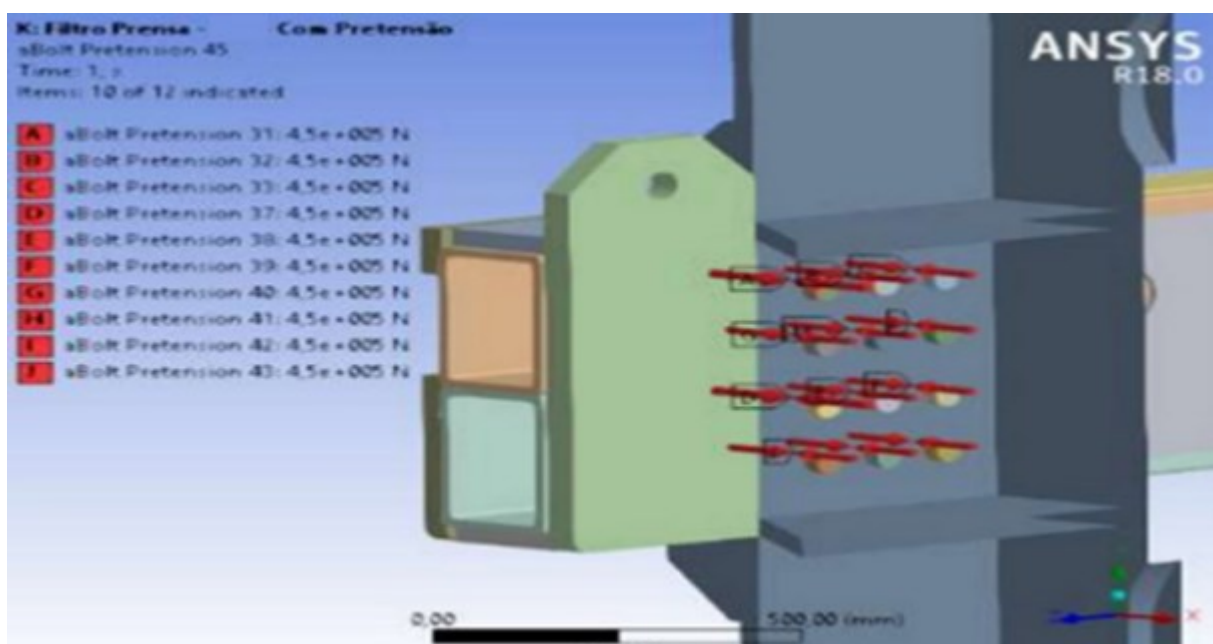
Conforme foi verificado que considerando o ciclo de trabalho do equipamento de 40 ciclos por dia, conforme já especificado, o cálculo mostra que a estrutura da viga apresenta uma vida de 8641 ciclos exatamente nas regiões onde acontecem as trincas, verificado procedimento de reparação. Este resultado demonstra que o equipamento apresenta uma vida útil de aproximadamente 8 meses.

4.1.2 Estrutura Original Com Pretensão nos Parafusos

Análise das Tensões

Avaliação da força de aperto nos parafusos (CLASSE 10.9 ASTM). Foi verificado que os parafusos de fixação do Filtro Prensa foram modelados conforme o desenho de referência – DM-582975 (anexo 1 e 2). De acordo com o projeto, foram previsto 12 parafusos para cada lado da Viga de Sustentação os fixam à “Cylinder Head” e “Feeding Head”, cabeças fixas do lado dos cilindros e do lado da alimentação, na porção interna da Viga. Ainda de acordo com o desenho de referência, os parafusos são de rosca M30 e classe 8.8. A figura 40 apresenta a carga aplicada de pretensão, e de acordo com a especificação do projeto. Portanto dentro do especificado

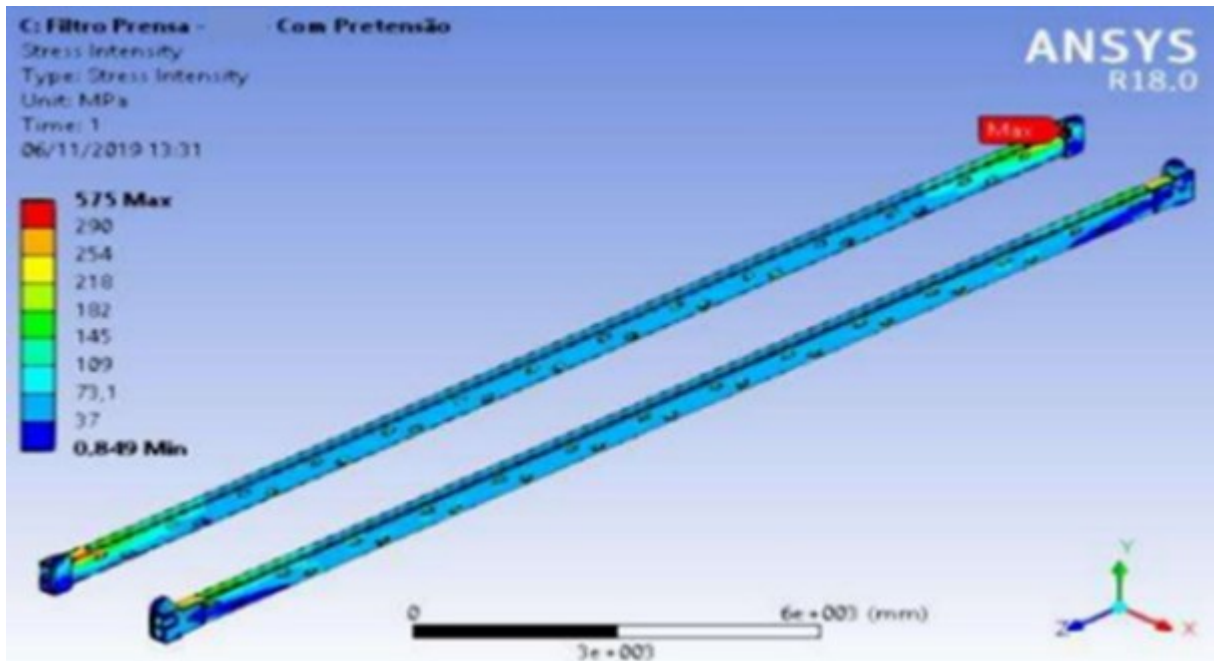
Figura 40 – Detalhe dos Parafusos e valores de Pretensão Aplicados na Região de Interesse.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2020.

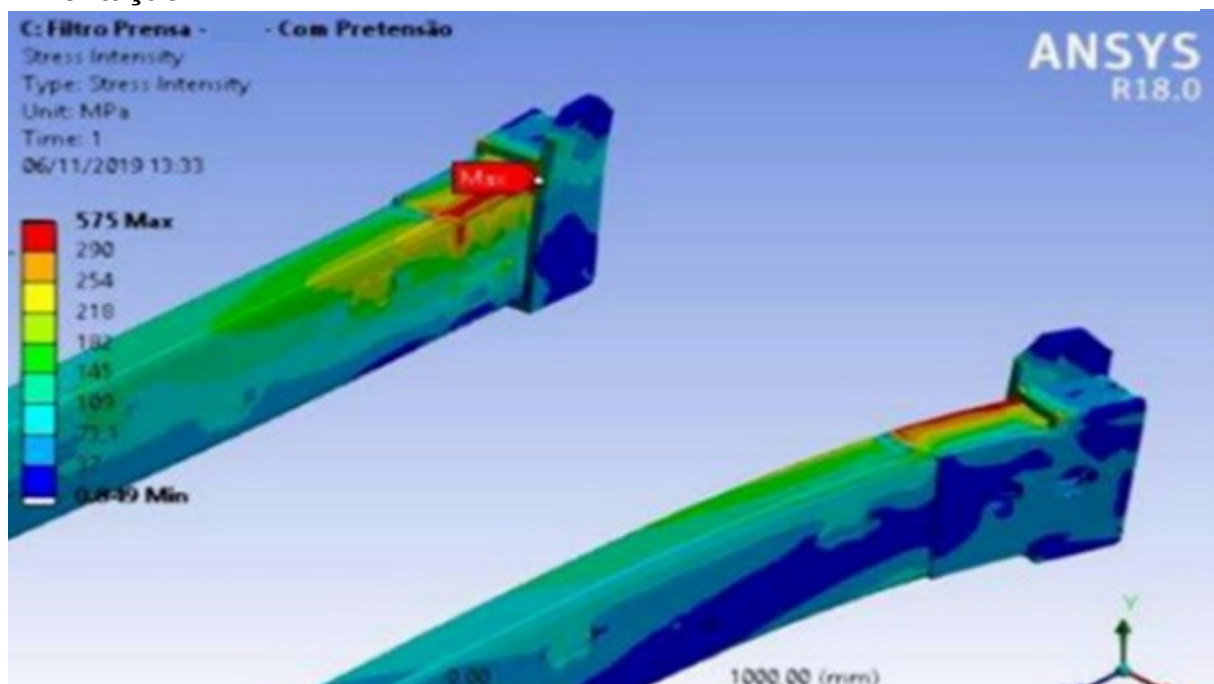
As figuras 41 a 45, apresentam as tensões obtidas para a estrutura de interesse Viga de Sustentação. Observa-se que a tensão máxima atinge cerca de **575 MPa** na estrutura das vigas, o valor limite de tensão é **290 Mpa**, sendo, portanto, tensões máximas acima ao limite admissível.

Figura 41 – Distribuição das Tensões na Região de Interesse



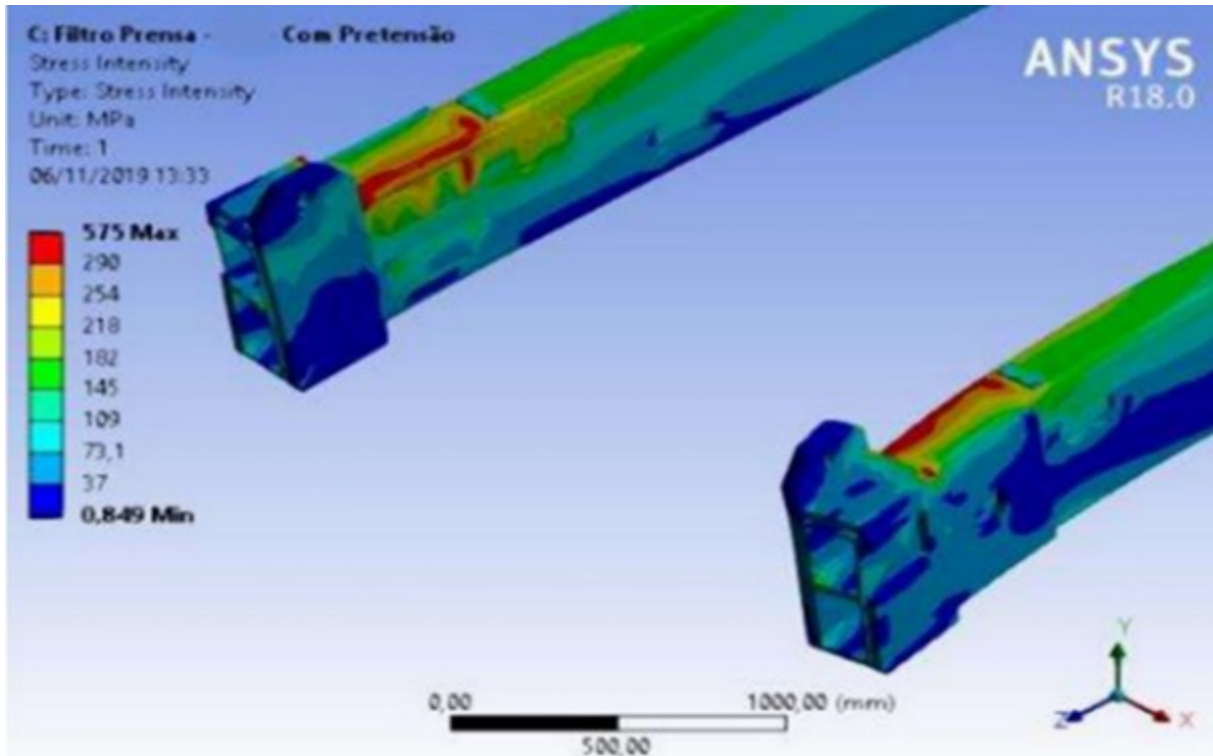
Fonte: Projetista– Belo Horizonte – 2020.

Figura 42 – Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação



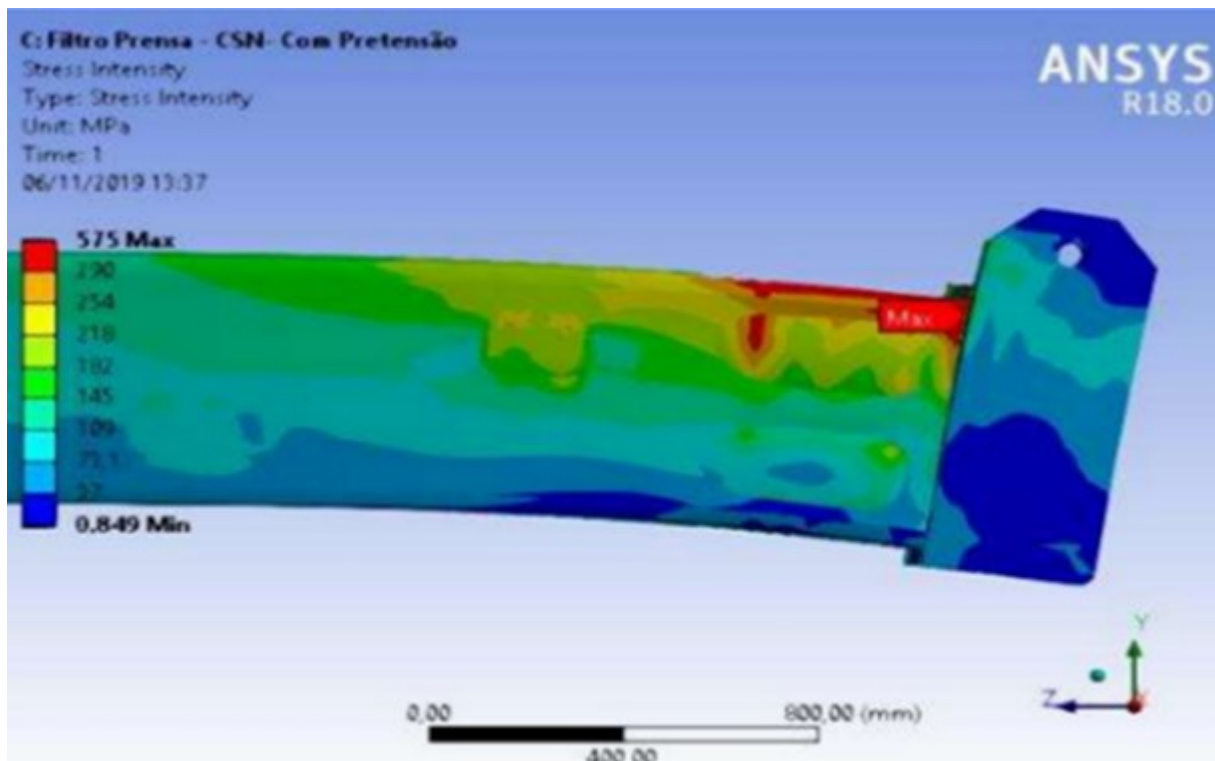
Fonte: Projetista - Tensão Máxima na Região de Interesse – Belo Horizonte - 2020

Figura 43 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindro.



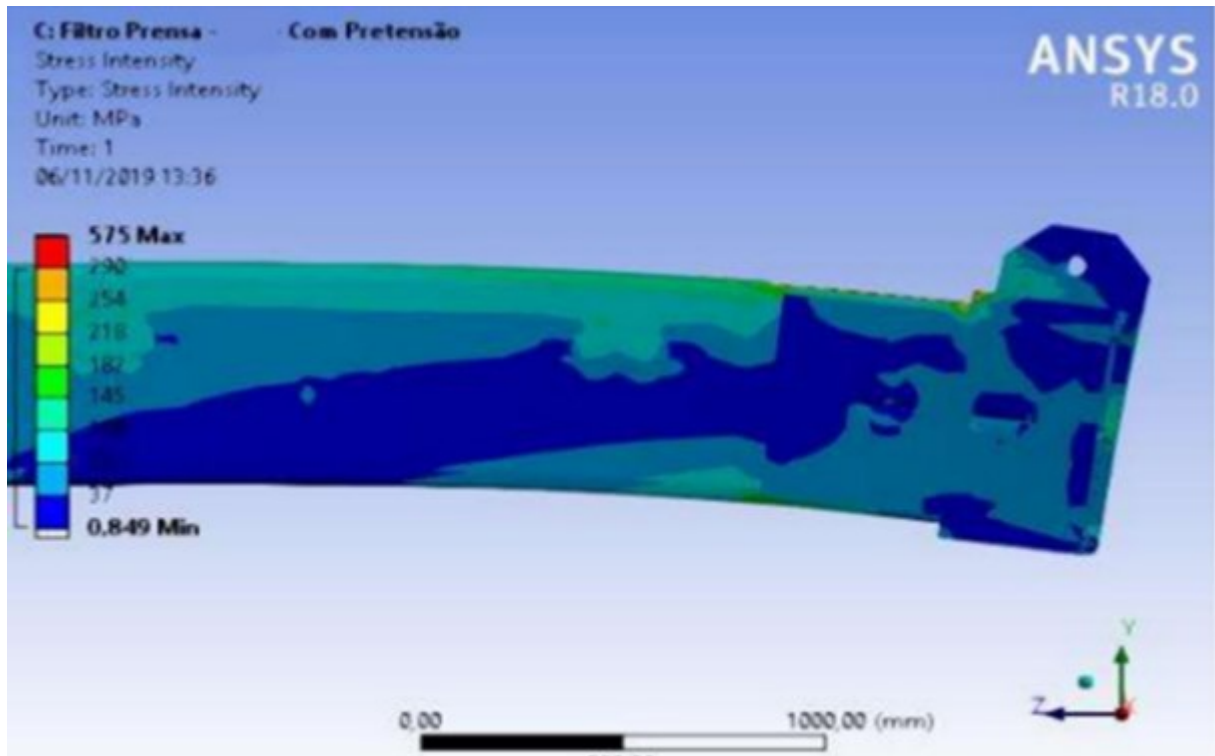
Fonte: Projetista – Belo Horizonte – 2020.

Figura 44 – Tensão máxima na Região de Interesse – Vista Lado Externo da Viga.



Fonte: Projetista – Belo Horizonte – 2020

Figura 45 – Detalhe da tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno da Viga.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte – 2020.

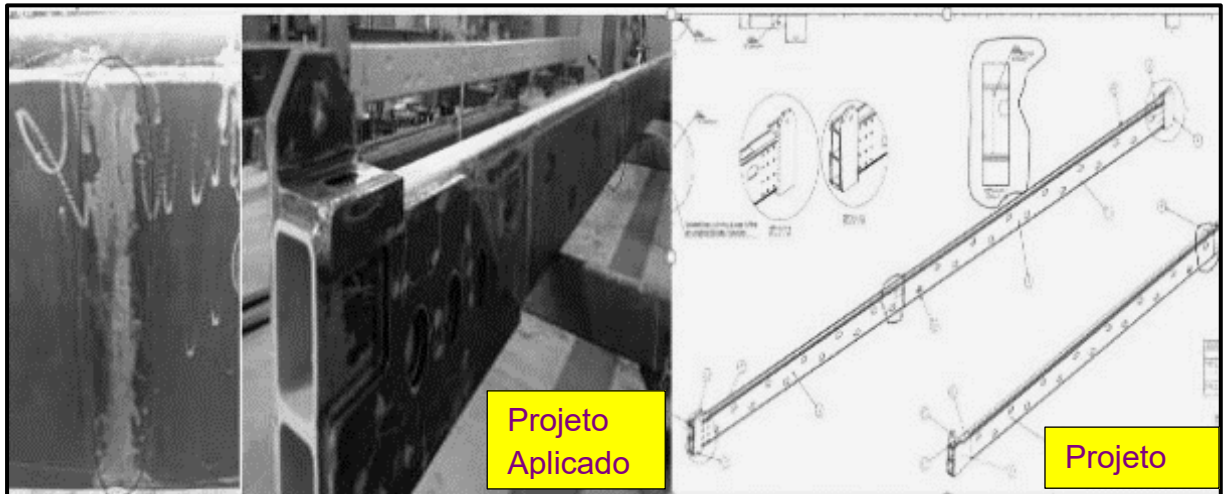
Foi verificado que considerando o ciclo de trabalho do equipamento de 40 ciclos por dia, conforme já especificado por este memorial, o cálculo mostra que a estrutura da viga apresenta uma vida de 11061 ciclos, exatamente nas regiões onde acontecem as trincas, explicitadas pelo relatório procedimento de reparação do Fornecedor.

Este resultado demonstra que o equipamento apresenta uma vida útil de aproximadamente 9 meses.

4.2 REFORÇO NA ESTRUTURA, SUGERIDO PELO FORNECEDOR

O reforço indicado pela Fornecedor consiste na troca da chapa externa de reforço da viga por uma chapa mais extensa e com geometria suavizada conforme figura 46.

Figura 46 - Reforço Sugerido pelo Fornecedor. (Detalhes e Aplicação)

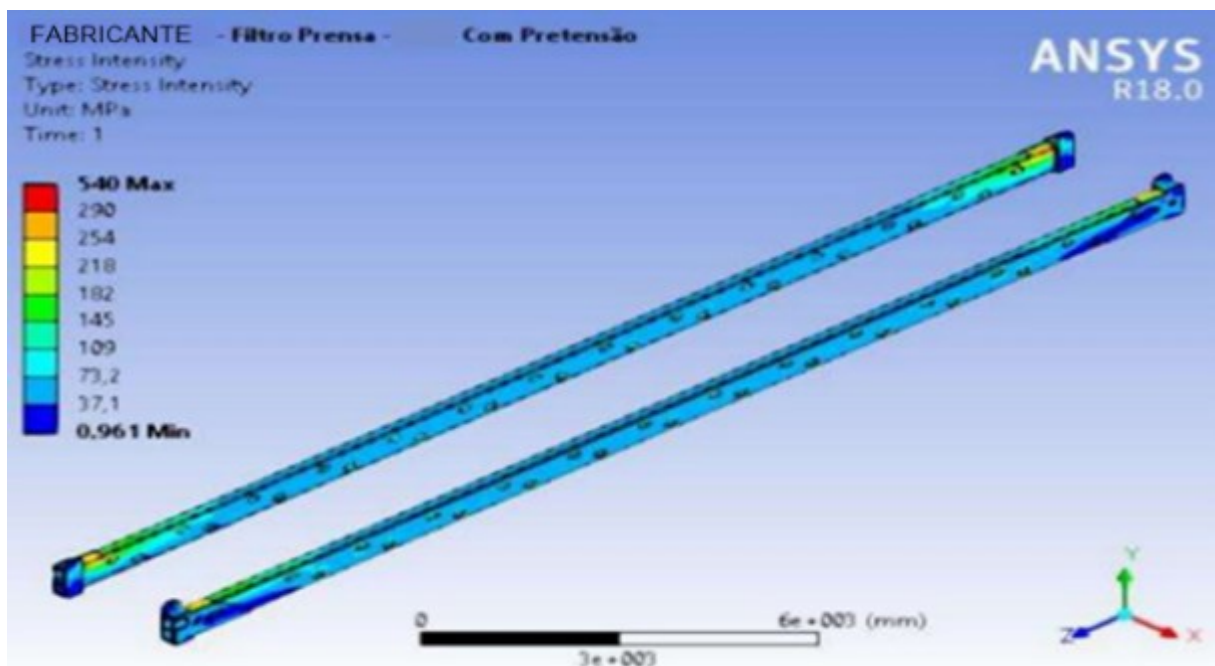


Fonte: Projetista – Belo Horizonte - 2019

Análise das Tensões - (Tensões Máximas)

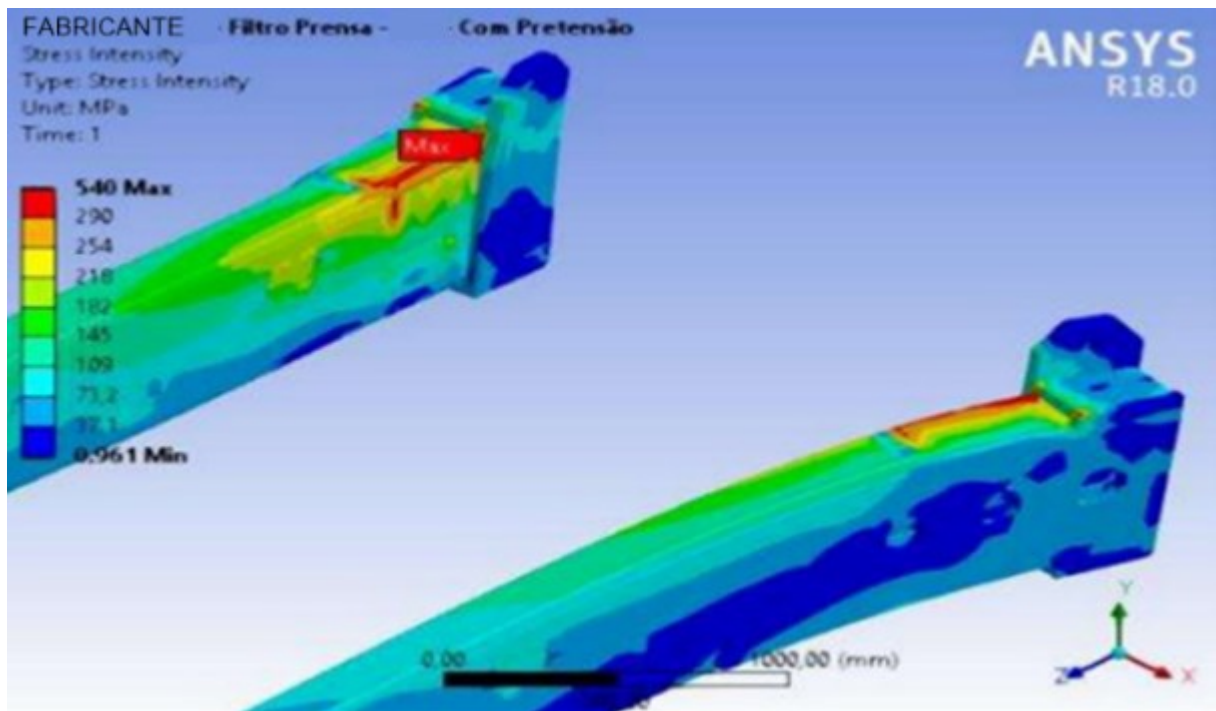
As figuras 47 a 51 informam que as tensões obtidas para a estrutura de interesse viga de sustentação posposta pelo fabricante. Observando que a tensão máxima atinge cerca de **540 Mpa** na estrutura da Viga de Sustentação, o valor limite de tensão é **290 Mpa**, portanto superior ao limite admissível.

Figura 47 – Distribuição das Tensões na Região de Interesse.



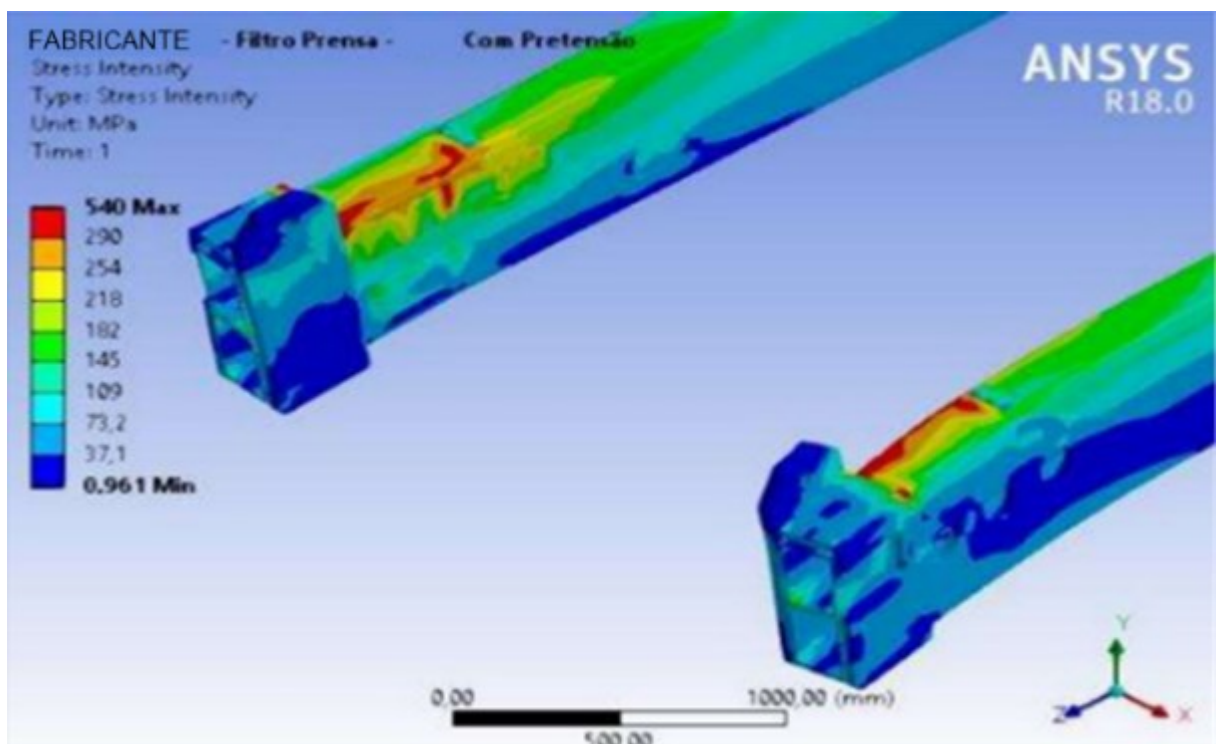
Fonte: Fornecedor, Distribuição das Tensões na Região de Interesse - Belo Horizonte - 2020.

Figura 48 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.



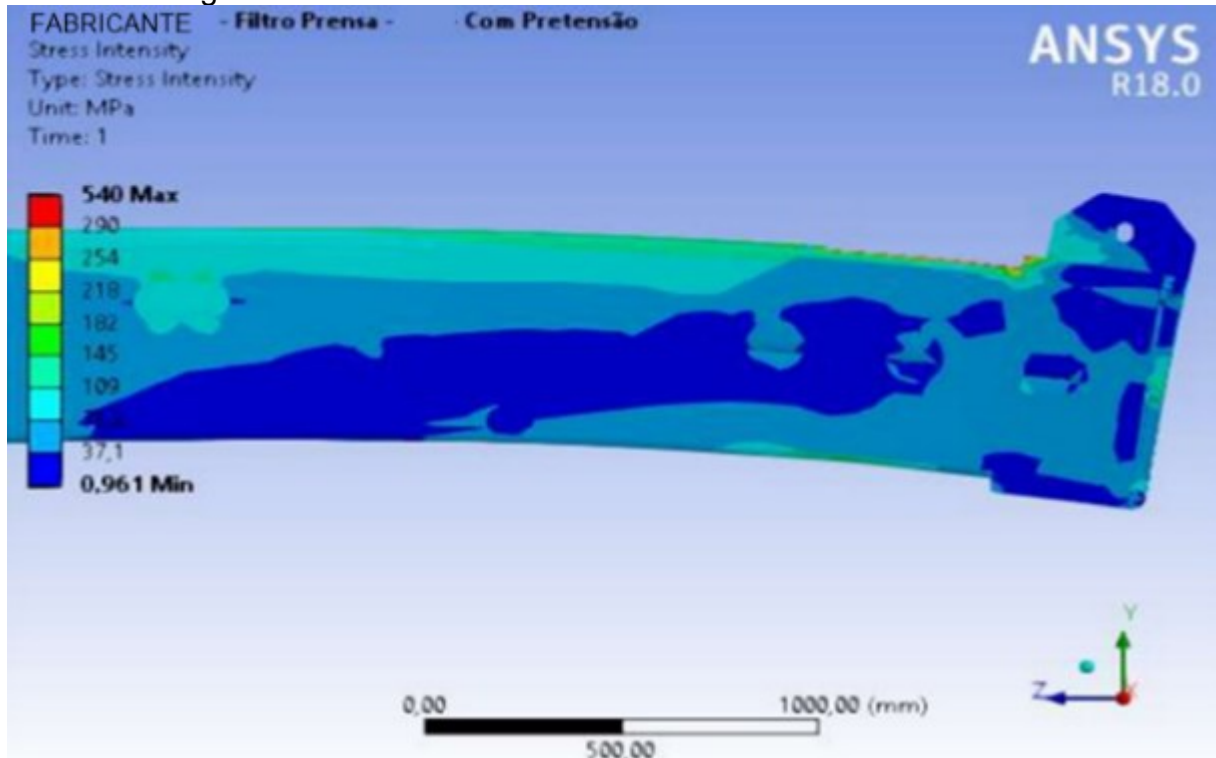
Fonte: Fornecedor, Belo Horizonte - 2020.

Figura 49 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindro.



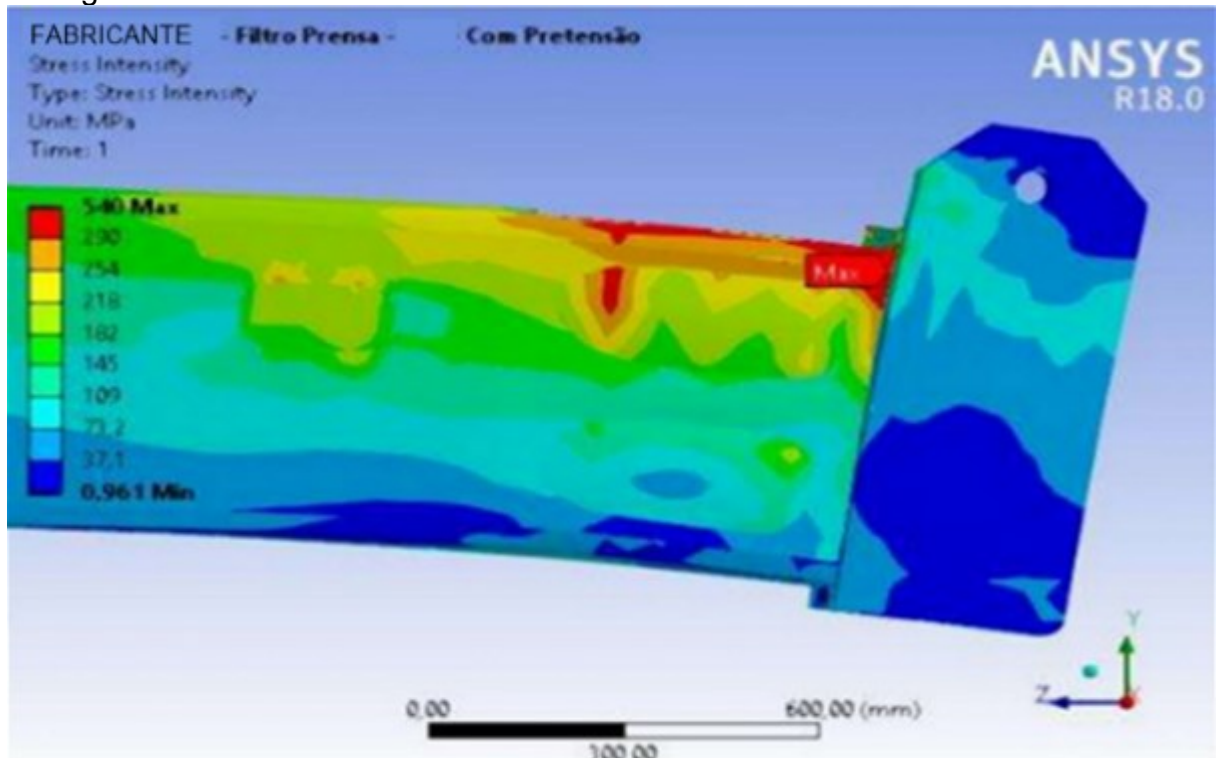
Fonte: Fornecedor - Belo Horizonte - 2020.

Figura 50 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Externo da Viga.



Fonte: Fornecedor – Belo Horizonte - 2020.

Figura 51 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno da Viga.

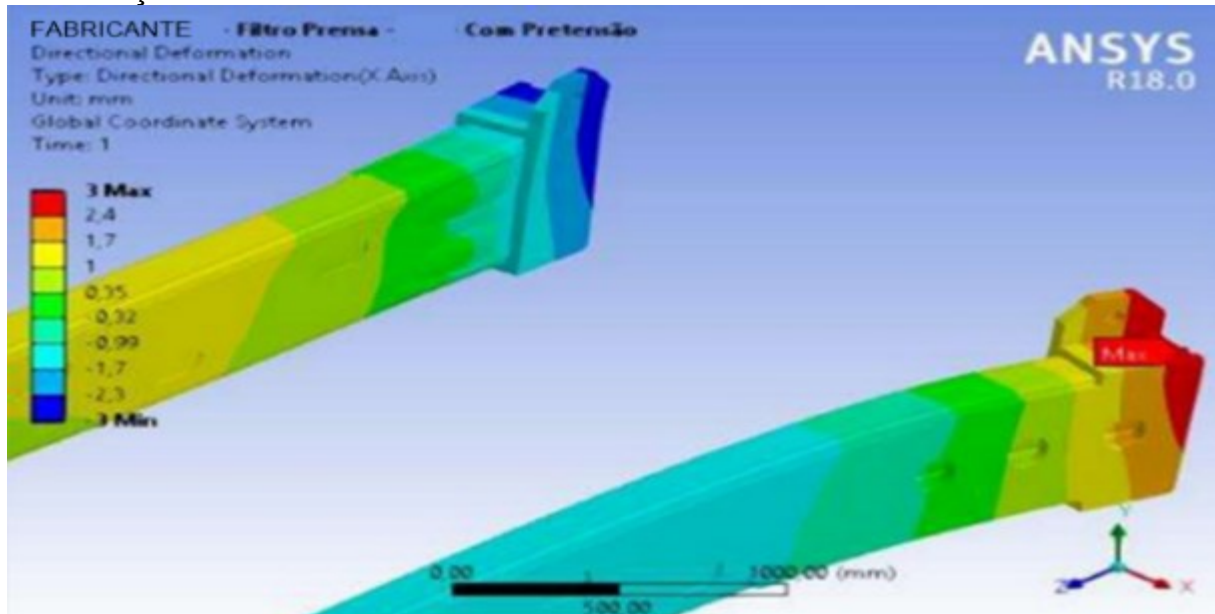


Fonte: Fornecedor, Belo Horizonte - 2020.

Análise da Fadiga

As figuras 52 e 53, demonstram a condição atuação geradora de fadiga lado oposto aos cilindros hidráulicos (Aplicação da força).

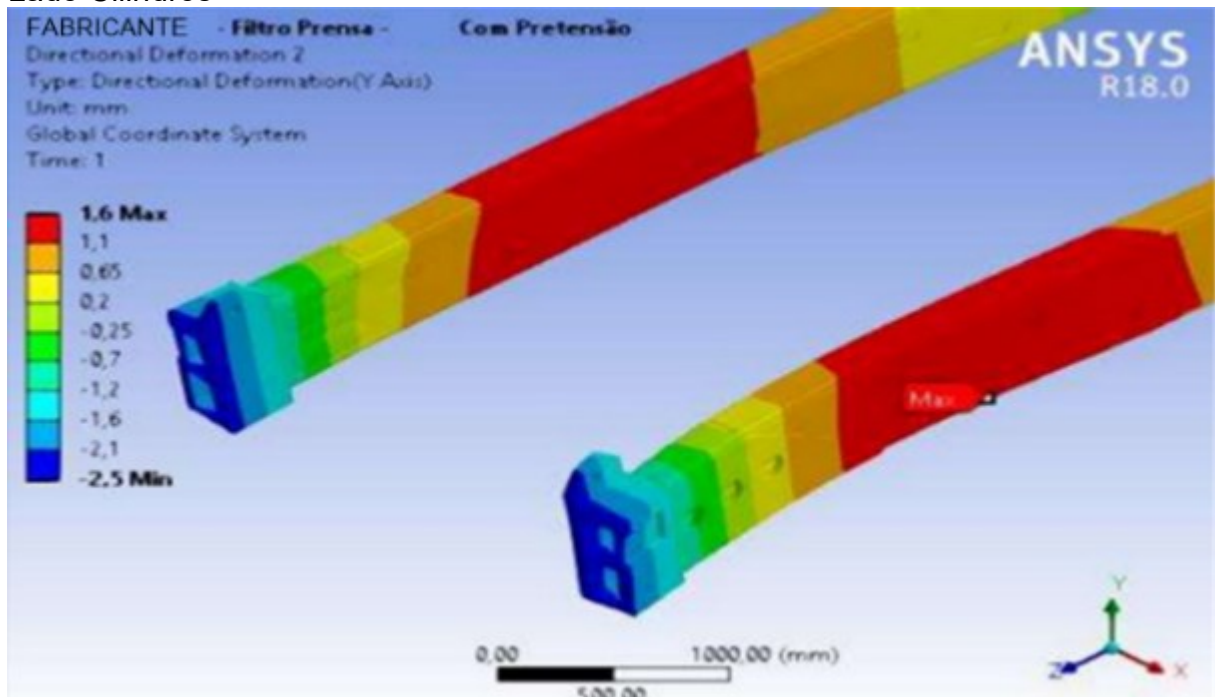
Figura 52 – Detalhe análise de fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.



Fonte: Projetista –

Belo Horizonte - 2019.

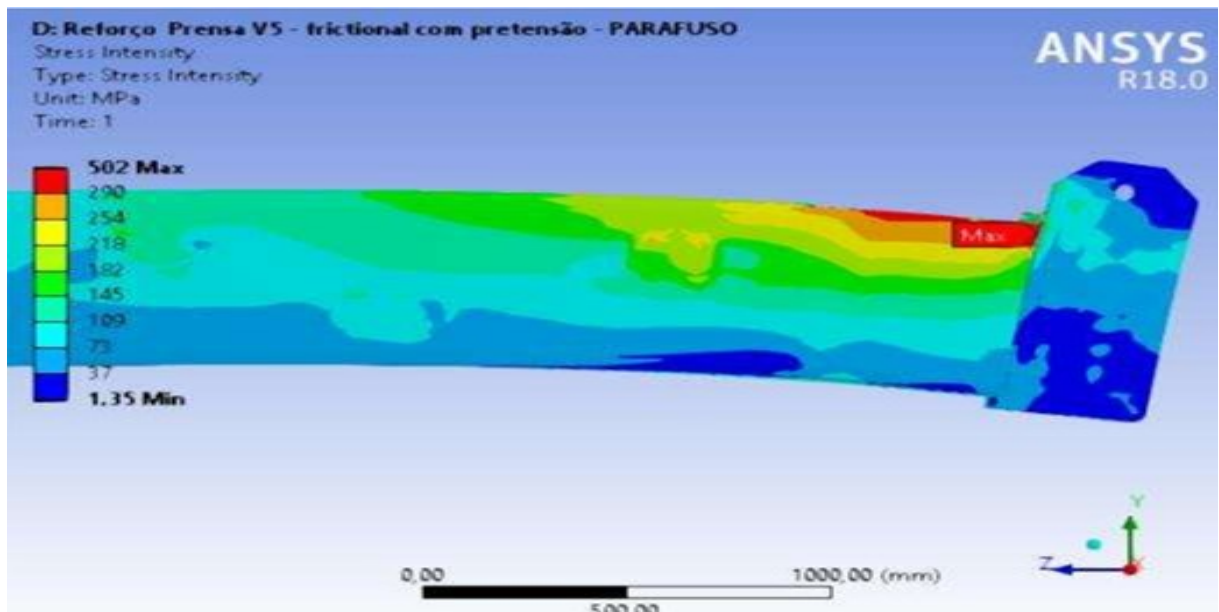
Figura 53 – Detalhe análise de Fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindros



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

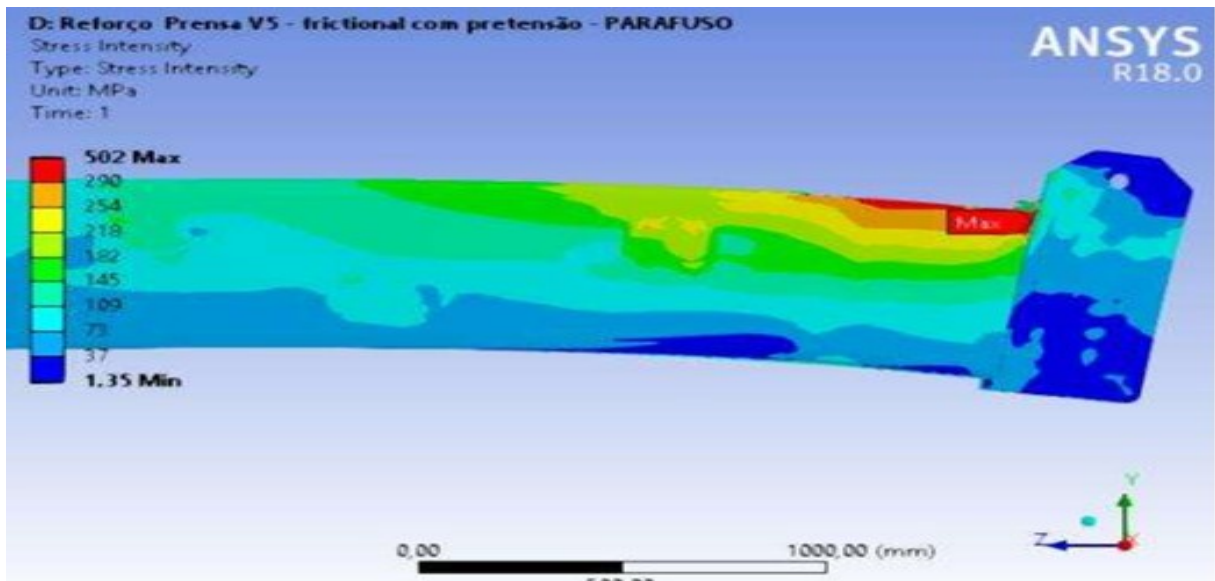
Com os reforços demonstrado nas figura 54 e 55, instalados na estrutura da Viga de Sustentação, percebe-se que o ponto de máximo é deslocado da região onde atualmente ocorrem as trincas. Neste novo ponto de máximo, a estrutura da viga apresentaria uma vida de 11240 ciclos. Este valor corresponde a uma vida finita à fadiga de aproximadamente 9 meses.

Figura 54 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Vista lado Externo da Viga.



Fonte: Projetista, Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse - Belo Horizonte - 2019.

Figura 55 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno da Viga.



Fonte: Projetista, Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse - Belo Horizonte - 2019.

4.3 REFORÇO NA ESTRUTURA SUGERIDO PELO PROJETISTA

A análise da estrutura reforçada considera sempre a pretensão dos parafusos. Foram estudadas algumas condições de reforços. As principais são indicadas abaixo e na sequência apresentadas nas figura abaixo.

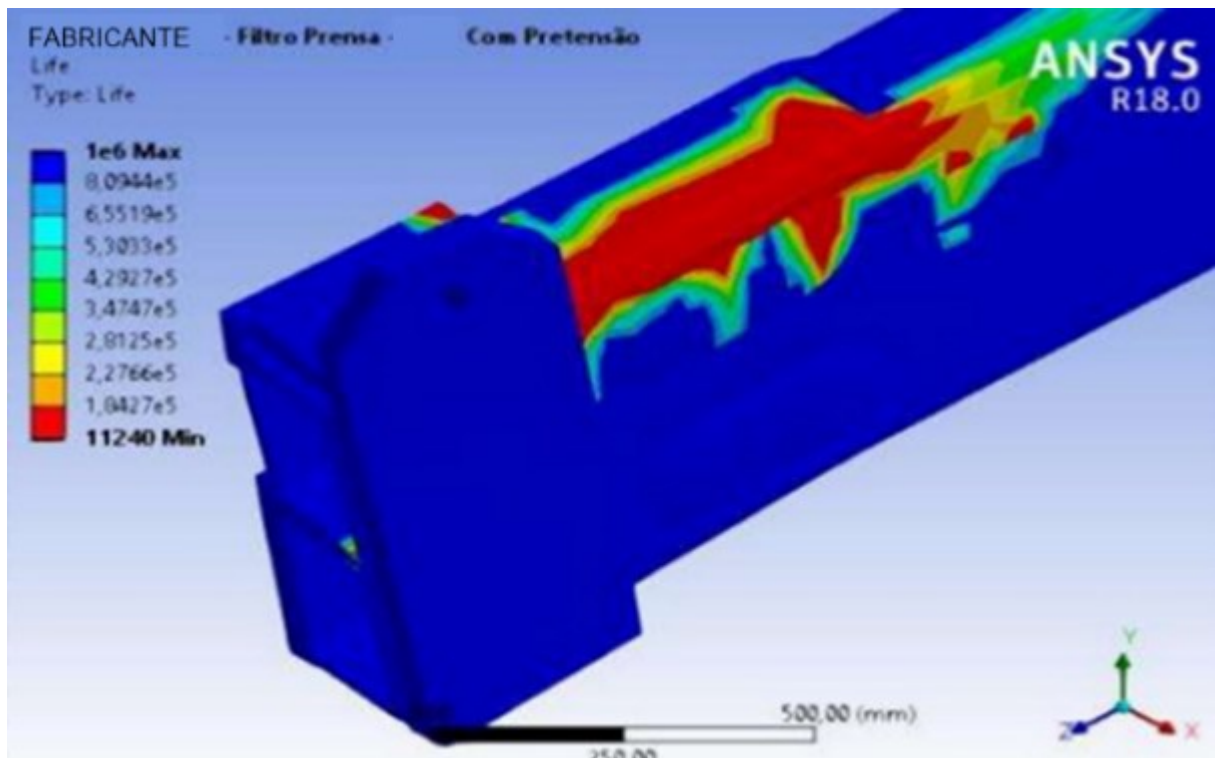
REFORÇO 01 – Tala Interna;

REFORÇO 02 – Tala Interna com reforço da mesa superior.

4.3.1 Reforço 01

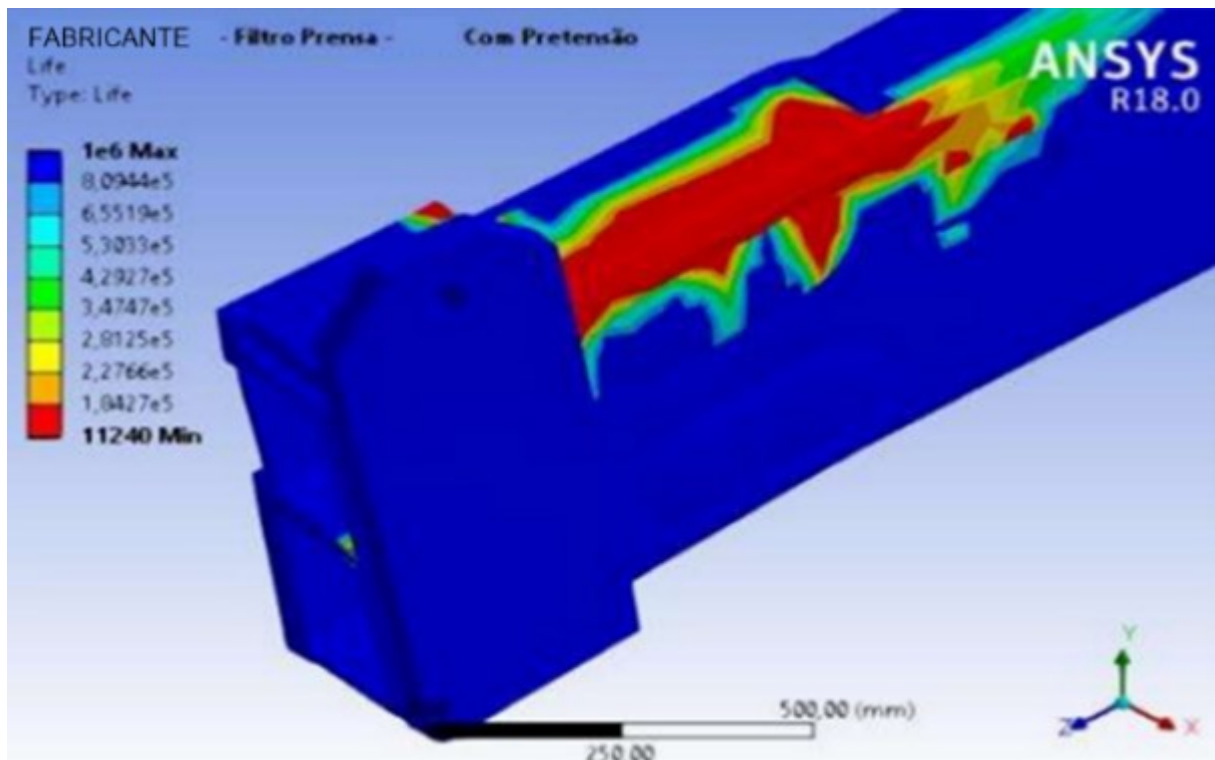
Foi considerado o reforço 01 como sendo a colocação de talas internas nos perfis tubulares. Estas talas aproveitam a linha de aparafusamento existente, passam pelas trincas e sendo fixadas no outro lado, conforme as figuras 56 a 57.

Figura 56 – Reforço 01 – Detalhe de uma das Extremidades da Viga de Sustentação e Tala Interna.



Fonte: Projetista, Reforço 01 - Belo Horizonte - 2019

Figura 57 – Reforço 01 – Detalhe da Tala Interna ao Perfil Tubular e Parafusos de Fixação.



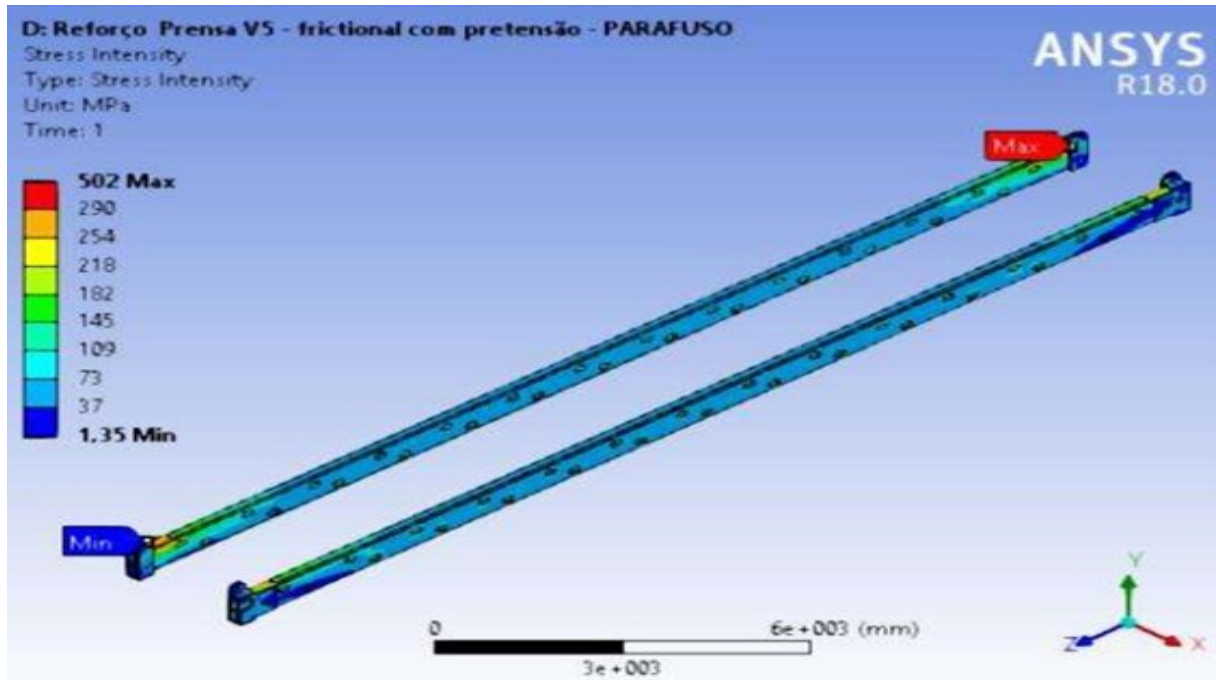
Fonte: Projetista, Reforço 01 - Belo Horizonte -2019

Foi percebido que os reforços instalados na estrutura da Viga de Sustentação, com relação ao ponto de máximo é deslocado da região onde atualmente ocorrem as trincas. Neste novo ponto de máximo, a estrutura da viga apresentaria uma vida de 16458 ciclos. Este valor corresponde a uma vida finita à fadiga de aproximadamente 14 meses.

Análise das Tensões - Tensões Máximas

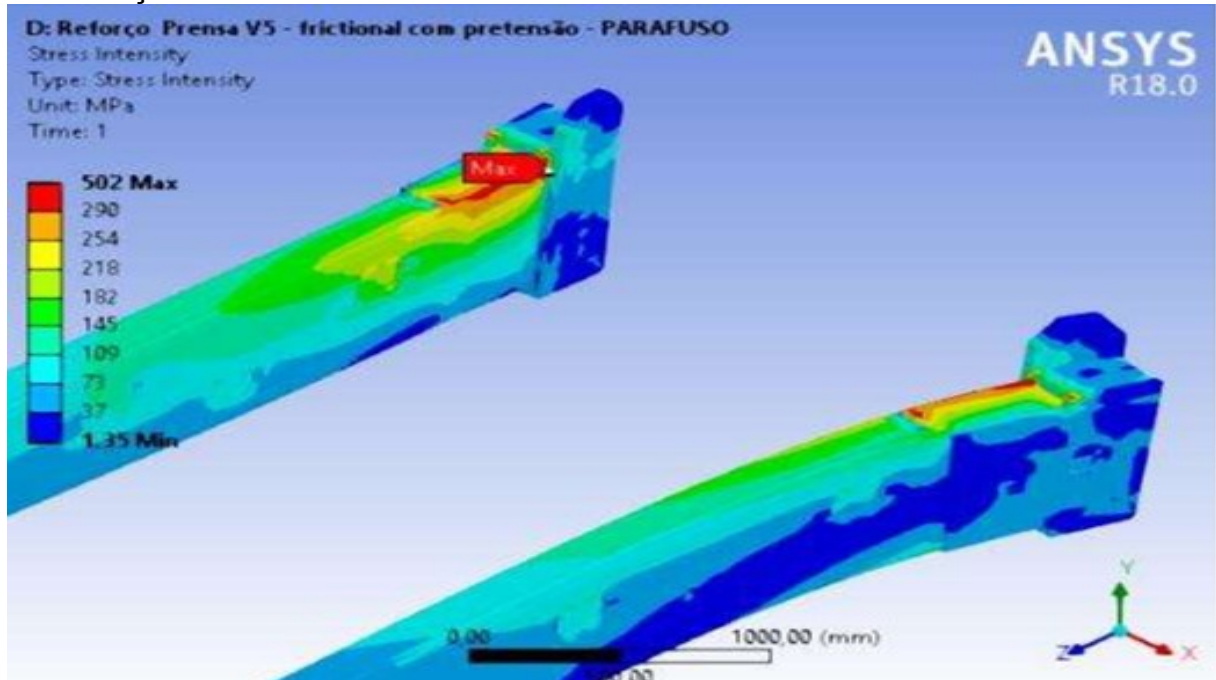
As figuras 58 a 62, apresentam as tensões obtidas para a estrutura de interesse Viga de Sustentação com inserção dos reforços 01. Observa-se que a tensão máxima atinge cerca de **502 MPa** na estrutura da Viga de Sustentação, o valor limite de tensão é **290 Mpa**, portanto superior ao limite admissível.

Figura 58 – Distribuição das Tensões na Região de Interesse.



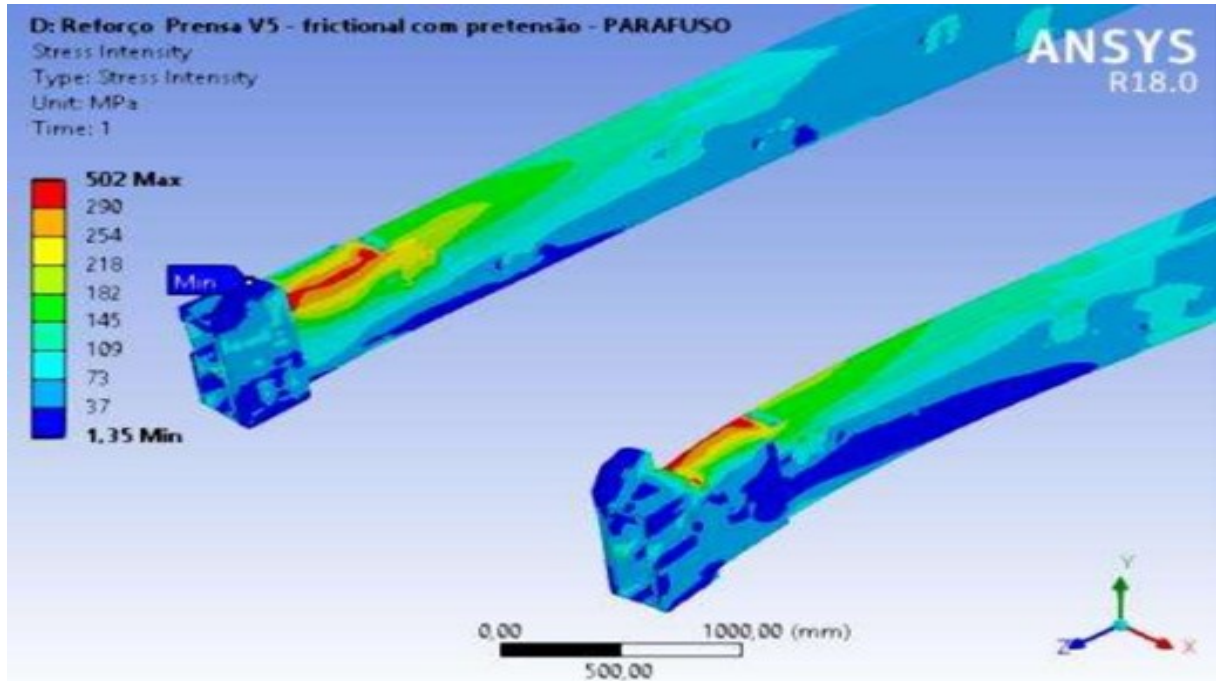
Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 59 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.



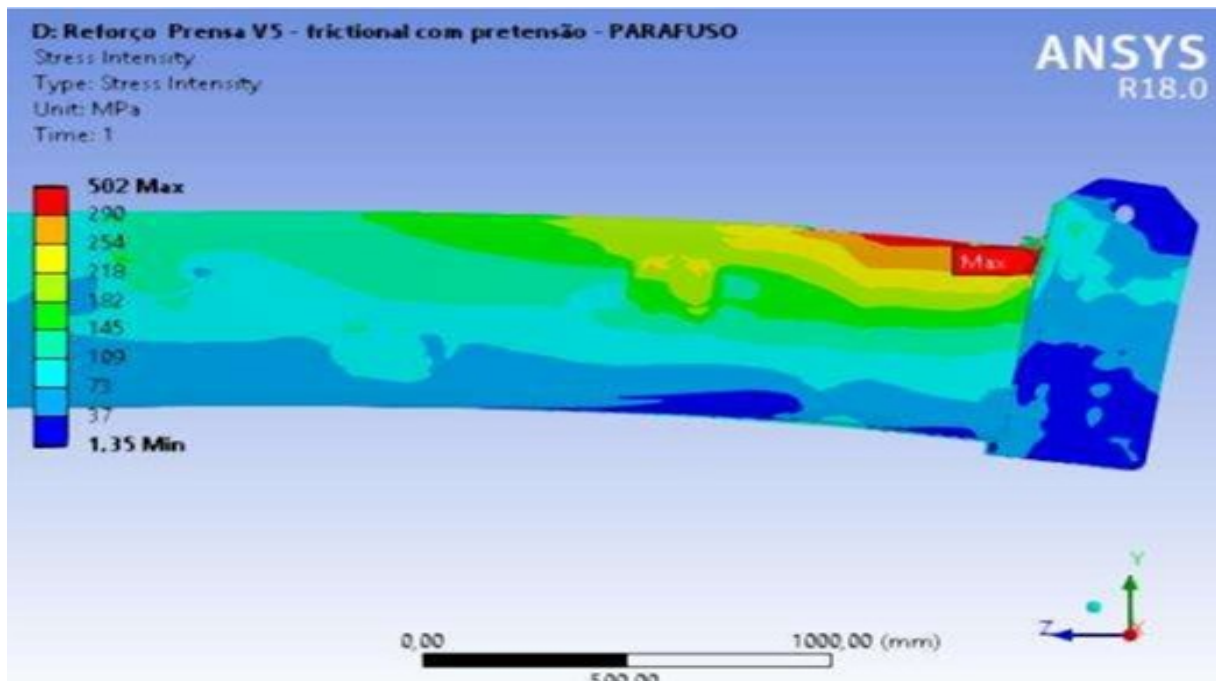
Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 60 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindro.



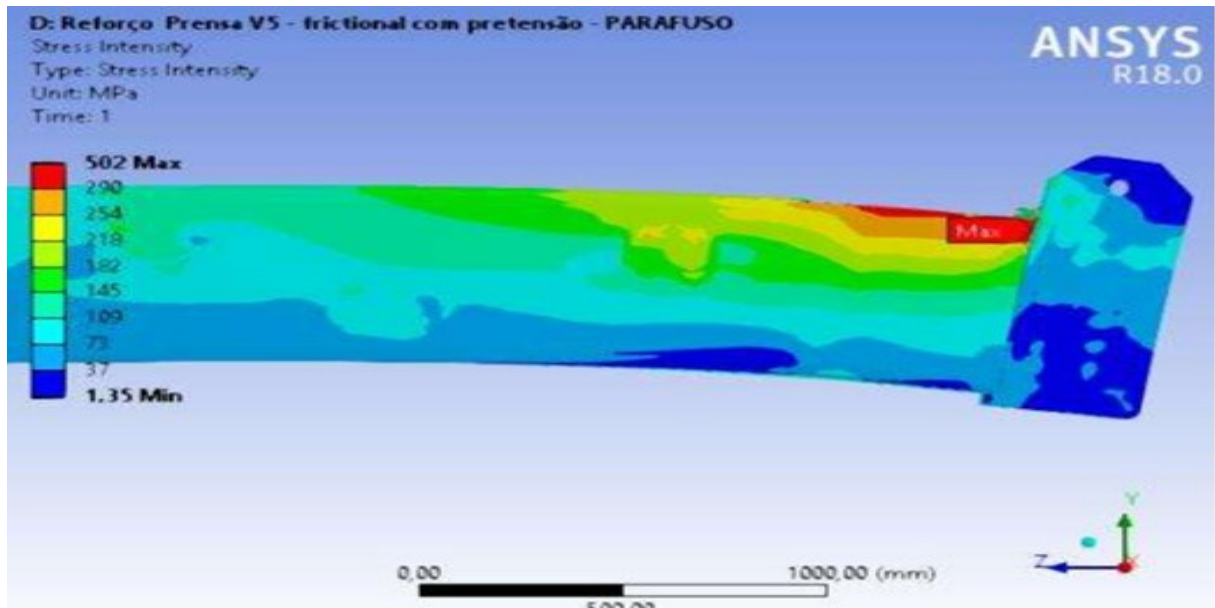
Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 61 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Vista lado Externo da Viga.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 62 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno da Viga.

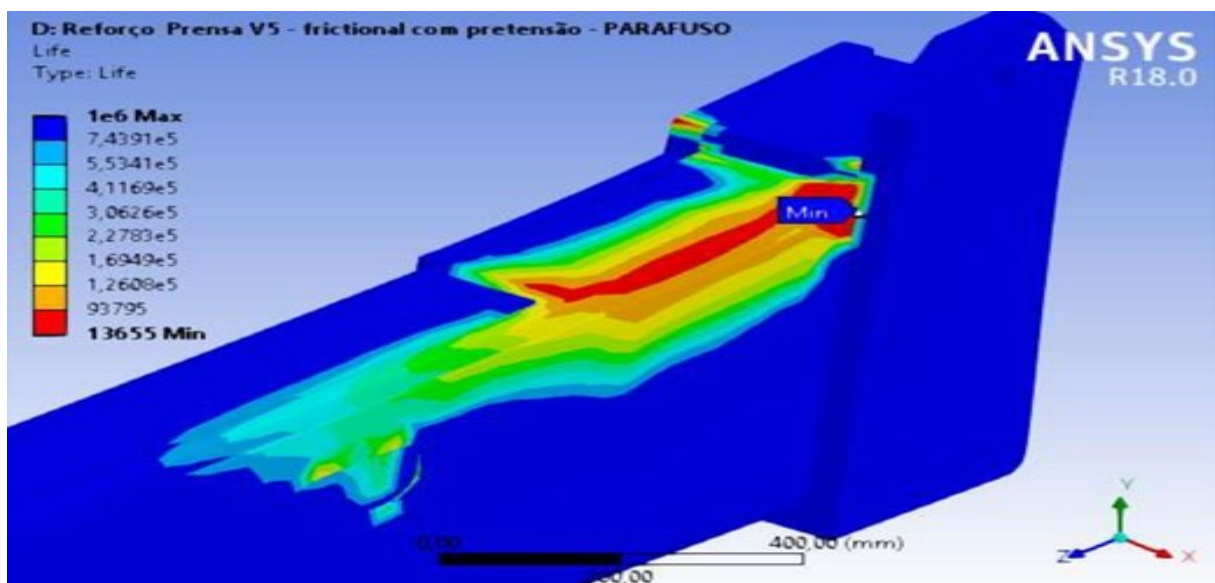


Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Análise da Fadiga

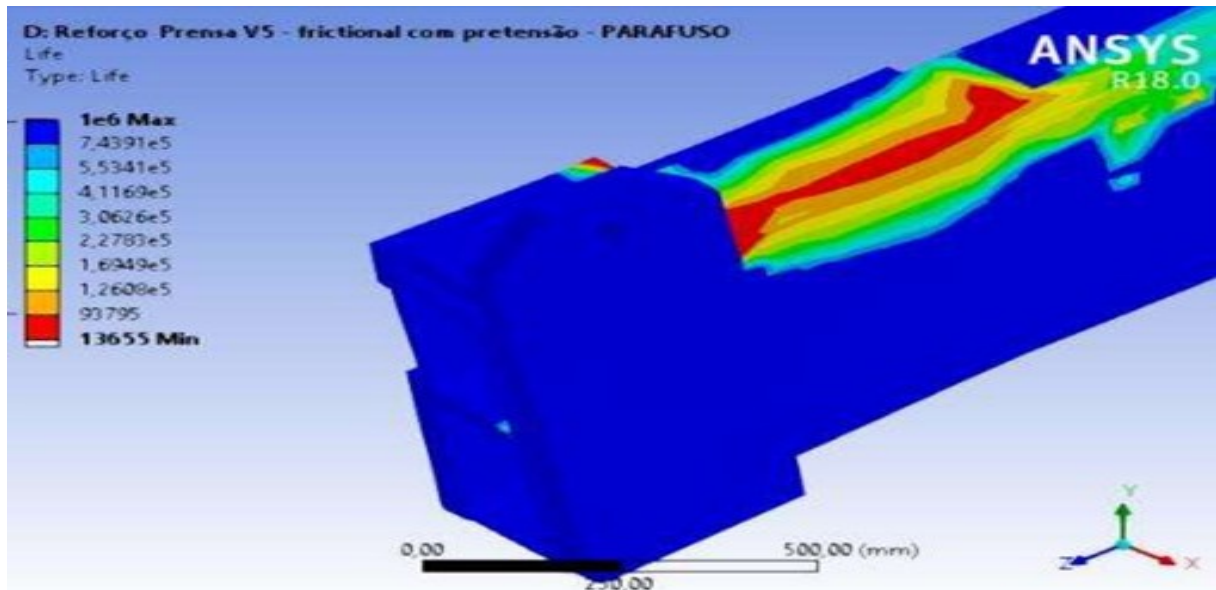
As figuras 63 e 64 mostram a condição atuação geradora de fadiga do lado oposto aos cilindros hidráulicos (Aplicação da força).

Figura 63 – Detalhe Análise de Fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 64 – Detalhe análise de fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindros.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Com base os reforços instalados, verifica-se que na estrutura da Viga de Sustentação, o ponto de máximo é deslocado da região onde atualmente ocorrem as trincas. Neste novo ponto de máximo, a estrutura da viga apresentaria uma vida de 13655 ciclos. Este valor corresponde a uma vida finita à fadiga de aproximadamente 11 meses.

4.3.3 Reforço 02

Percebe se que o reforço 02 exige alteração mais extensa, pois obriga a recolocação do apoio superior dos apoios fixos do lado dos cilindros e da alimentação “Cylinder Head” e “Feeding Head” para sobreposição de chapa de reforço na mesa, além da inclusão das mesmas chapas do Reforço 01.

Figura 65 – Reforço 02 – Apoio Superior relocado 40 mm na direção +Y.

Figura 66 – Reforço 02 – Chapa reforçada que faz o contato do apoio superior com a Viga de Sustentação.

Figura 67 – Reforço 02 – Reforço sobre o perfil tubular de ambas as vigas de sustentação.

Figura 68 – Detalhes do Reforço 02 – Perfil tubular como reforço e o apoio fixo.

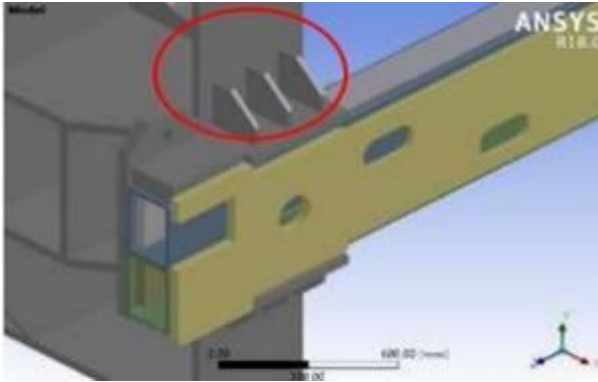


Figura 65

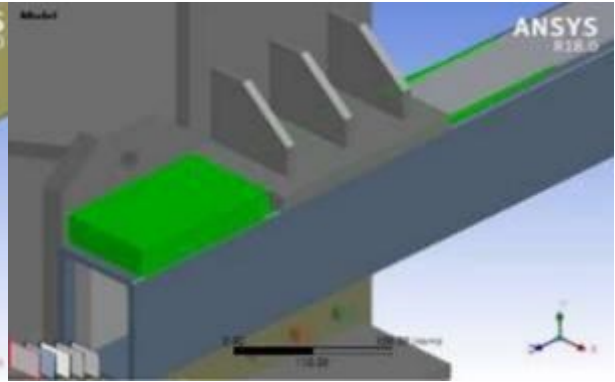


Figura 66

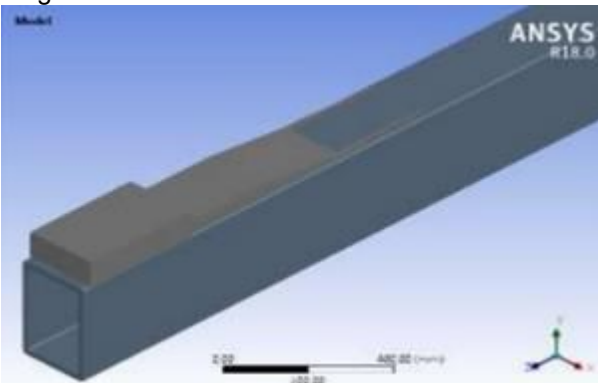


Figura 67

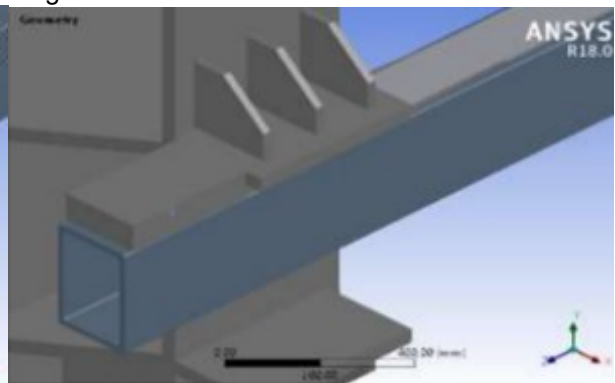


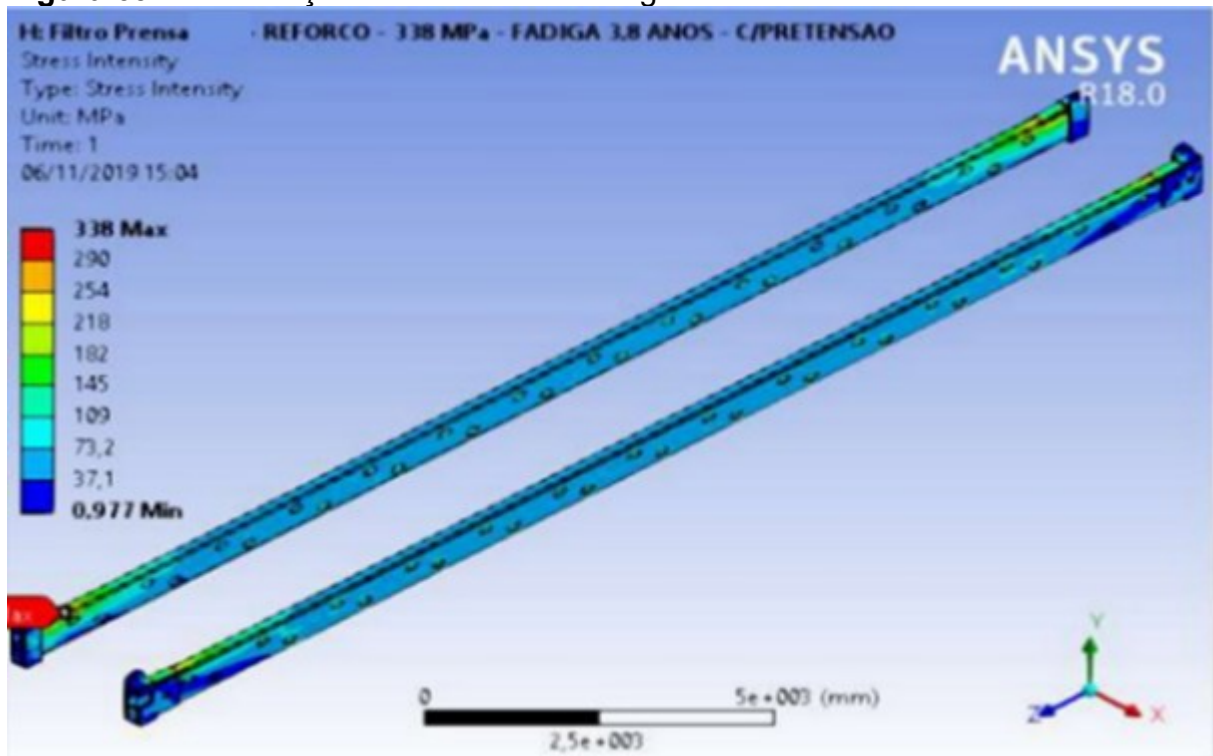
Figura 68

Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Análise das Tensões – (Tensões Máximas)

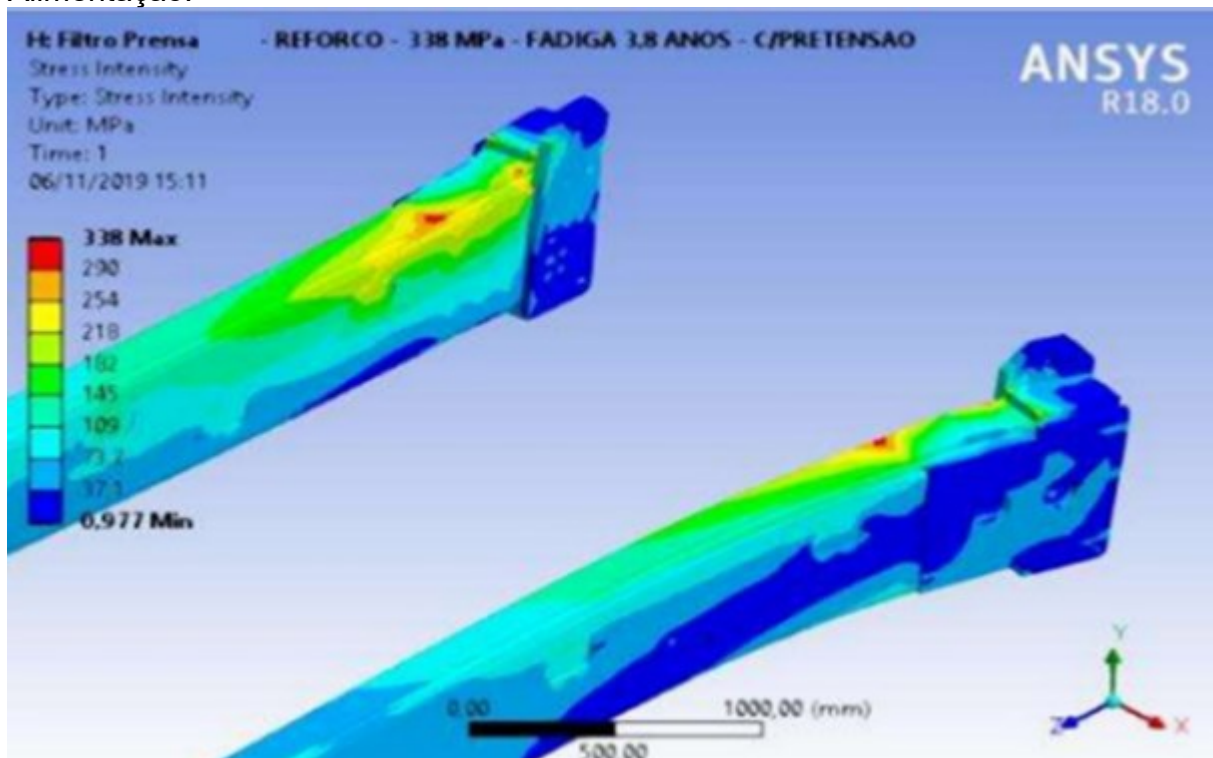
Foi verificado com relação as figuras 69 a 73, apresentam as tensões obtidas para a estrutura. Observa-se que a tensão máxima atinge cerca de **338 MPa** na estrutura da Viga de sustentação. O valor limite de tensão é **290 MPa** portanto, a tensão experimentada pela viga foi acima ao limite admissível em **48 MPa**.

Figura 69 – Distribuição das Tensões na Região de Interesse.



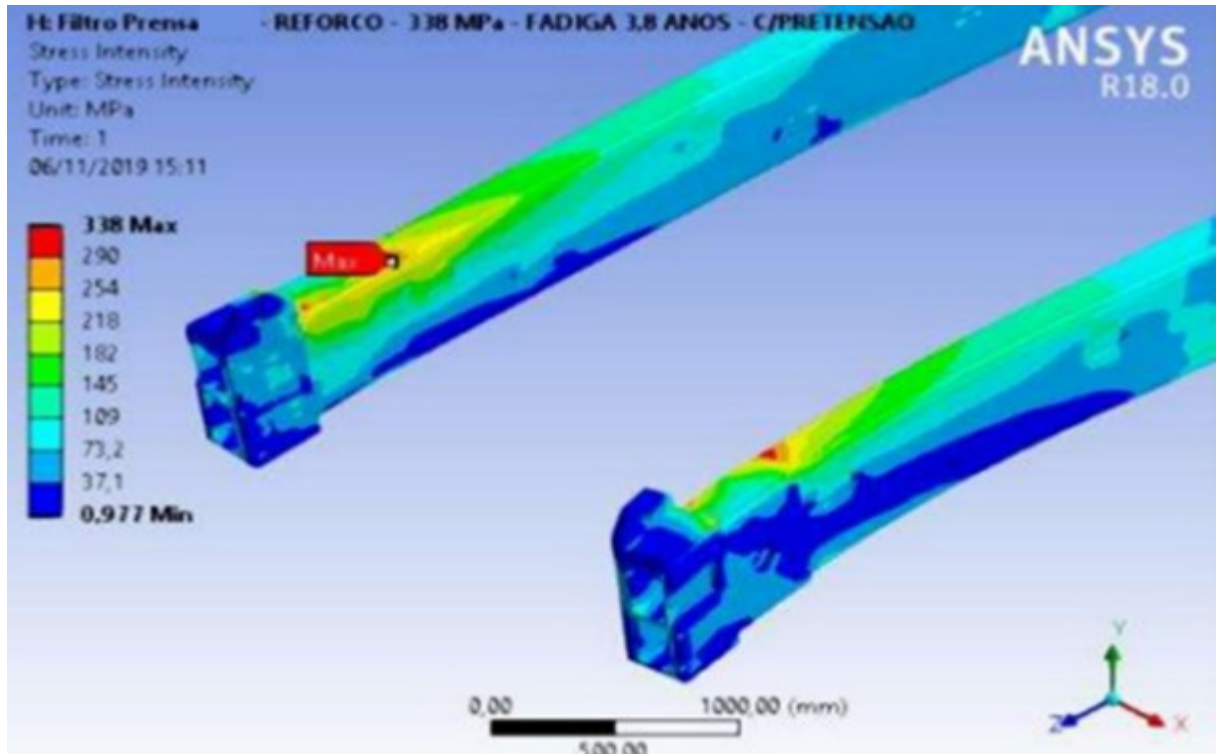
Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 70 – Detalhe da Tensão máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.



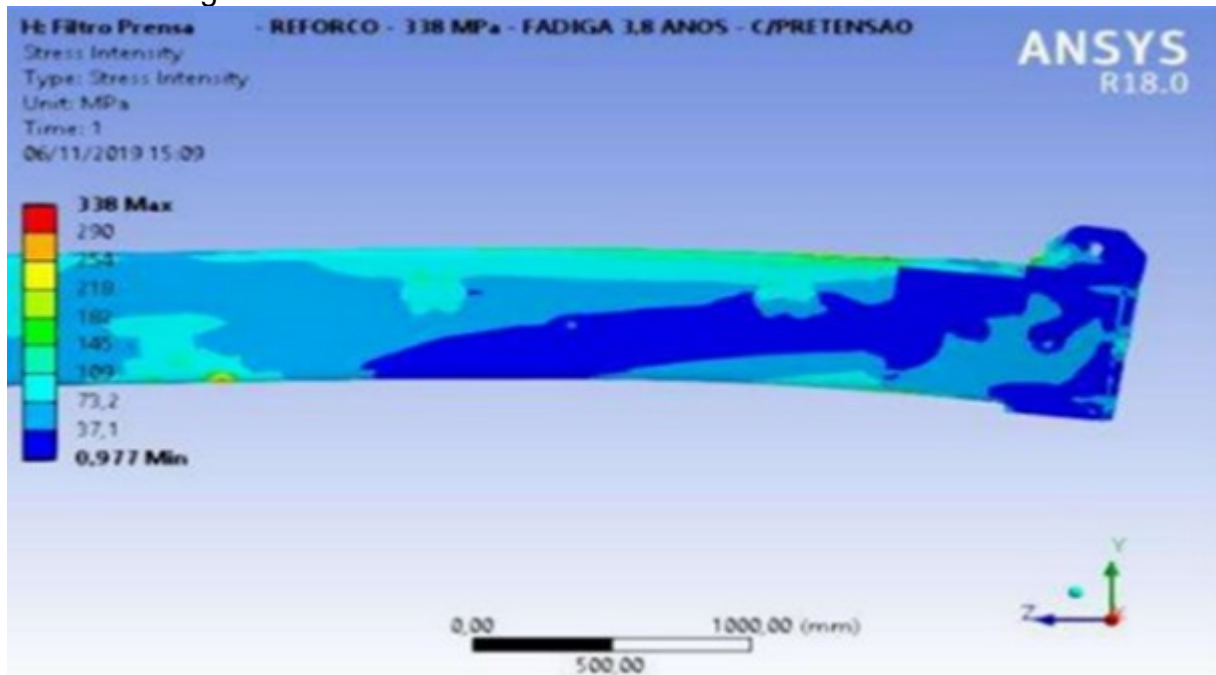
Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 71 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindro.



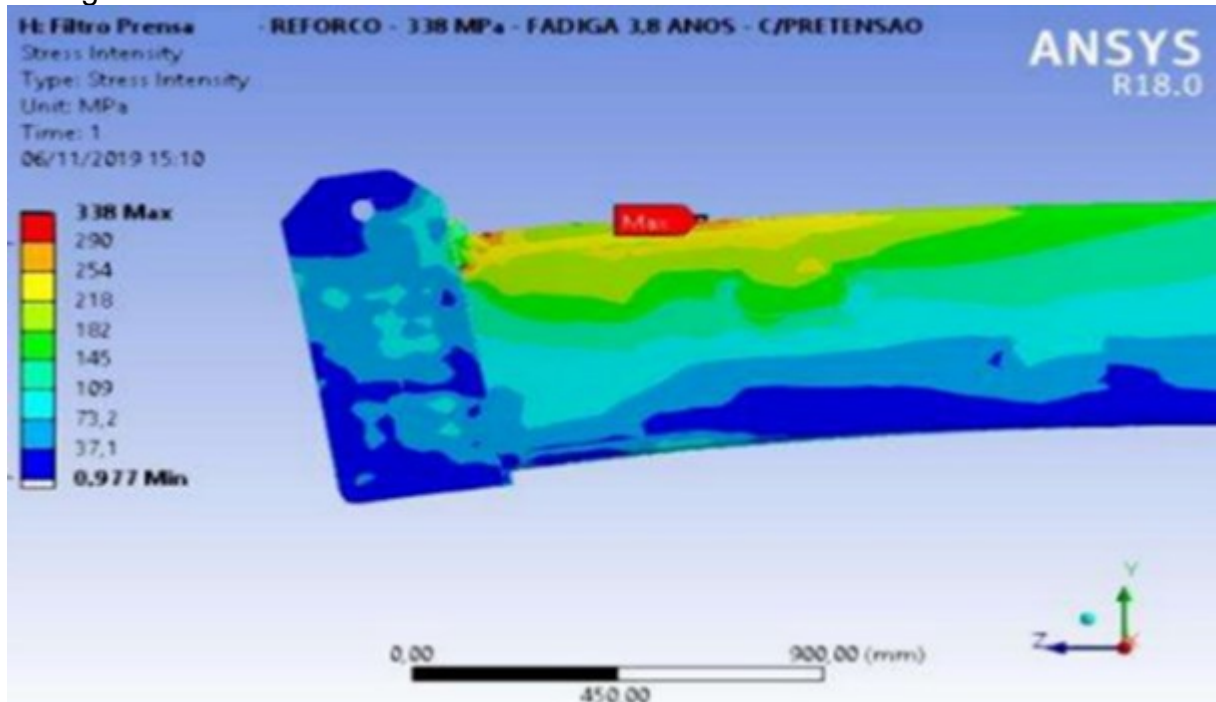
Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 72 – Detalhe da Tensão Máxima na Região de Interesse – Vista Lado Externo da Viga.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte – 2019

Figura 73 – Detalhe da tensão máxima na Região de Interesse – Vista Lado Interno da Viga.

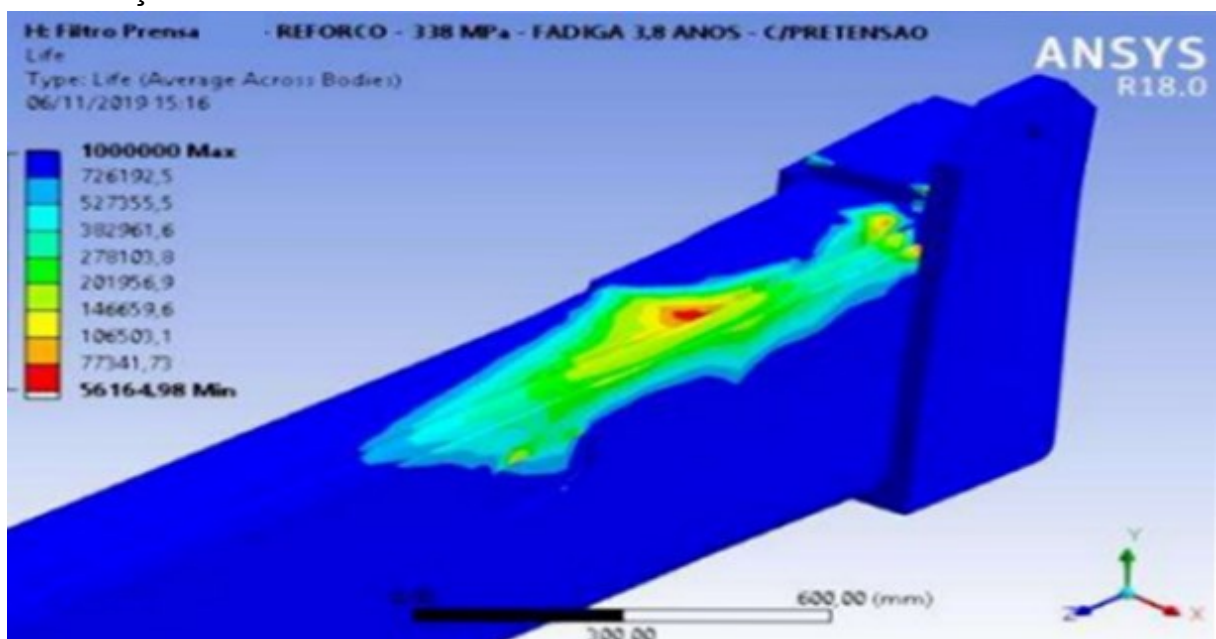


Fonte: Projetista, Belo Horizonte - 2019.

Análise da Fadiga

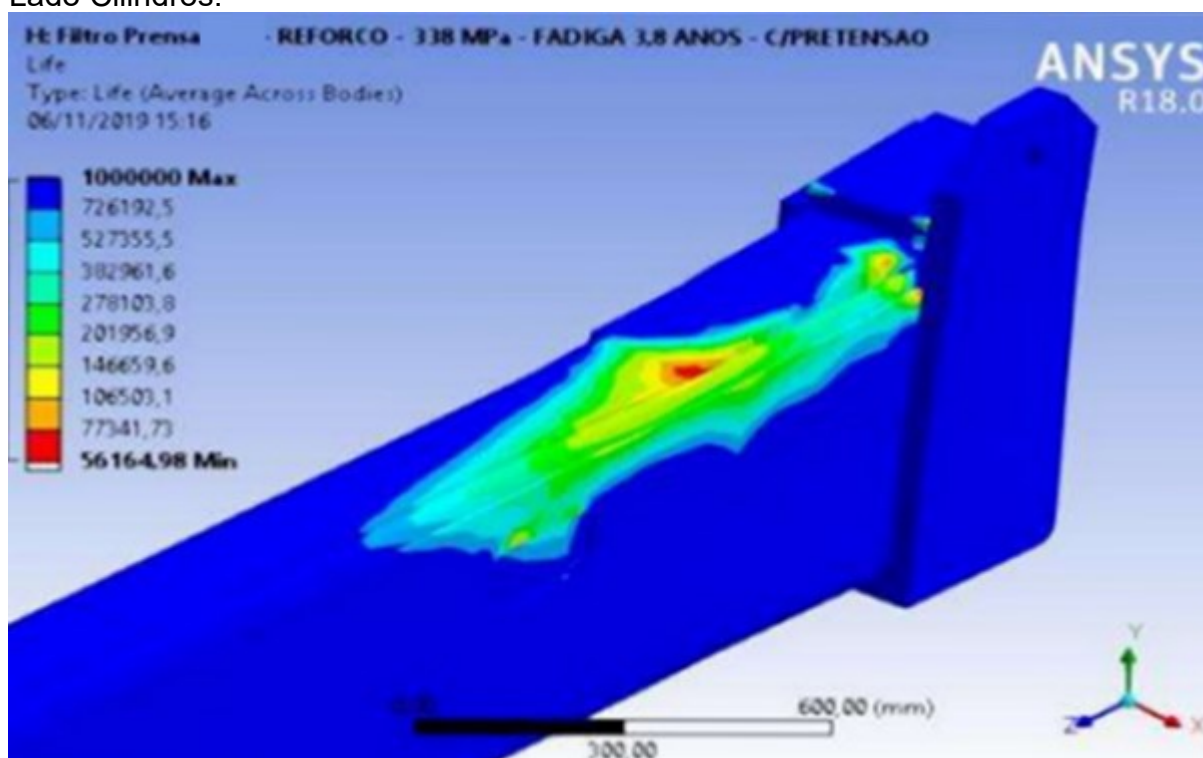
As figuras 74 e 75 mostram a condição atuação geradora de fadiga lado oposto aos cilindros hidráulicos (Aplicação da força).

Figura 74 – Análise de Fadiga Região de Interesse – Extremidade Lado Alimentação.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

Figura 75 – Detalhe Análise de Fadiga para Região de Interesse – Extremidade Lado Cilindros.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

4.3.4 - Análise dos Resultados Parciais

Foi observado que os reforços instalados na estrutura da Viga de Sustentação, percebe-se que o ponto de máximo é deslocado da região onde atualmente ocorrem as trincas. Neste novo ponto de máximo (reforço 2), a estrutura da viga apresentaria uma vida de 56165 ciclos. Este valor corresponde a uma vida finita à fadiga de aproximadamente 3,8 anos, correspondendo aproximadamente a 47 meses.

Em nenhum dos dois projetos de reforços apresentados foi possível atingir o conceito de vida infinita. A previsão máxima de vida alcançada com estes reforços é de 3,8 anos. Para se atingir o conceito de vida infinita seria necessária a troca da cabeça da viga aumentando a espessura das vigas tubulares.

Os reforços previstos pela PROJETISTA estão divididos em 2 grupos – Reforço 01 e 02 ver figuras 76 e 77.

Em seguida, estes serão detalhados. Abaixo se pode ver, de forma geral, como os componentes da estrutura da Viga de Sustentação se relacionam, no lado dos cilindros e no lado da alimentação.

Figura 76 - Reforços 01 e 02 – Lado dos Cilindros. (Ação)

Figura 77 - Reforços 01 e 02 – Lado da Alimentação. (Reação)

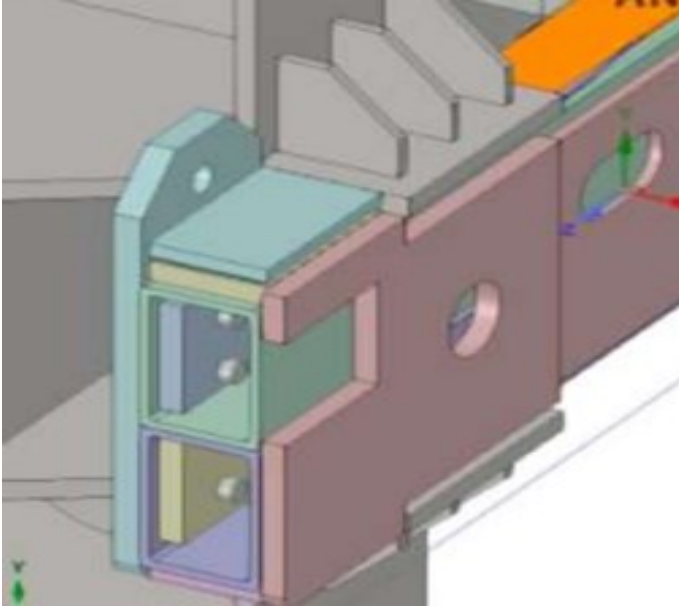


Figura 76

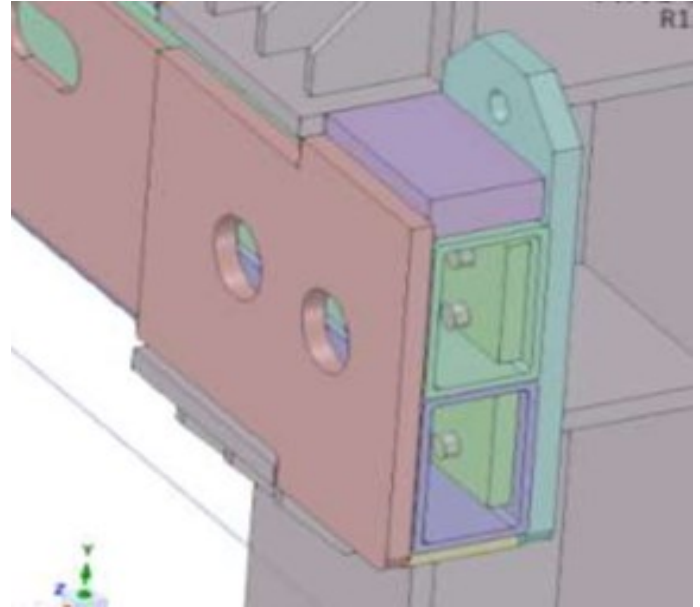


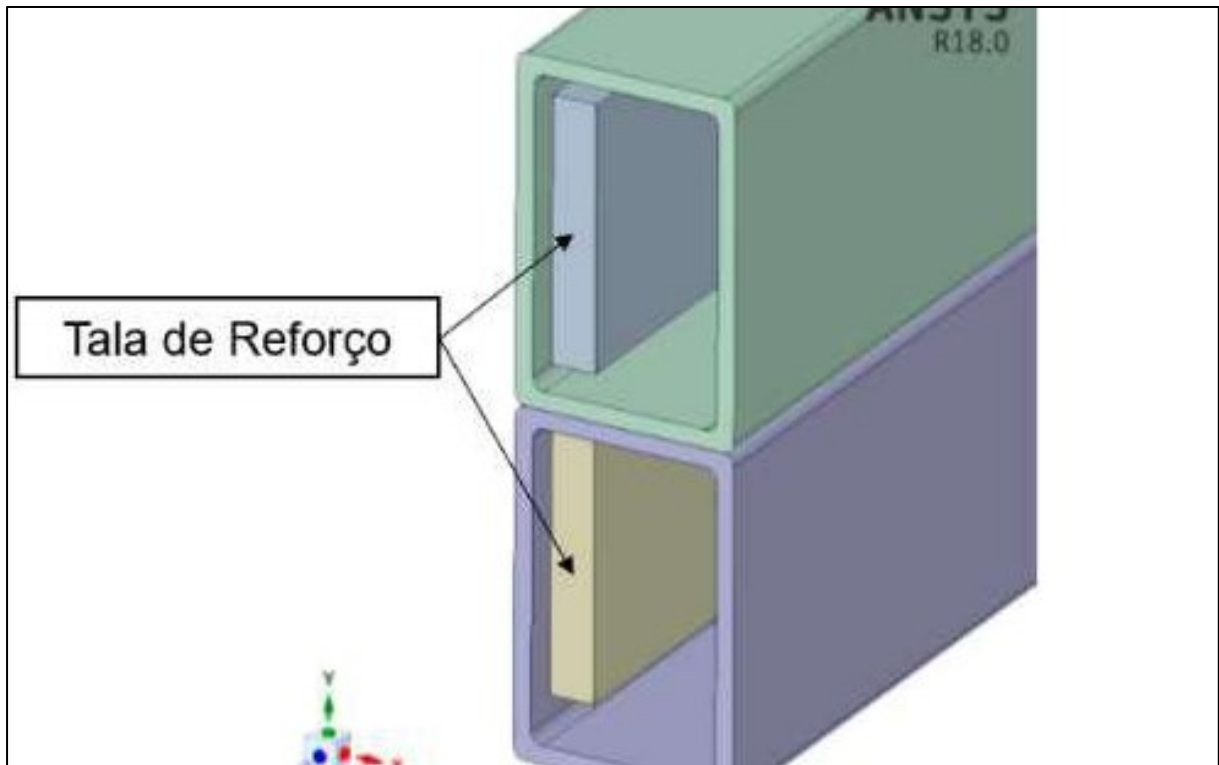
Figura 77

Fonte: Projetista, Reforços 01 e 02 - Belo Horizonte - 2019.

4.3.5 Análise dos Resultados com o Reforço 01

Foi verificado no projeto de Reforço 01 (figura 78), consiste, como sugere a PROJETISTA, a colocação de talas internas nas paredes dos perfis tubulares nas duas extremidades de cada Viga de Sustentação. A posição de instalação destas chapas de reforço deve ser realizada na face do lado interno, com relação ao equipamento, pois onde a maior sollicitação e a região de trinca acontecem. As talas de reforço aproveitam a linha de aparafusamento existente passam pelas trincas e são fixadas no outro lado. As figuras 79 e 80, apresentam de forma clara o reforço.

Figura 78 – Reforço 01 – Talas de Reforço Fixadas na Parte Interna do Perfil Tubular.



Fonte: Projetista, Reforço 01 - Belo Horizonte - 2019.

Figura 79 – Reforço 01 – Talas de Reforço e Elementos de Fixação.
Figura 80 – Reforço 01 – Talas de Reforço e Elementos de Fixação.

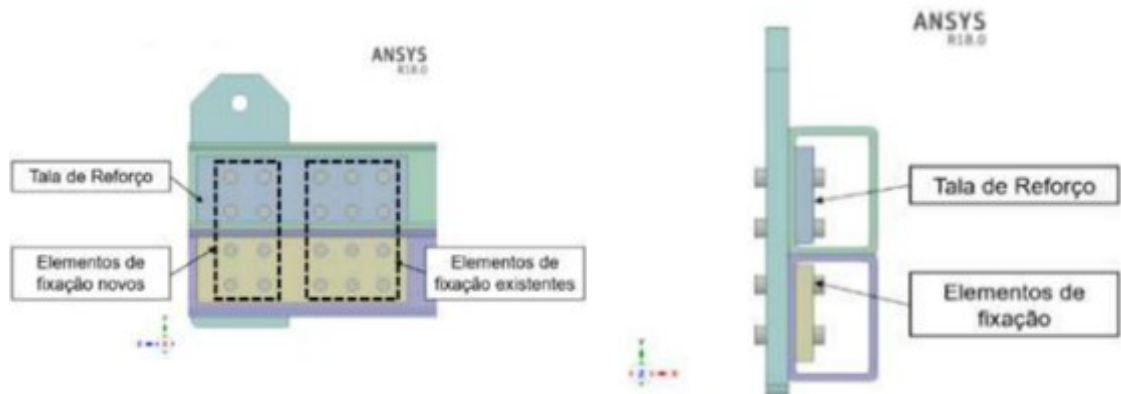


Figura 79

Figura 80

Fonte: Projetista, Reforço 01 - Belo Horizonte - 2020.

Foi observado em campo, interferências da tala de reforço com a face interna do perfil tubular, como se pode ver na figura 81. A tala vai apresentar um rasgo de andorinha na porção média, ao longo do comprimento.

Figura 81 – Reforço 01 – Interferência das Talas de Reforço com a Parede do Tubo.



Fonte: Projetista, Reforço 01 - Belo Horizonte - 2019.

As informações dimensionais dos itens novos seguem no Quadro 6.

Quadro 6 – Lista Quantitativa de material para Reforço 01.

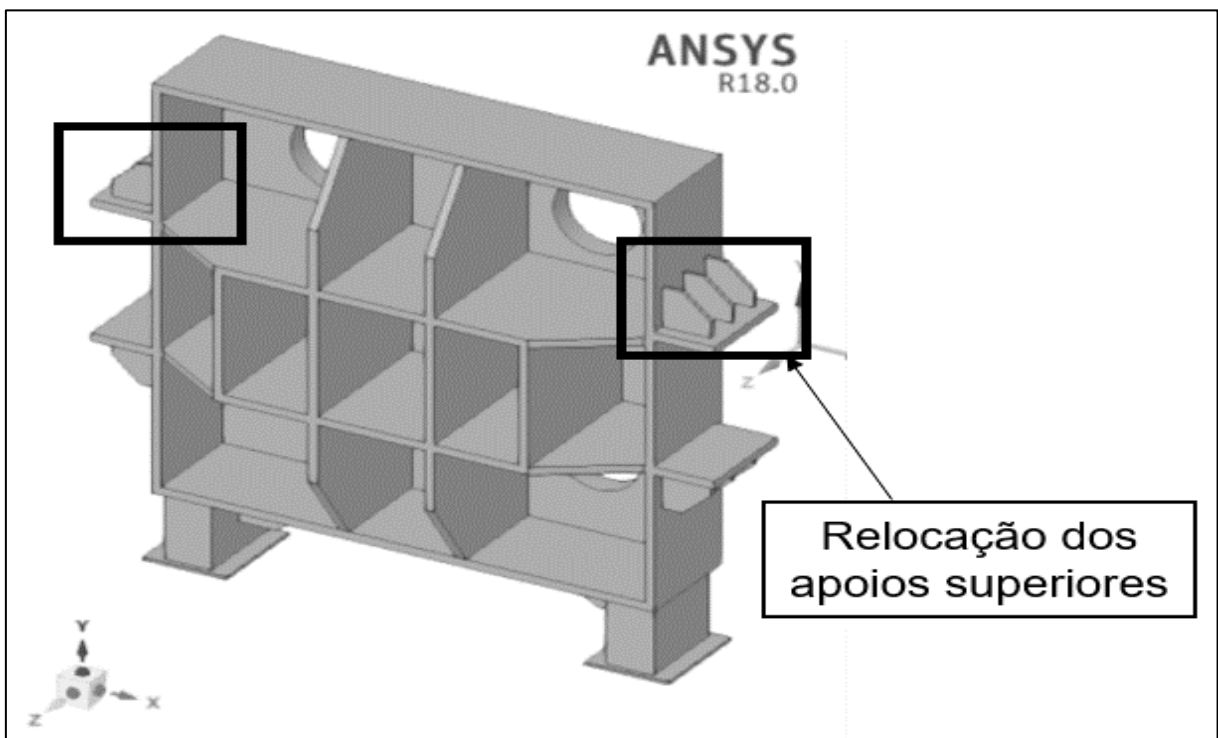
ITEM	QTD	DESCRIÇÃO	MATERIAL	PESO (kg)
TALA	8	CH. 38 x 230 x 750	ASTM A572 Gr.50	415,0

Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2020.

4.3.6 Análise dos Resultados com o Reforço 02

Foi verificado com relação ao projeto de Reforço 02 a necessidade de alterações mais extensa na estrutura do equipamento. Inicialmente é sugerida pela PROJETISTA a re colocação dos apoios superiores aos apoios fixos do lado dos cilindros e da alimentação a uma distância de 38 milímetros. A figura 82, destaca a alteração.

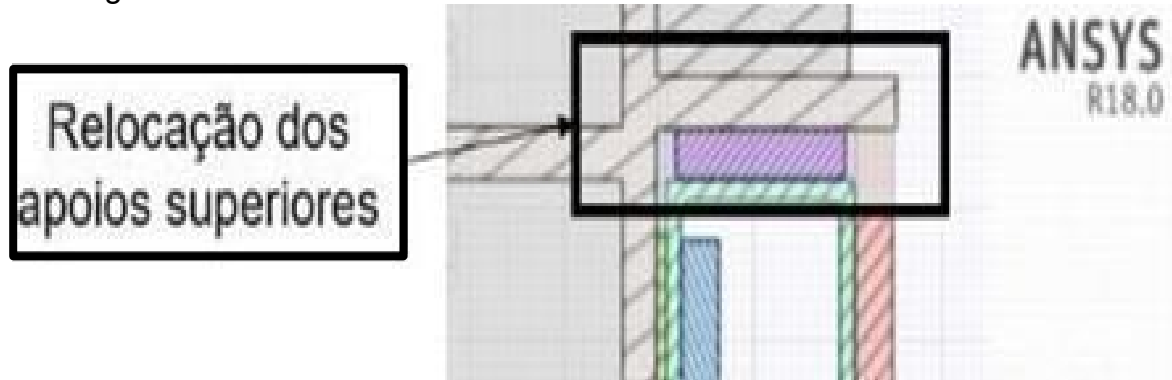
Figura 82 – Reforço 02 – Relocação dos Apoios Superiores do “Cylinder Head” e “Feeding Head”.



Fonte: Projetista – Belo Horizonte – 2019

A figura 83, mostra o desalinhamento dos apoios superiores com as chapas de nervura das cabeças fixas.

Figura 83 – Reforço 02 – Relocação dos Apoios Superiores do “Cylinder Head” e “Feeding Head”



Fonte: Projetista, Reforço 02 – Belo horizonte - 2019.

Foi sugerido para a Viga de Sustentação reforço na face superior do perfil tubular. Pode-se ver na figura 84 a 88, que são inseridos os itens 1 e 2. Estes deverão ser soldados em todo contorno com uma solda de chanfro.

Figura 84 – Reforço 01 – Chapas de reforço na estrutura da Viga de Sustentação.

Figura 85 – Reforço 02 – Chapas de reforço na estrutura da Viga de Sustentação.

Figura 86 – Reforço 02 – Chapas de reforço na estrutura da Viga de Sustentação.

Figura 87 – Reforço 02 – Chapas de reforço na estrutura da Viga de Sustentação.

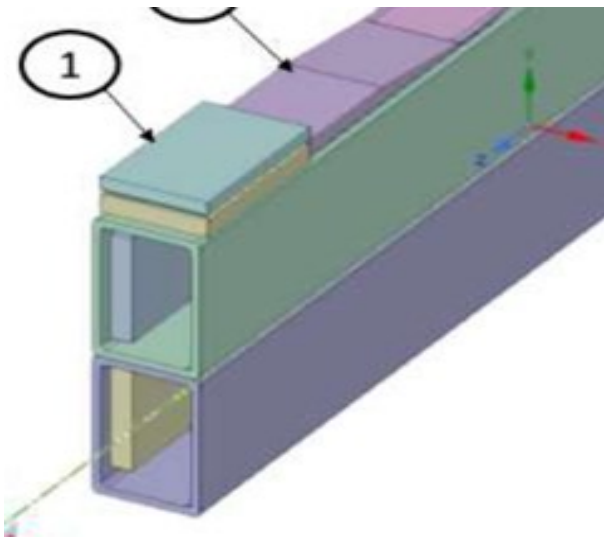


Figura 84

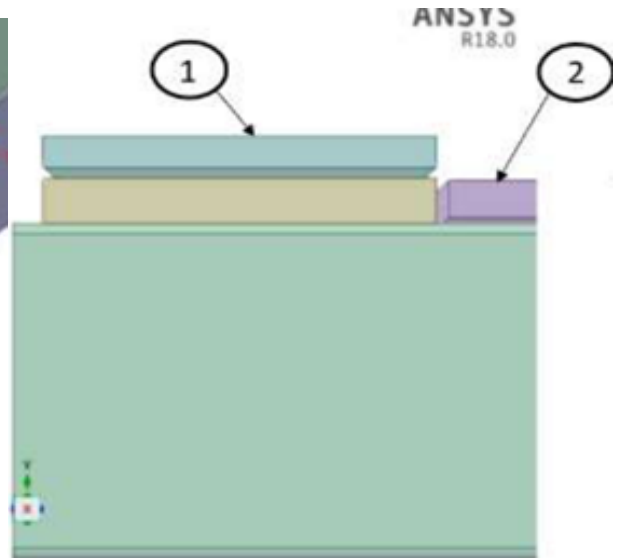


Figura 85

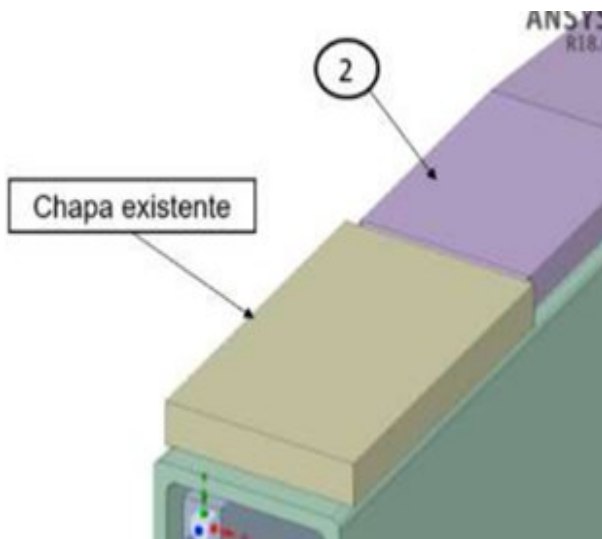


Figura 86

Fonte: Projetista - Belo Horizonte – 2019.

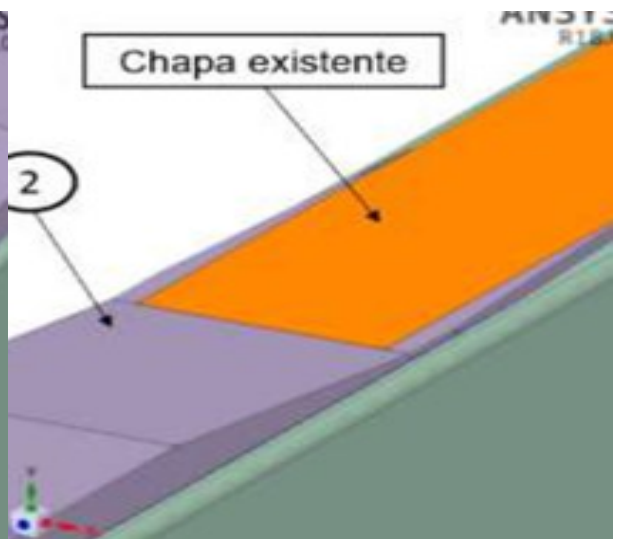


Figura 87

As informações dimensionais dos itens novos seguem no quadro 7:

Quadro 7 – Lista Quantitativa de Material para Reforço 02.

ITEM	QTD	DESCRIÇÃO	MATERIAL	PESO (kg)
1	4	CH. 38 x 200 x 332	ASTM A572 Gr.50	80,0
2	4	CH. 38 x 180 x 500	ASTM A572 Gr.50	108,0

Fonte: Projetista – Belo Horizonte – 2019.

Foi constatado que todos os reforços previstos, deverão ser soldados na estrutura como premissa. As informações de fabricação e seus detalhes foram indicados nos desenhos estruturais de reforço.

Foi verificado que, os resultados da análise através do método dos elementos finitos, considerando os critérios de avaliação, para os carregamentos considerados, que atuam na estrutura do Filtro Prensa são apresentados no quadro 8 , juntamente com a tensão limite para os casos originais, com e sem pretensão nos parafusos, e com o projeto de reforço 1 e 2. Os valores em vermelho estão acima do limite enquanto os valores em azul estão abaixo.

Quadro 8 – Resumo das Tensões Máximas.

FILTRO PRENSA - EXISTENTE	
VIGA DE SUSTENTAÇÃO	TENSÕES MÁXIMAS (MPa)
ORIGINAL -SEM PRETENSÃO	582 - ERRO!
ORIGINAL - COM PRETENSÃO	575 - ERRO!
FABRICANTE REFORÇO	540 - ERRO!
PROJETISTA REFORÇO 1	582 - ERRO!
PROJETISTA REFORÇO 2	338 - ERRO!
LIMITE TENSÃO (Referência)	290 - ACEITO

Fonte: Projetista – Belo Horizonte – 2019.

O resumo dos resultados para a análise de fadiga é expresso quadro 9:

Quadro 9 – Resumo do Ciclo de Vida à Fadiga.

FILTRO PRENSA - ATUAL	
VIGA DE SUSTENTAÇÃO	Vida (ciclos)
ORIGINAL -SEM PRETENSÃO	8641
ORIGINAL - COM PRETENSÃO	11061
FABRICANTE REFORÇO	11240
PROJETISTA REFORÇO 1	13655
PROJETISTA REFORÇO 2	56165

Fonte: Projetista - Belo Horizonte – 2019.

4.3.7 Resumo dos Valores de Extensometria

Os valores obtidos na extensometria, conforme Quadro 10, corroboram com a análise realizada apresentando pouco variação em relação ao que foi obtido nos modelos.

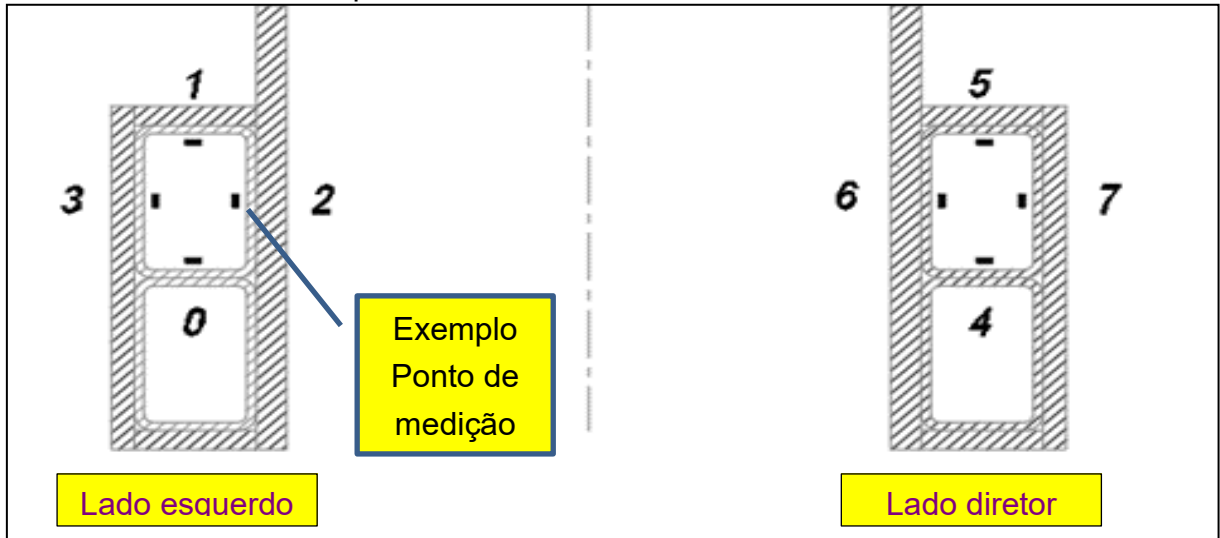
Quadro 10 – Filtro prensa valores médios de variação de tensão

Sensor	Tensão	Modelo
0	44,32	37
1	126,32	119
2	78,96	86
3	66,3	61
4	39,61	37
5	124,3	119
6	88,7	86
7	64,8	61

Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2019.

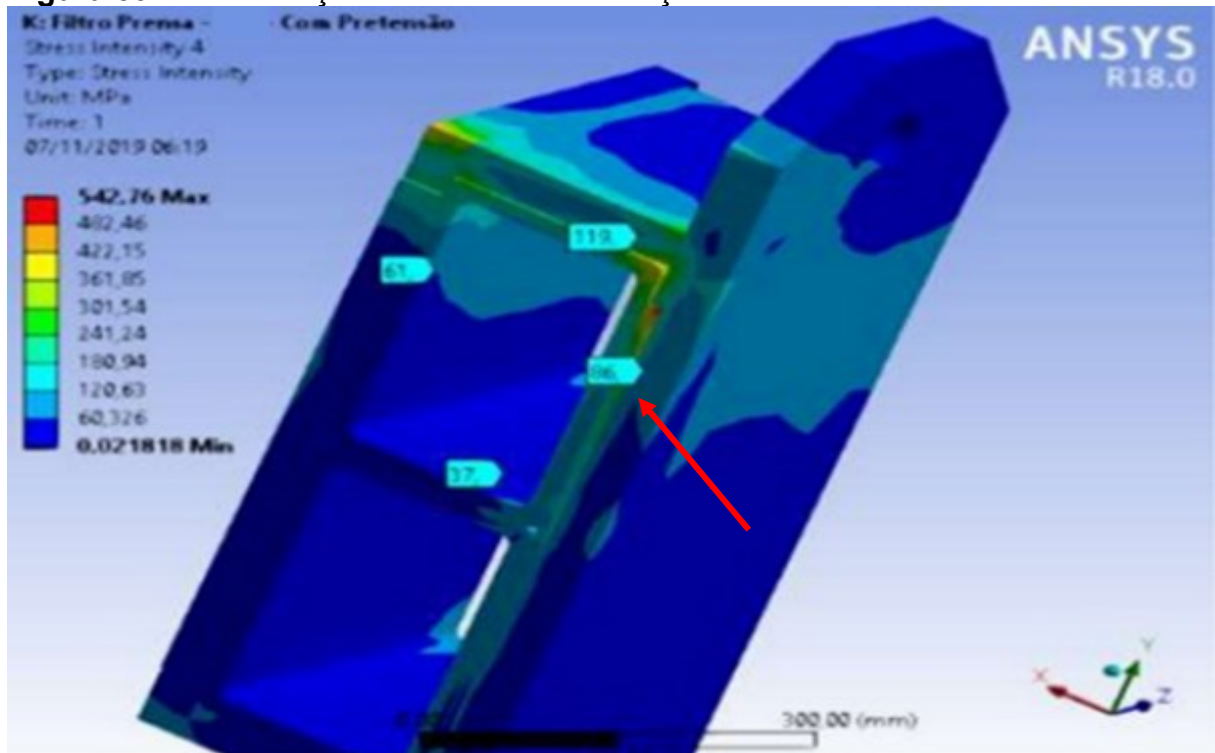
As figuras 88 a 90, identificam os pontos de medição localizados nas vigas do filtro prensa para aquisição de dados.

Figura 88 – Esquema de identificação dos Pontos de Medição Localizados nas Vigas do Filtro Prensa lado esquerdo e direito.



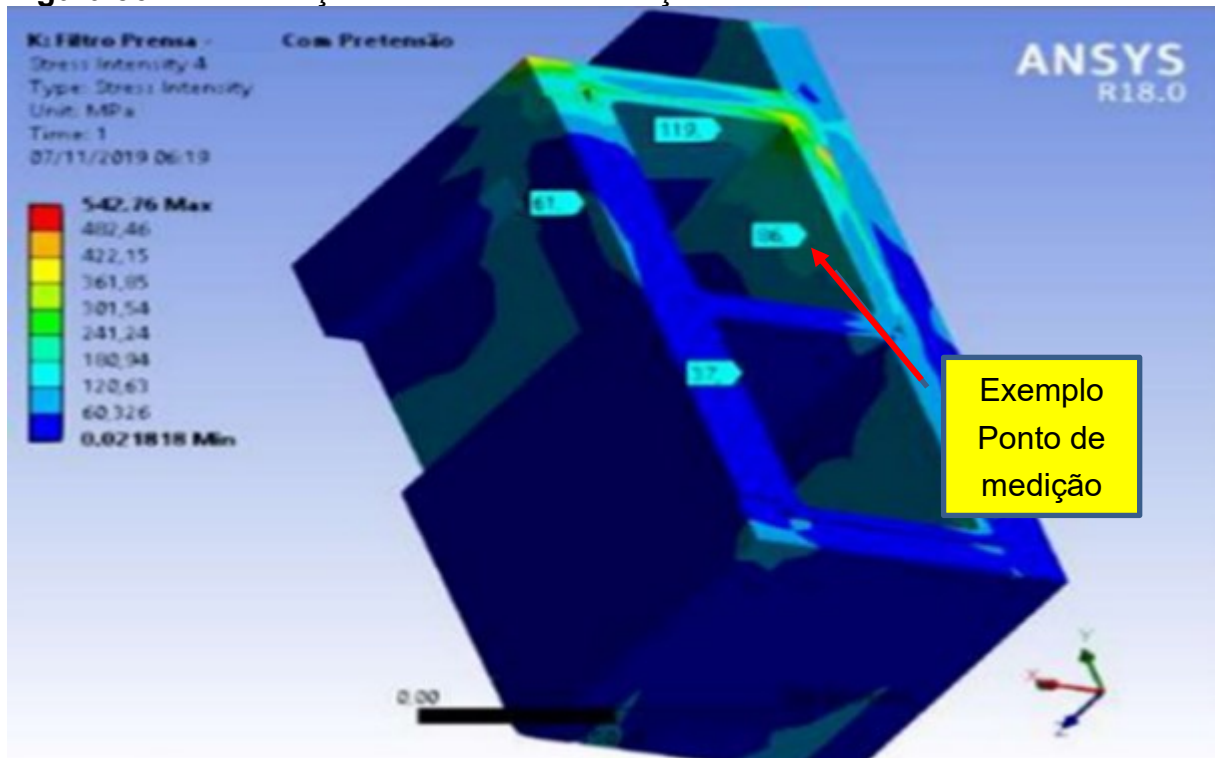
Fonte: Projetista, Belo Horizonte - 2019.

Figura 89 – Identificação dos Pontos de Medição no Modelo - VISTA LE.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte - 2020

Figura 90 – Identificação dos Pontos de Medição no Modelo - VISTA LD.



Fonte: Projetista - Belo Horizonte – 2019

5 CONCLUSÃO

Com base na análise estrutural, por Elementos Finitos, do Filtro Prensa demonstra que a estrutura da Viga de Sustentação não está apta para operação normal do equipamento conforme parâmetros processo/produção. As análises realizadas pelo software ANSYS Workbench, na versão 18. Nas condições de operação/integridade foram obtidas através de levantamento de campo e confirmação das medidas de espessura que não existem em projeto do fornecedor.

O modelo considera adequadamente as soldas feitas pelo processo FCAW com arame tubular AWS E71T1, nas linhas de contato da estrutura e a condição de contato por atrito entre as vigas e guias/batentes/apoios com o “Feeding Head” e “Cylinder Head”. Os parafusos e pretensão destes na montagem entre vigas e as Cabeças são consideradas.

A conclusão que se chega, é que para a pressão de 300 bar nos 4 cilindros, a viga em sua geometria de projeto apresenta dimensionamento considerado insuficiente à fadiga. Os modelos preveem trincas nos exatos pontos em que estas ocorrem em campo, em cerca de 11061 ciclos. Para uma taxa de operação de 40 ciclos diários corresponde, aproximadamente, a 275 dias ou cerca de 9 meses. (consideradas estruturas em ASTM A572 grau 50 com tensão admissível de 290 MPa).

O reforço indicado pela FABRICANTE consiste na troca da chapa externa de reforço da viga por uma chapa mais extensa e com geometria suavizada. Este reforço atinge uma vida à fadiga de cerca de 11240 ciclos, pouco alterando em relação à condição original do equipamento. Tal fato ocorre, pois o posicionamento externo da chapa pouco contribui para o aumento de resistência na região da trinca que ocorre internamente.

Portanto concluímos que o PROJETISTA apresentou duas possibilidades de reforço 1 e 2: a primeira por meio de talas parafusadas internas que elevaram a vida para 13655 ciclos. Concluímos que a segunda opção é bem mais complexa e implica na reposição do suporte superior dos “Feeding Head” e “Cylinder Head” para possibilitar a colocação de um reforço na mesa superior das vigas. Esta opção eleva a vida a fadiga para 56165 ciclos, ou cerca de 3,8 anos. Esta opção também desloca o ponto de máximo da região atual da trinca, o que não ocorre no reforço FABRICANTE ou na opção 1 do reforço apresentado pela PROJETISTA.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerimos complementar os estudos aqui apresentado, incluindo a hipótese de redução do comprimento linear do equipamento, como forma de redução do esforço de flambagem nas vigas, limitação da pressão de entrada que hoje é de 300 Bar, monitoramento por sistema aquisição de dados em tempo real (strain-gages) dentro do plano de manutenção com base em RCM.

Incluir estudo detalhado dos processos de soldagem que contemple, RQPS e EPS conforme as norma citada AWS D1.1, e uma atualização (as-built) do projeto original, através de engenharia reversa para filtro prensa de grande porte para rejeito de produção de minério de ferro.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFIAS

ALVES FILHO, Avelino: Elementos Finitos, A base da Tecnologia CAE/ 6 ed./Editora Erica. São Paulo – 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800/2008: Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica-Designação e Composição Química. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 87/2008: Aços Projeto de estrutura de aço e de estrutura mista Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

BELLEI, Ildony Hélio: Edifícios Industriais em Aço. São Paulo: Pini 1994.
BUDYNAS, R. G. Elementos de Máquinas de Shigley. 8.Ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CALLISTER, Jr., W.D. Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução, 7ª Edição, Ed. Guanabara, 2008.

CARNASCIALI, C. Carlos. Estruturas Metálicas na Prática. 1ª Edição. São Paulo. McGraw-Hill do Brasil, 1974

FISH, Jacob and BELYTSCHKO, Ted. Um Primeiro Curso em Elementos Finitos. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, LTC, 2007.

GUIMARÃES, Nilton Caixeta: FILTRAGEM DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO VISANDO A SUA DISPOSIÇÃO EM PILHAS. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 2011.

HIBBELER, RC. Estática: Mecânica para engenharia, vol. 1/RC, Hibbeler – São Paulo: Pearson Hall, 2005.

HIBBELER, Russell Charles. Resistência dos materiais. 7º Edição São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

KIM, N., SANKAR, B. V. Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos. 1ª Edição. Rio de Janeiro: LTC 2011.

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING an Introduction
NBR 8855:1991. Propriedades mecânicas de elementos de fixação - parafusos e prisioneiros.

Norma ASME IX. Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, And Welding and Brazing Operators. 2010.

Norma AWS D1.1/D1.1M: 21ª ed. American Welding Society, 2008

Norton, R. (2004) Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. 2 ed. Porto Alegre: Bookman.

NORTON, R.L. **Projetos de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4º Edição, Ed. Bookman. 2013

PFEIL W, PFEIL M. **Estruturas de Aço: dimensionamento prático**. 8ª Edição. Rio de Janeiro: LTC 2009.

PINHEIRO, Antônio Carlos da Fonseca Bragança, **Estruturas Metálicas: Cálculos Detalhes, Exercícios e Projetos**. 2ª Edição. Editora Blucher. 2005

Pizzio, E. (2005) Avaliação da Vida em Fadiga de Uniões Parafusadas, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

SHACKELDFORD, James F. **Ciência dos Materiais**. São Paulo, Pearson Prentice-Hall, Inc., 6a. Ed. 2008'.

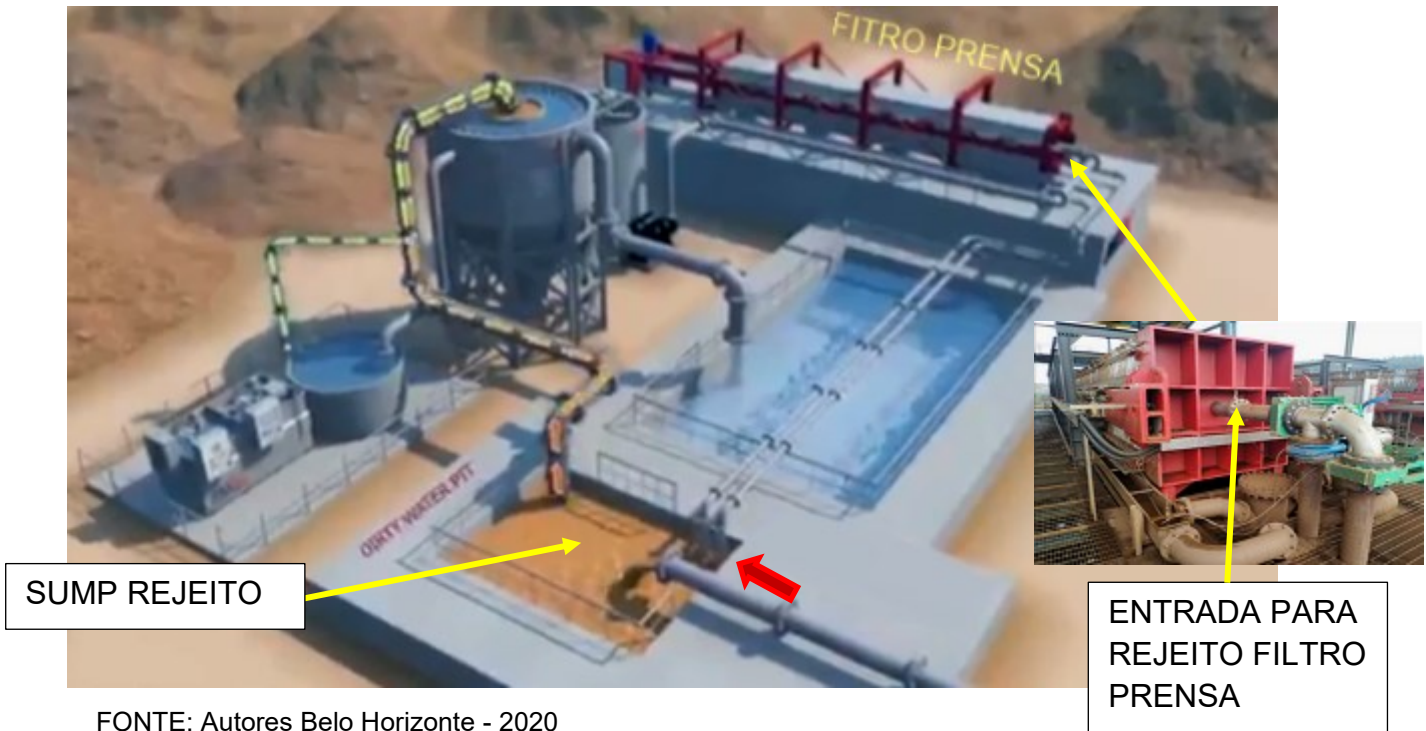
SORIANO, L. Humberto. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. 1ª Edição. São Paulo, Ed. Edusp. 2003.

VAN VLACK, Larence H. **Princípio de ciências e tecnologia dos materiais**. 4º Edição, Rio de Janeiro, Campus, 1984.

William D. Callister, Jr. - John Wiley & Sons, Inc., New York, NY,1991.

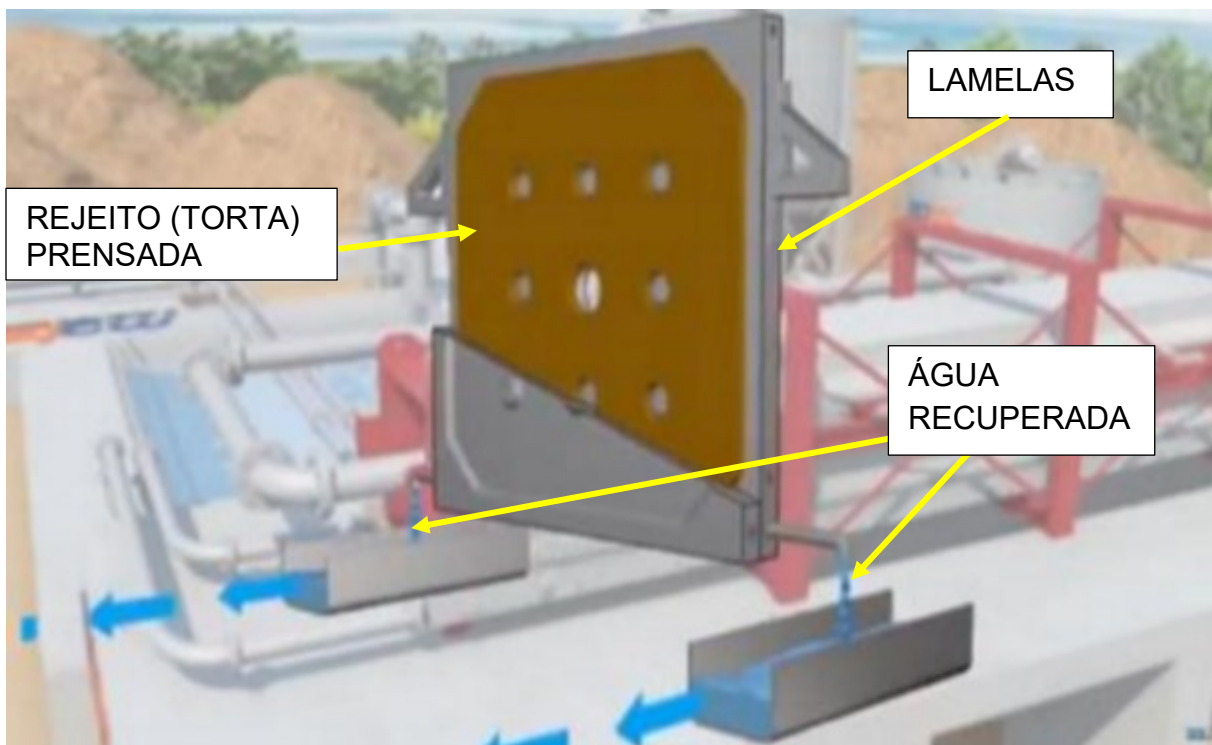
ANEXOS

A1 VISÃO GERAL DE UNIDADE DE FILTRAGEM COMPLETA



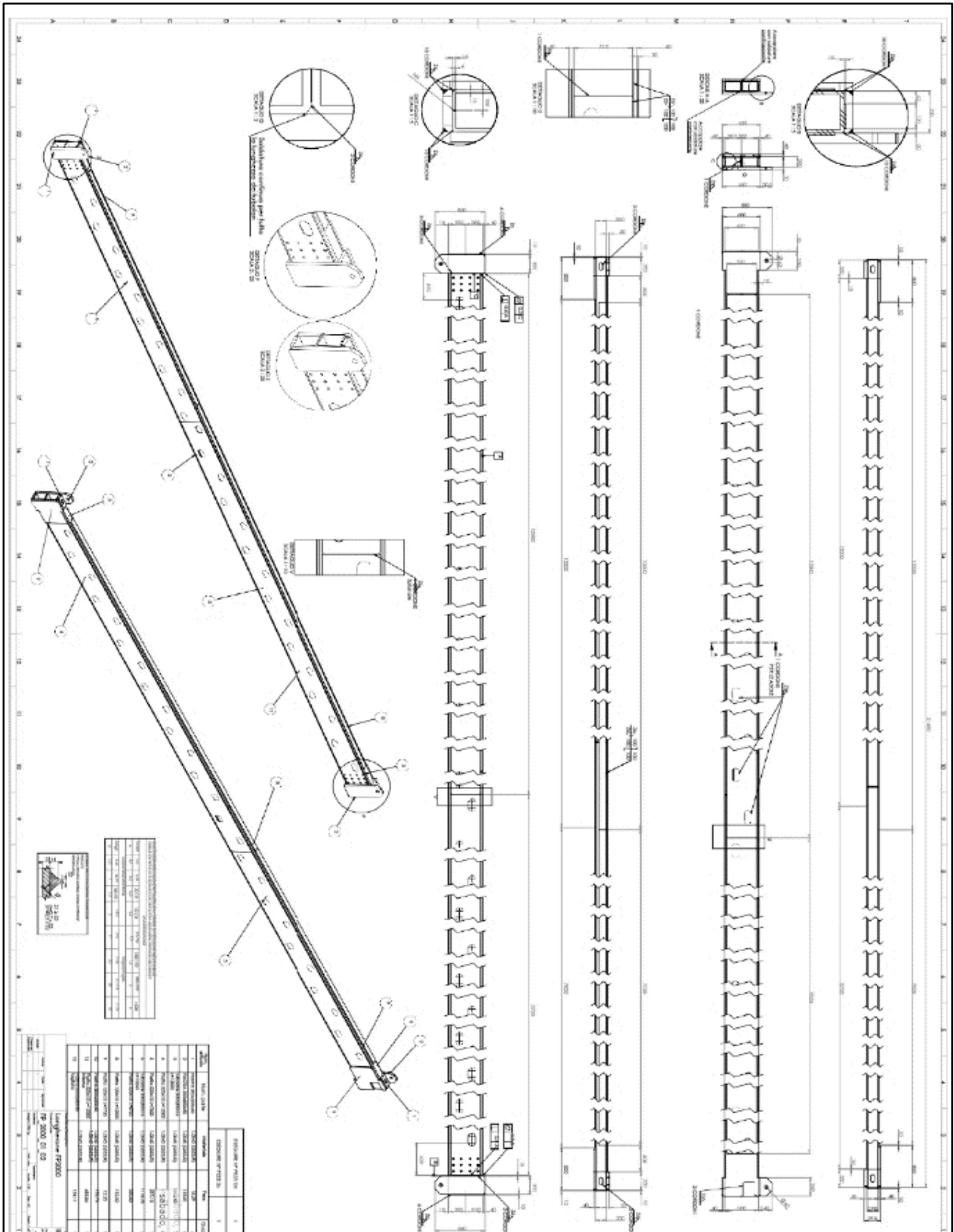
FONTE: Autores Belo Horizonte - 2020

A2 DETALHE LAMELA E TORTA PRENSADA



FONTE: Autores - Belo Horizonte - 2020

A3 PROJETO DE CONJUNTO - REFORÇO 2 VIGA.



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2020

A5 VISÃO GERAL RECORTE AREA TRINCA – LADO CILINDRO HIDRAULICO



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2020

A6 DETALHE RECORTE AREA TRINCA – INTERNO PERFIL



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2020

A7 DETALHE RECORTE AREA TRINCA –JANELA DE VISITA PARA INSPEÇÃO.



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2020

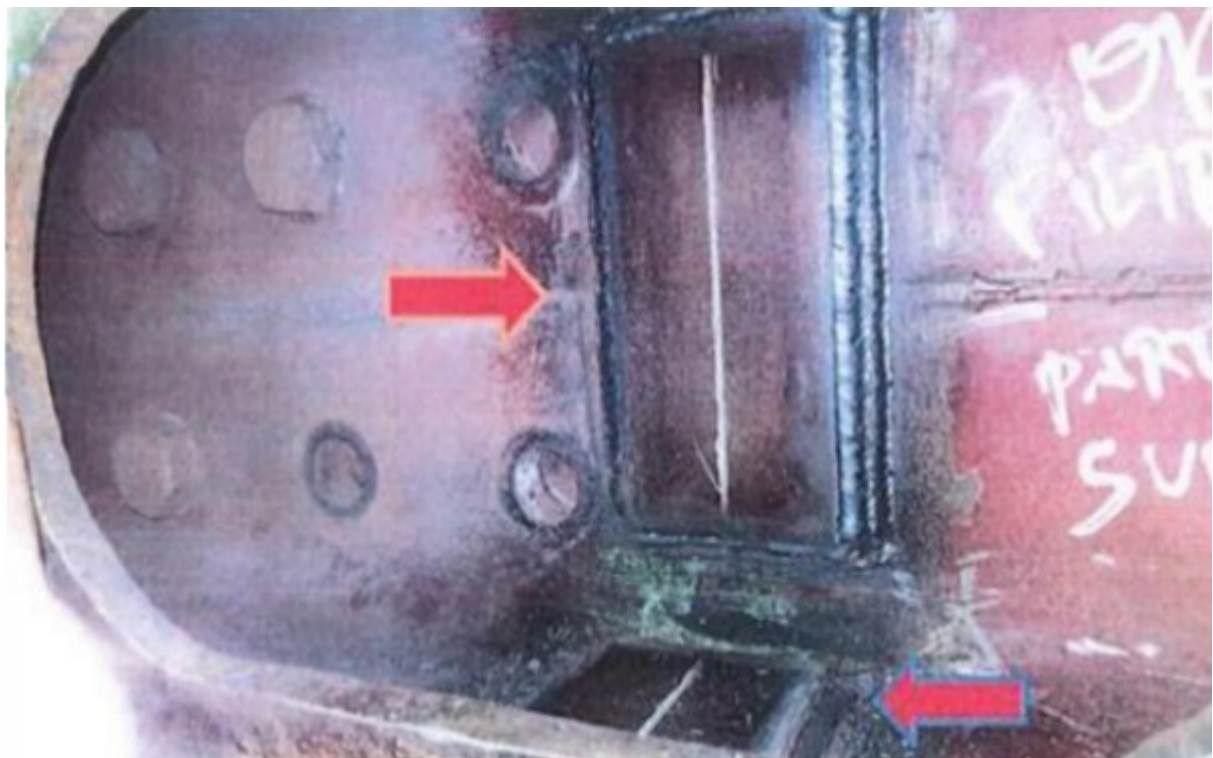
A8 DETALHE RECORTE - AREA DA TRINCA – INSPESÃO ULTRASOM.



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2020

A9 DETALHE RECORTE AREA TRINCA – INTERNO PERFIL - GRAFITAGEM

Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2020

A10 DETALHE RECORTE AREA TRINCA – INTERNO PERFIL - REFORÇO

Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2020

A11 DETALHE RECORTE AREA TRINCA – INTERNO PERFIL - REFORÇO



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2020

A12 PREPARAÇÃO PARA SOLDAGEM REFORÇOS EXTERNOS



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2020

A13 PREPARAÇÃO PARA SOLDAGEM REFORÇOS EXTERNOS – JANELAS DE VISITA



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2020

A14 PREPARAÇÃO E SOLDAGEM COMPLETA DOS REFORÇOS EXTERNOS



Fonte: Autores – Belo Horizonte - 2020