

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ



Nota: 100

ESTRUTURA METÁLICA COM VIGA DO TIPO I VARIÁVEL

Dezembro
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ



ESTRUTURA METÁLICA COM VIGA DO TIPO I VARIÁVEL

Trabalho apresentado pelos alunos Augusto Seiji Nawate, Benalle L. Lemos, Israel Ricardo Lima e Nilton Cesar de Matos Gonçalves como requisito parcial de avaliação da disciplina TM 370 – Estruturas Metálicas, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR. Prof. Walter Kapp.

Dezembro
2016

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo do robô spez kr 1000 titan	5
Figura 2 - Tensões de Flexão.....	6
Figura 3 - Dimensões dos cordões de solda	10
Figura 4: Dimensões dos passes de raiz dos cordões de solda.....	10
Figura 5 - Cargas Úteis do Robô para distâncias do centro de gravidade.	11
Figura 6 - Estrutura Proposta.	12
Figura 7 - Orientação dos Eixos Coordenados.....	13
Figura 8 - Condições de Contorno – Limitantes sem Atrito	14
Figura 9 - Condições de Contorno – Limitante Vetor Posição Zero	14
Figura 10 - Condições de Contorno – Força 15 kN	14
Figura 11 - Análise das Tensões de Von Mises	14
Figura 12 - Análise das Tensões Principais 1º quadrante	15
Figura 13 - Análise das Tensões Principais 3º Quadrante	15
Figura 14 - Análise do Deslocamento	15
Figura 15 - Análise do Deslocamento no Eixo Y	16
Figura 16 - Análise do Fator de Segurança.....	16
Figura 17 -- Análise das Tensões Normais na Direção X.....	16
Figura 18 - Análise das Tensões Cisalhantes no Plano XY	17
Figura 19 - Análise das Tensões Normais na Direção Y	17
Figura 20 - Análise das Pressões de Contato	17

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	5
1.1 OBJETIVO GERAL.....	5
2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 CÁLCULO DOS CORDÕES DE SOLDA.....	7
2.2 DEFINIÇÕES PARA SOLDAGEM.....	9
3. ANÁLISE DO PROJETO.....	13
4. CONCLUSÃO.....	18
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	19

1. INTRODUÇÃO

Como método avaliativo da disciplina Estruturas Metálicas, TM370, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, ministrada pelo professor Dr. Walter Antônio Kapp, foi proposto pelo professor a elaboração de um projeto de uma estrutura que colocasse em prática os conhecimentos adquiridos durante todo o curso de Engenharia Mecânica e na disciplina de Estruturas Metálicas.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma estrutura em formato “C Frame” para ser sustentada por um robô modelo Spez KR 1000 TITAN. Essa estrutura deve suportar uma carga normal de 30 kN na ponta da estrutura e não deve pesar mais de 500 kg e não deve apresentar uma deflexão superior a 4 mm no total, sendo o máximo 2 mm em cada uma das aberturas da estrutura. Deve apresentar uma abertura mínima de 300 mm de altura e de 2000 mm de comprimento e um sistema de flange para fixação do robô. A estrutura será utilizada em aplicação dinâmica, e por ser uma estrutura soldada, é necessário que após a montagem, seja realizado um alívio de tensões para diminuir a chance de ocorrer trincas próximas às soldas.

FIGURA 1: MODELO DO ROBÔ SPEZ KR 1000 TITAN

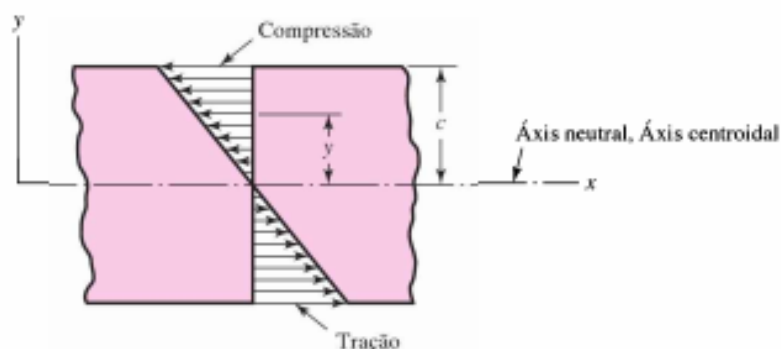


FONTE: Catálogo do Fabricante, Kuka Robot Group, página 1.

O KR 1000 titan é um potente robô de seis eixos. Com uma capacidade de carga de até 1000 kg, ele é utilizado principalmente na indústria automobilística, de vidro, de fundição e materiais de construção.

2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

FIGURA 2 - TENSÕES DE FLEXÃO



FONTE: ELEMENTOS DE MAQUINAS DE SHIGLEY, 8ª EDIÇÃO.

Os tipos de seções transversais mais adequados para o trabalho à flexão são aqueles com maior inércia no plano da flexão, isto é, com áreas mais afastadas dos eixos neutros. O ideal, portanto, é concentrar as áreas em duas chapas, uma superior e uma inferior, ligando-as por uma chapa fina (perfil na forma I ideal, devendo obedecer às limitações de flambagem) (Rone Sérgio Freitas Botas, 2015).

Tensão de Flexão

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$$

Tensão de Flexão Máxima

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M \cdot c}{I}$$

onde c é a magnitude máxima de y .

Segundo Momento de Inércia de área em torno do eixo z

$$I = \int y^2 \cdot dA$$

A tensão de cisalhamento transversal é máxima no eixo neutro e zero nas superfícies externas, visto que é o oposto dos pontos em que a flexão produz seus valores máximos, a tensão de cisalhamento frequentemente não é crítica. Cuidados devem ser tomados com vigas em perfil I ou canal com almas finas que se estendem muito além do eixo neutro de tal forma que flexão e cisalhamento sejam ambos significativos no mesmo elemento de tensão.

Dessa forma, foram escolhidas vigas de perfil I variável, para minimizar o peso da estrutura e distribuir os esforços.

As uniões das chapas foram realizadas através de cordões de solda.

A solda é um tipo de união por coalescência do material, obtida por fusão das partes adjacentes.

A solda apresenta como principais vantagens o fato das juntas apresentarem integridade e eficiência elevadas, serem totalmente estanques e não apresentarem problemas de aperto. Os processos de soldagem podem ainda ser aplicados a diversos tipos de materiais.

Entre as principais desvantagens estão o elevado controle do processo requerido e a impossibilidade de desmontagem, além do processo afetar termicamente uma zona do elemento do metal de base, denominada zona termicamente afetada. Para aliviar as tensões residuais, um processo de tratamento térmico posterior à soldagem pode ser requerido.

Os materiais utilizados na solda têm resistência à ruptura superior à dos aços para os quais são especificados.

2.1 CÁLCULO DOS CORDÕES DE SOLDA

Para o cálculo dos cordões de solda para montagem da viga I de seção variável, foi feita uma análise inicial da montagem das peças utilizando FEA via Autodesk Inventor, considerando as peças coladas, e utilizando a maior tensão de cisalhamento encontrada para calcular o cordão de solda necessário. A tensão de cisalhamento máxima encontrada é:

$$\tau = 16 \text{ MPa}$$

Utilizando um comprimento base para os cordões de solda de $l = 50 \text{ mm}$, passo dos segmentos de $p = 150 \text{ mm}$ e uma máxima tensão recomendada de 40% da resistência do material de adição da solda, obtemos a seguinte tensão admissível:

$$\tau_c = 40\% \cdot 200 \text{ MPa}$$

Para realizar o cálculo, é necessário saber o esforço cortante que atua na peça que possui uma espessura de 10 mm , sendo assim:

$$V = \tau \cdot esp = 160 \text{ kN/m}$$

Ainda, é necessário saber o esforço no segmento de solda:

$$V_c = V \cdot p = 24 \text{ kN}$$

Para calcular o comprimento mínimo dos cordões, a seguinte equação foi utilizada:

$$\tau_c = \frac{V_c}{l \cdot h \cdot \cos 45^\circ}$$

Para a montagem, será realizada solda dos dois lados da alma, e calculando o comprimento mínimo necessário, obtemos:

$$h = \frac{V_c}{2 \cdot l \cdot \tau_c \cdot \cos 45^\circ} = 4,243mm$$

A estrutura final possui alguns reforços que foram postos de modo que suportasse todos os esforços que estão sendo aplicados. A peça 5 – Reforço raiz foi adicionado à alma de modo que suportasse as tensões de compressão que estão sendo aplicados nesta região, por possuir uma espessura maior que a alma, a peça resiste melhor a esta tensão de compressão.

Foi também adicionado à peça 7 – Nervura flange 2 para evitar que os esforços do robô para movimentar a estrutura não fossem aplicados na alma, e sim nas partes mais resistentes que são as duas longarinas.

E para obedecer aos limites de peso impostos pelo problema, vários alívios de peso foram feitos na alma, estes alívios puderam ser feitos, pois há pouco esforço na alma e mesmo com a diminuição da resistência da estrutura, os deslocamentos ficaram dentro dos limites impostos pelo problema.

Ainda foram retirados materiais de determinadas regiões para evitar o encontro de alguns cordões de solda e assim aliviar o acúmulo de tensões nestes pontos.

2.2 DEFINIÇÕES PARA SOLDAGEM

No início deste projeto, utilizamos cada peça em união perfeita com as demais em nossas análises pelo software Autodesk Inventor. Ao verificar certa estabilidade e a diminuição do peso removendo material da alma começamos a projetar os cordões de solda.

Os cordões de solda a serem feitos entre a parte curva longarina externa e a alma foram adicionados para satisfazer tensões de torção e cisalhamento apontadas em análises de métodos finitos. Desta forma o passe deve ser contínuo, pois foi verificado que esta junção seria muito solicitada para demais configurações de soldagem.

Já a solicitação de tensões verificadas para o restante da longarina externa ligada a alma não são de grande magnitude podendo ser feitos passes intermitentes de solda até próximo ao furo de acoplamento do robô. Neste local devido ao furo existe um concentrador de tensões que nos levou a projetar um cordão de solda contínuo próximo ao tubo ferramenta, assim evitando mais um ponto crítico na estrutura.

A união da longarina interna com a alma também se mostrou crítica em sua curvatura. Desta vez foi necessário criar um reforço com um passe mais espesso de solda para aliviar as tensões ali existentes e aperfeiçoar o projeto.

De forma a acoplar a flange do robô na estrutura foi escolhido o ponto mais próximo possível do centro de gravidade da mesma de modo a não comprometer a precisão do equipamento durante seu uso. Foram projetados filetes em torno do diâmetro do flange para sua soldagem.

Para todos os passes com relação a alma foram definidos passes de raiz em chanfro de 45° e 5mm de espessura para garantir união entre os componentes. Todas as dimensões dos cordões são apresentadas conforme as figuras abaixo:

FIGURA 3 - DIMENSÕES DOS CORDÕES DE SOLDA

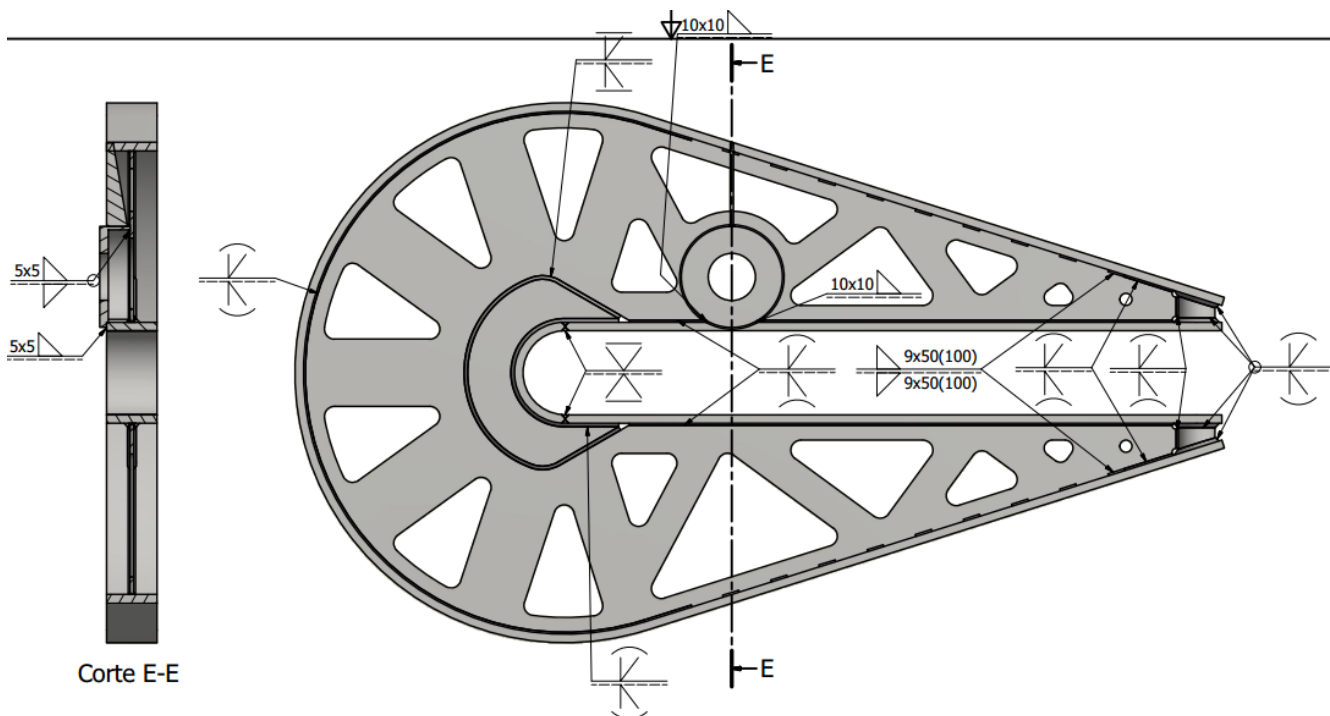


FIGURA 4: DIMENSÕES DOS PASSES DE RAIZ DOS CORDÕES DE SOLDA.

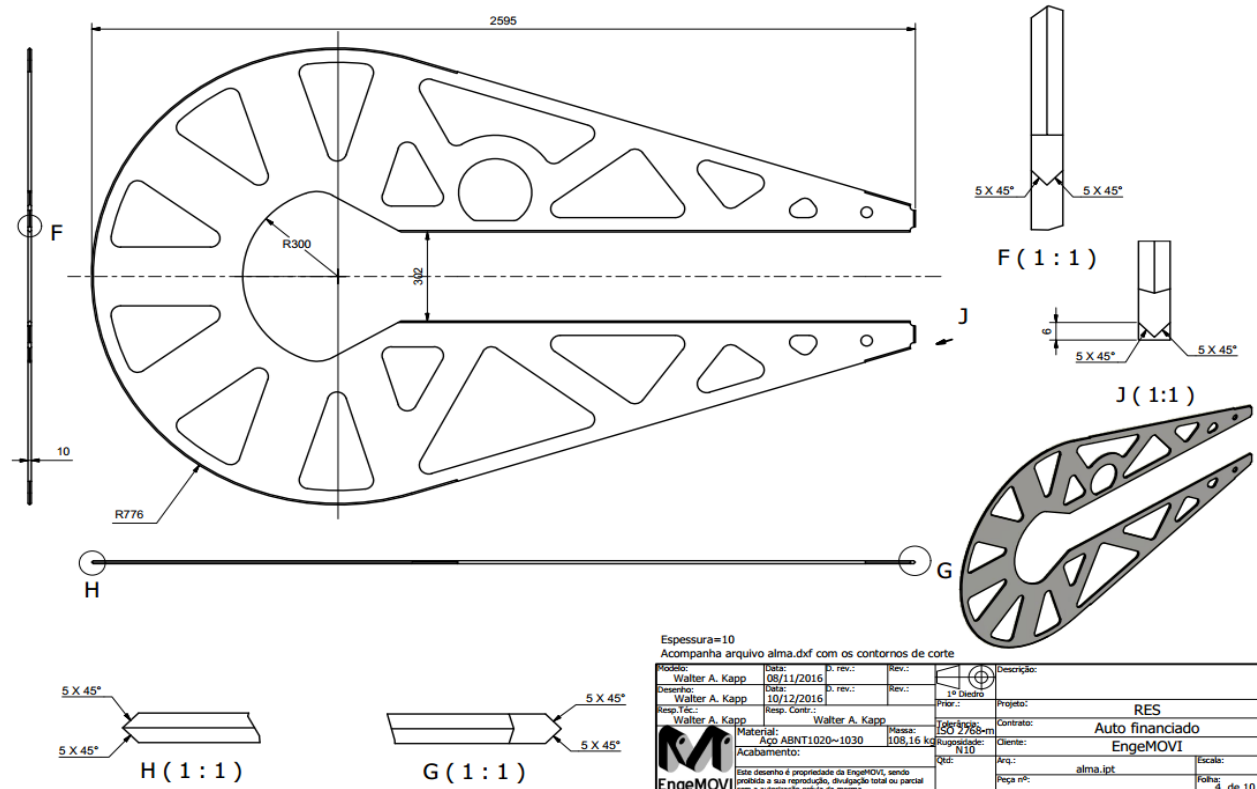
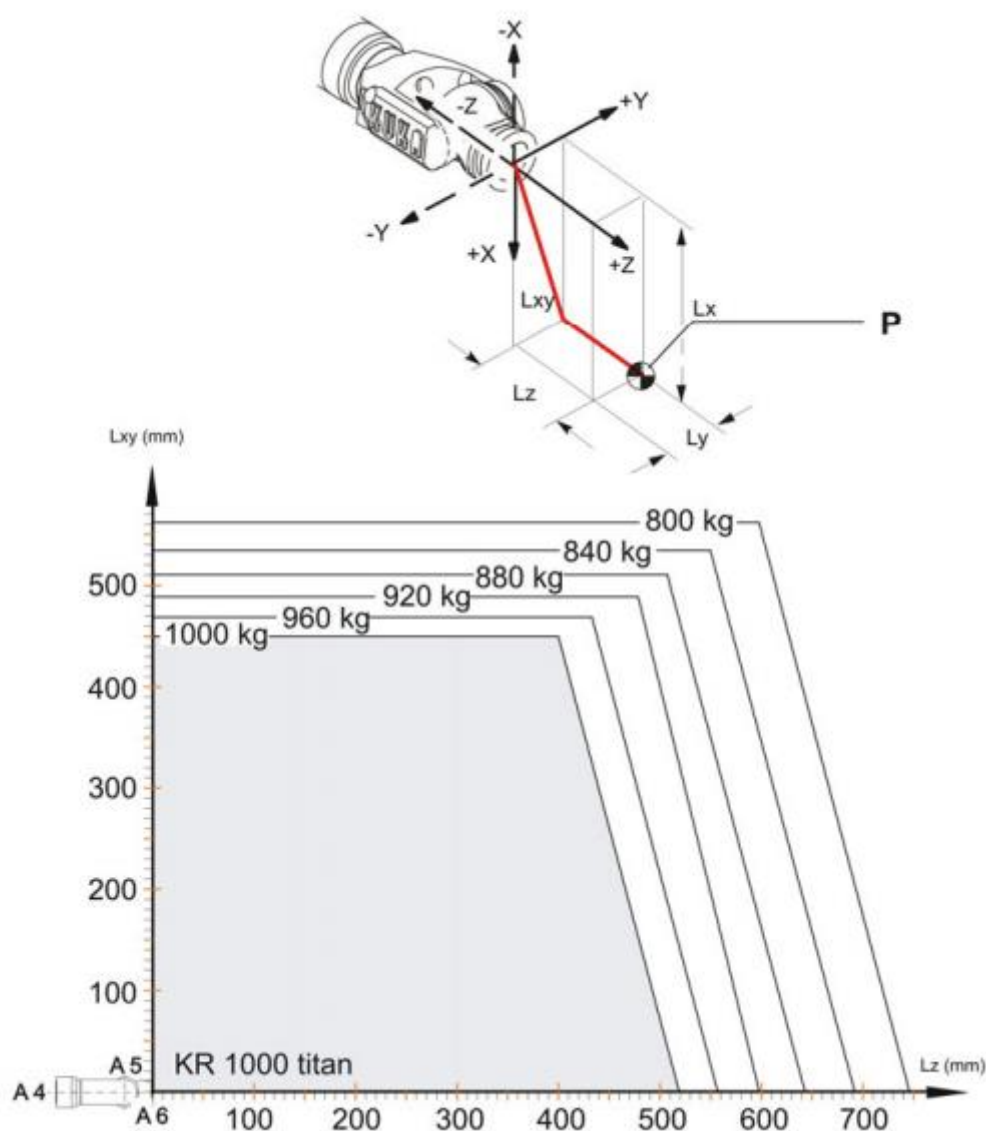


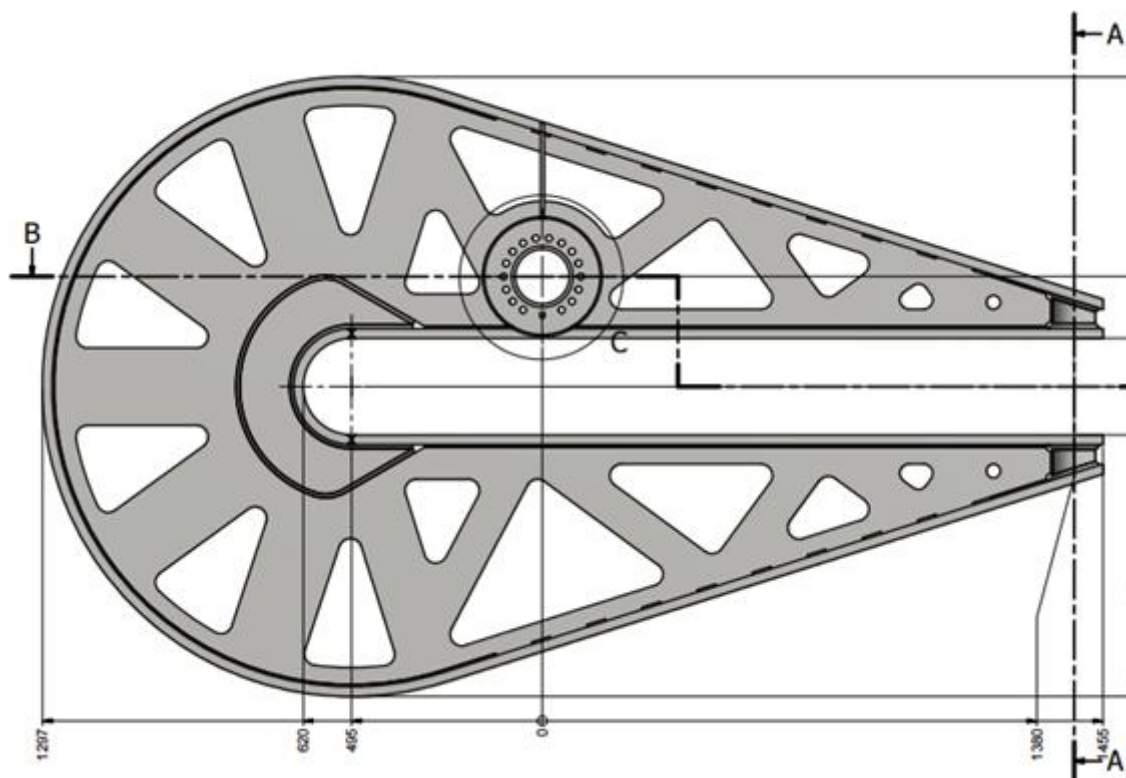
FIGURA 5 - CARGAS ÚTEIS DO ROBÔ PARA DISTÂNCIAS DO CENTRO DE GRAVIDADE.



Fonte: Catálogo do Fabricante, Kuka Robot Group

Através da figura 5 é possível avaliar que para uma melhor utilização do robô, sendo este capaz de operar com sua carga útil máxima de 1000 kg, a flange de fixação do robô deve ser posicionada de forma que a carga seja aplicada a no máximo 400 mm no plano Lz e 450 mm no plano Lxy.

FIGURA 6 - ESTRUTURA PROPOSTA.



É possível observar na estrutura proposta que o centro de massa da estrutura é próximo ao local onde a flange de fixação do robô foi posicionada, garantindo assim que este seja capaz de operar com sua carga útil máxima.

Foram discutidas soluções para fabricação da estrutura. Chegou-se a conclusão que a estrutura deveria ser elaborada através de usinagem a laser, pois uma estrutura fundida apresentaria muitos defeitos. O corte a laser é um avançado processo tecnológico para corte térmico, que possui como principais vantagens a elevada precisão e qualidade superficial cortada, níveis mínimos de deformação, emissões de fumos e ruído, mínima zona termicamente afetada (ZTA), alta velocidade de corte, extrema versatilidade e automação.

3. ANÁLISE DO PROJETO

A estrutura desenhada no software Autodesk Inventor, considerando todas as soldas, alívios de tensão, a redução de massa, acessórios e sua aparência final passou por uma análise FEA para verificar se as necessidades do projeto foram atendidas.

Primeiramente foi dividida a peça no CAD, deixando-a apenas $\frac{1}{4}$ do modelo 3-D original para análise estrutural. Na figura 7 mostra as disposições dos eixos coordenados utilizados na análise. Nas figuras 8 e 9 mostram as condições de contorno utilizadas para limitar as movimentações não pertinentes. Na figura 10, tem-se a condição de contorno da força, considerando 15kN, já que são 30kN para cada lado para peça inteira, conforme especificação. Nas figuras 11, 12 e 13 estão as tensões de Von Mises e as Tensões Principais. Nelas estão indicadas as tensões máximas e mínimas em cada figura, onde se pode perceber que a peça não chegará ser solicitada a 50% da tensão de escoamento de um aço ABNT 1020, não sofrendo assim deformações permanentes.

Nas figuras 14 e 15 mostram o deslocamento máximo da estrutura, no eixo Y, o máximo deslocamento 1,877 mm, que é menor do que 2 mm, o que atende os requisitos de projeto.

Na figura 16 mostra o fator de segurança. Pode-se perceber que na ponta da estrutura, no local de aplicação da força, local de grande solicitação, o fator de segurança é máximo de 15, porém na extremidade oposta, percebem-se fatores de segurança menores, mas acima de 3.

Nas figuras 17, 18, 19 mostra as tensões normais na direção X, tensão cisalhante no plano XY e as tensões normais na direção Y, respectivamente. Todas as tensões do modelo 3-D se mostram bem inferiores a tensão de escoamento do material (ABNT 1020). Na figura 20, tem-se a análise da pressão de contato da estrutura, onde a máxima pressão de contato é na região da aplicação da força.

FIGURA 7 - ORIENTAÇÃO DOS EIXOS COORDENADOS

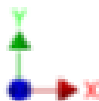


FIGURA 8 - CONDIÇÕES DE CONTORNO – LIMITANTES SEM ATRITO

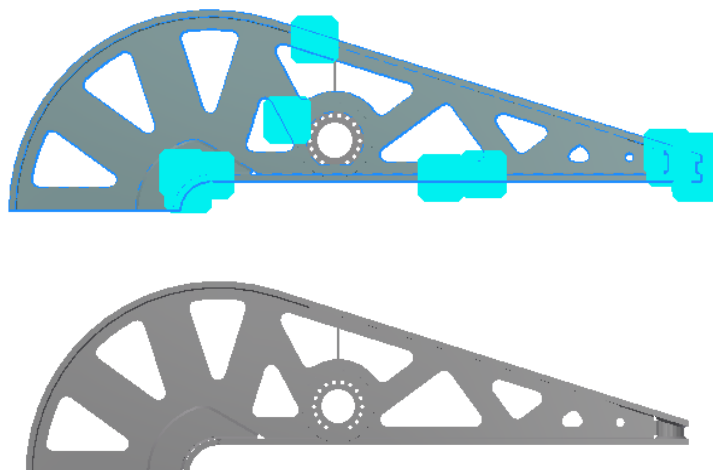


FIGURA 9 - CONDIÇÕES DE CONTORNO – LIMITANTE VETOR POSIÇÃO ZERO

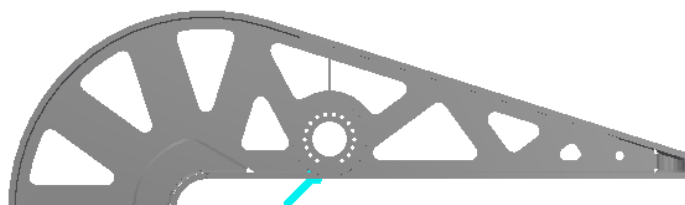


FIGURA 10 - CONDIÇÕES DE CONTORNO – FORÇA 15 KN

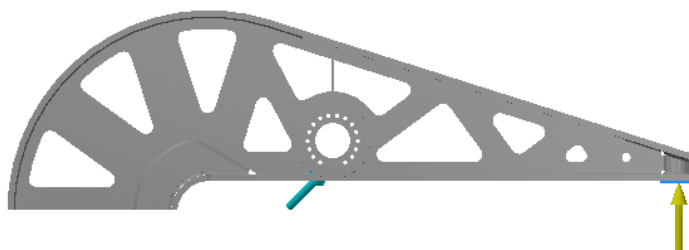


FIGURA 11 - ANÁLISE DAS TENSÕES DE VON MISES

Type: Von Mises Stress

Unit: MPa

10/12/2016, 18:50:42

102,9 Max

82,3

61,8

41,2

20,6

0,1 Min

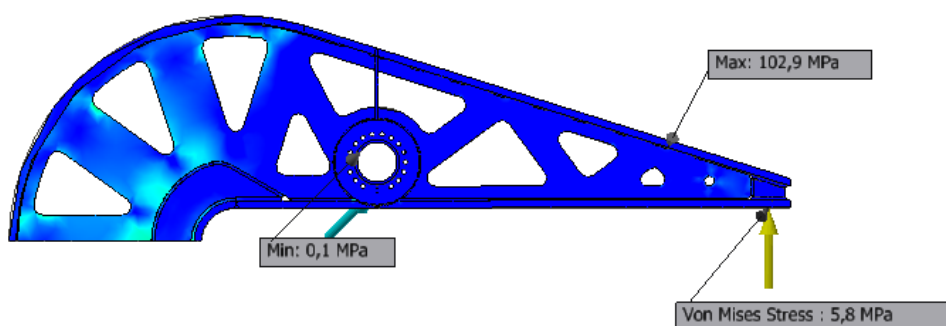


FIGURA 12 - ANÁLISE DAS TENSÕES PRINCIPAIS 1º QUADRANTE

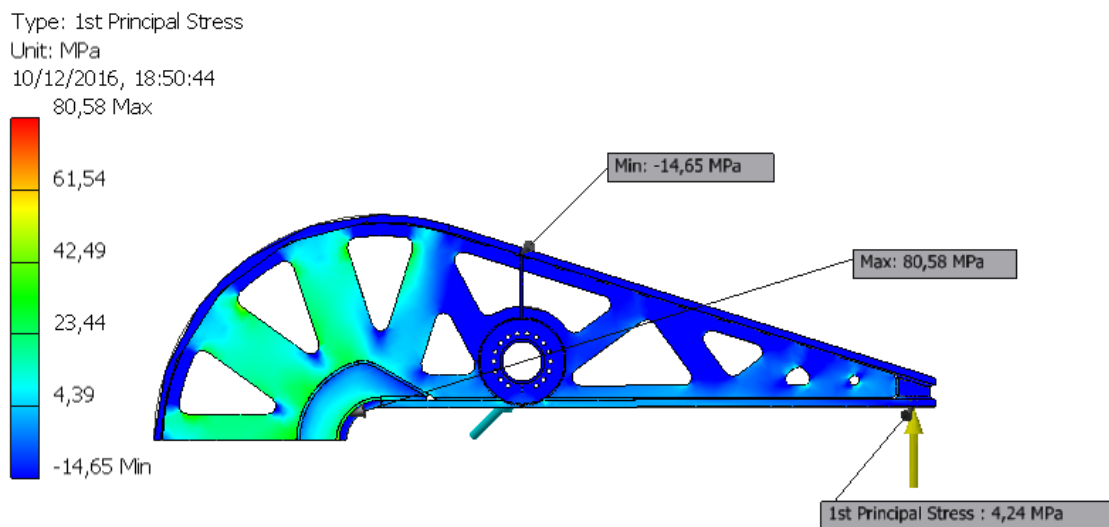


FIGURA 13 - ANÁLISE DAS TENSÕES PRINCIPAIS 3º QUADRANTE

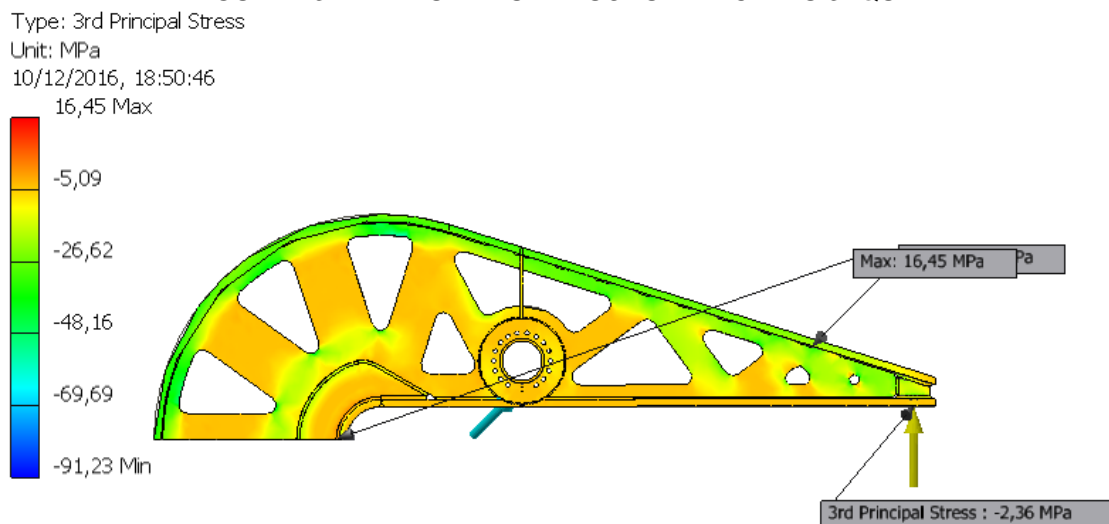


FIGURA 14 - ANÁLISE DO DESLOCAMENTO

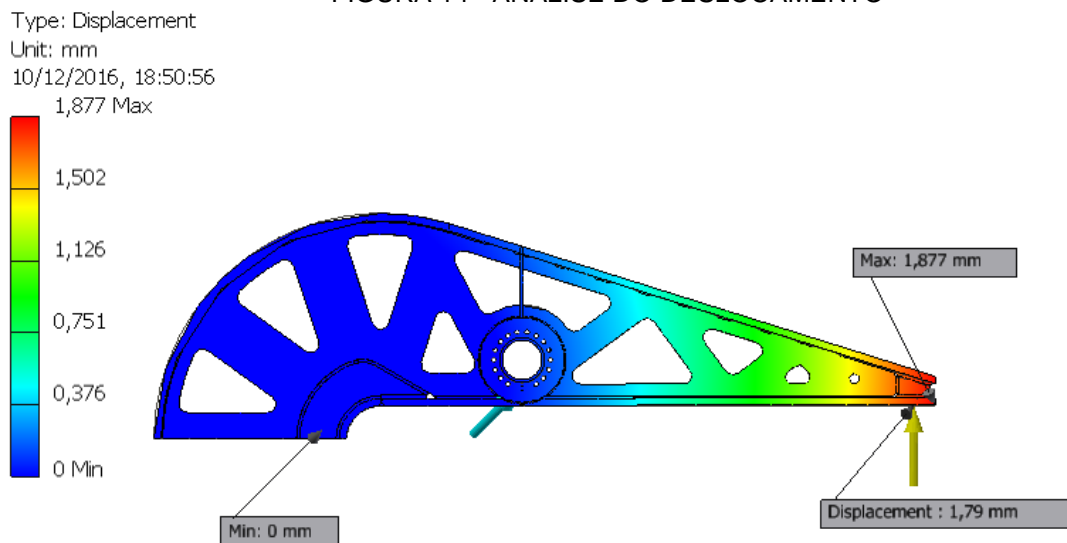


FIGURA 15 - ANÁLISE DO DESLOCAMENTO NO EIXO Y

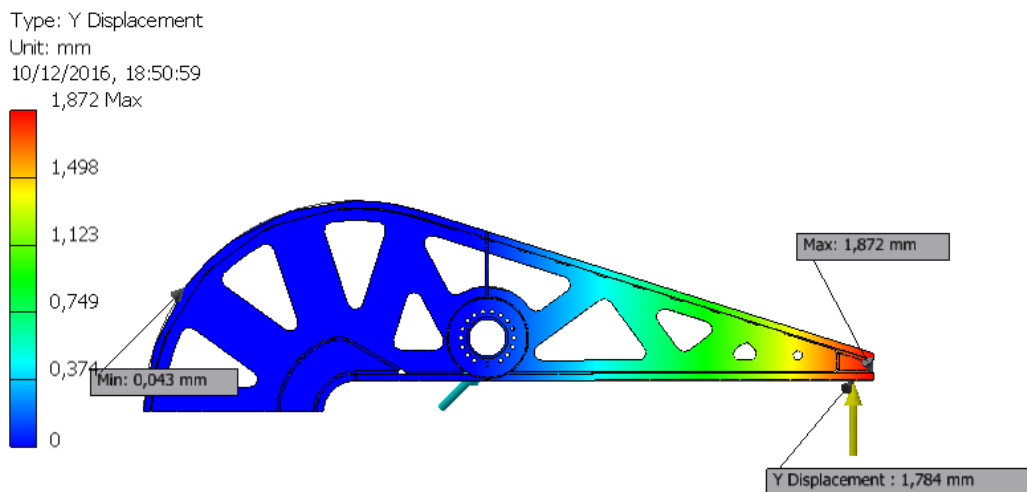


FIGURA 16 - ANÁLISE DO FATOR DE SEGURANÇA

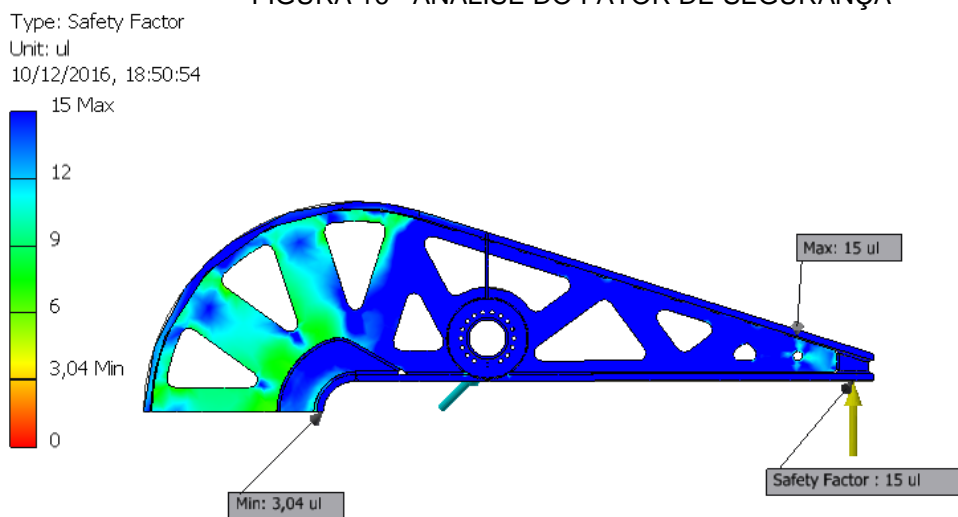


FIGURA 17 -- ANÁLISE DAS TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO X

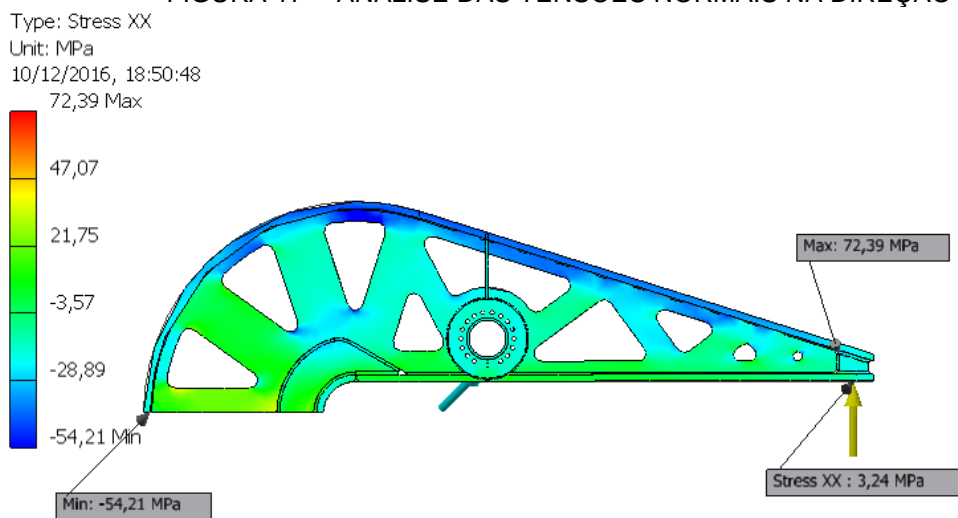


FIGURA 18 - ANÁLISE DAS TENSÕES CISALHANTES NO PLANO XY

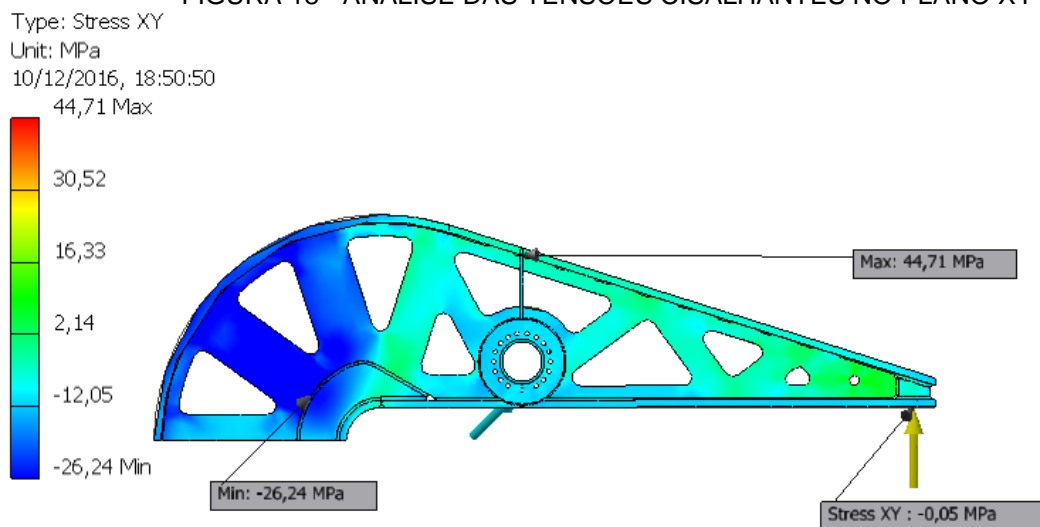


FIGURA 19 - ANÁLISE DAS TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO Y

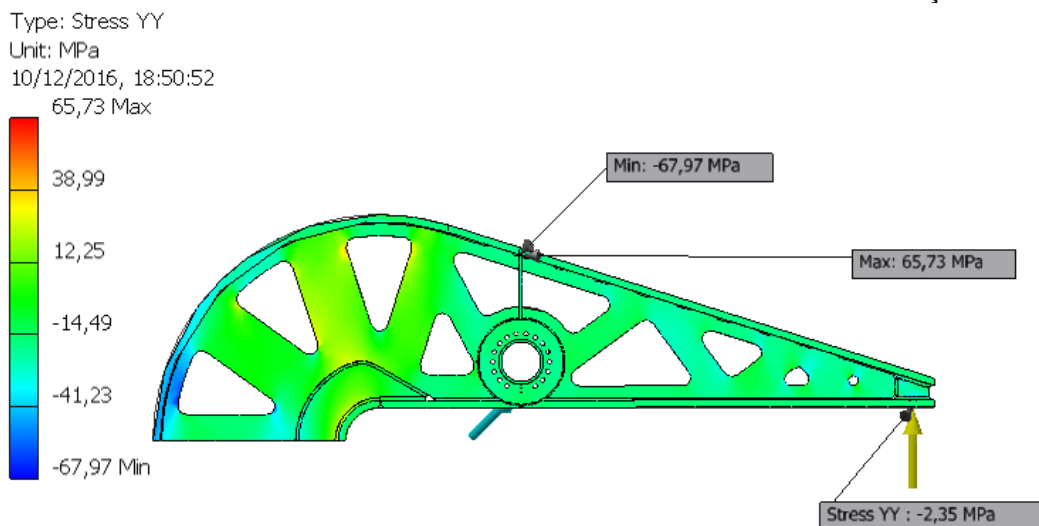
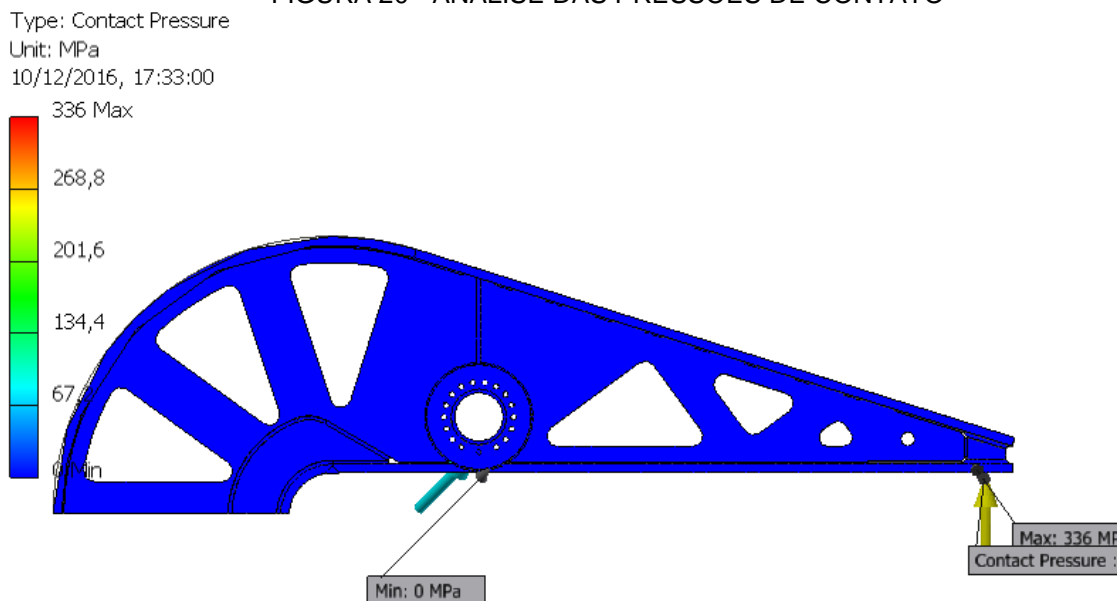


FIGURA 20 - ANÁLISE DAS PRESSÕES DE CONTATO



4. CONCLUSÃO

No início deste projeto foram propostos somente esboços de estruturas para suportar a carga exercida pelo robô visando limites de tensão e deformação. O desenvolvimento destes conceitos básicos até o resultado final do projeto trouxe muita informação técnica e prática de passos a serem seguidos ao se projetar uma estrutura metálica.

O conceito inicial de nosso projeto atenderia à solicitação de projeto após a redução de seu peso e soldas projetadas. Entretanto os procedimentos e análises realizados para conhecimento dos pontos críticos da estrutura e sua otimização foram pontos cruciais para aprimoramento de conhecimentos de FEA e de engenharia de projetos.

Enfim, o projeto foi concluído com base na teoria apresentada na universidade, em conhecimentos práticos do ponto de vista de fabricação dos componentes da estrutura bem como suas uniões soldadas e finalmente por detalhes na parte construtiva do projeto. Todas essas informações compiladas geraram um grande resultado que servirá como exemplo para futuros projetos de engenharia.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7 Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

CATÁLOGO: KUKA Robert GmbH. **KR 1000 titan, KR 1000 L750**. Alemanha, 2016.

LG STEEL. **Propriedades Mecânicas dos Aços**. Disponível em <<http://lgsteel.com.br/propriedades-mecanicas-do-carbono.htm>>. Acesso em 18/12/2016.