

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO E DE BRASAGEM NO
DESEMPENHO DE UM CONECTOR DE LINHA HIDRÁULICA DE MÁQUINA
AGRÍCOLA.

por

Ana Paula dos Santos Cavalheiro

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Cavalheiro, Ana Paula dos Santos
AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO E DE
BRASAGEM NO DESEMPENHO DE UM TERMINAL DE LINHA
HIDRÁULICA DE MÁQUINA AGRÍCOLA. / Ana Paula dos Santos
Cavalheiro. -- 2023.
26 f.
Orientador: Martin Geier.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Tratores agrícolas. 2. Linhas hidráulicas. 3.
Força máxima de ruptura. I. Geier, Martin, orient.
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ana Paula dos Santos Cavalheiro

AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO E DE BRASAGEM NO
DESEMPENHO DE UM CONECTOR DE LINHA HIDRÁULICA DE MÁQUINA
AGRÍCOLA.

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Martin Geier

Comissão de Avaliação:

Prof. Darci Barnech Campani

Profª. Simone Ramires

Prof. Martin Geier (Presidente)

Porto Alegre, abril de 2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família e amigos, que assim como eu, valorizam a entrega deste como marco final de uma longa e importante jornada que construí. Aos que estiveram ao meu lado durante todos esses anos, que vivenciaram junto comigo os prazeres e as dores deste ciclo vivido, dedico, em especial, essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à família e amigos pelo apoio incondicional, aos colegas de trabalho por compartilharem comigo seus conhecimentos e suas experiências técnicas, às empresas, mencionadas em caráter confidencial, pela disponibilidade de recursos e de informações, e aos técnicos do Laboratório do GMap e do Laboratório de Usinagem Convencional por viabilizarem a execução dos ensaios realizados. De modo geral, agradeço a todos que estiveram, mesmo que minimamente, envolvidos nesta árdua empreitada.

APOIO FINANCEIRO

Agradeço às Empresas, mencionadas em caráter de confidencialidade, pela disponibilização de amostras e de recursos para a realização dos ensaios, que configuram a parte principal deste trabalho.

“Eu jamais colocarei o meu nome em um produto que não tenha em si o melhor que há em mim”

John Deere

Cavalheiro, Ana Paula dos Santos. **Avaliação dos processos de conformação e de brasagem no desempenho de um conector de linha hidráulica de máquina agrícola.** 2023. 28. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

Tratores agrícolas são máquinas projetadas para fornecer força de tração e atender a demandas crescentes de produtos agrícolas. A tecnologia permitiu o monitoramento de falhas e de oportunidades de melhorias de projeto. Este trabalho objetiva estabelecer a comparação de desempenho de um conector brasado e de um conformado, de um tubo rígido componente do sistema hidráulico de um trator agrícola. Foram realizados estudos do problema físico, através de verificações de causas raiz presumidas, e estudos do problema experimental, através da análise de desempenho dos conectores submetidos a esforços de tração. Os resultados mostraram que os conectores não ofereceram fragilidade ao componente na condição de tração. Amostras conformadas suportaram forças máximas de ruptura de 15 kN, enquanto as brasadas suportaram força máxima de 14,61 kN, sendo estes valores similares à resistência do tubo, de 14,40 kN. Ambos os conectores apresentaram quebra devido ao escoamento do tubo. O estudo do caso físico permitiu apontar a condição de montagem como hipótese principal de causa raiz. A partir das análises comparativas entre o custo das falhas em campo e o custo associado à produção (material, processo e mão de obra), a solução mais adequada para as condições consideradas foi a troca do processo de fabricação para o conector brasado.

PALAVRAS-CHAVE: tratores agrícolas, sistema hidráulico, força máxima de ruptura.

Cavalheiro, Ana Paula dos Santos. **Assessment of the conformation and brazing processes in the performance of an agricultural machine hydraulic line connector.** 2023. 28. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

Agricultural tractors are machines designed to provide tractive force to meet growing demands of agricultural products. The technology has enabled the monitoring of failures and project improvement opportunities. This work aims to compare the performance of brazed and formed connectors, a rigid tube component of the hydraulic system of an agricultural tractor. Physical problem studies have been performed, through hypothetical root cause checks, and studies of the experimental problem by analyzing the performance of the connectors submitted to tractive effort. Results showed that the connectors did not provide weakness to components in the tensile tests. Formed samples withstood maximum rupture forces of 15 kN, while the brazed ones withstood maximum force of 14.61 kN, these values being similar to the tube's own strength of 14.40 kN. Both connectors were found to break due to the tube material yield strength limit. The study of the physical case allowed the assembly condition to be pointed out as the main hypothesis of root cause. Therefore, potential improvements are considered: change of the manufacturing process from cold forming to brazing, or change of assembly condition. Through a relative analysis between the cost of failure in the field and production costs (material, process and labor) the most suitable solution for the considered conditions was to change the manufacturing process to a brazed connector.

KEYWORDS: agricultural tractors, hydraulic system, maximum breaking strength.

NOMENCLATURA

Símbolos

P_T	Pressão nominal de trabalho	[MPa]
P_R	Pressão nominal de ruptura	[MPa]
$R_{m,min}$	Resistência à tração mínima	[MPa]
t	Espessura de parede	[mm]
D_e	Diâmetro nominal externo	[mm]
L_T	Comprimento total	[mm]
L_0	Comprimento efetivo inicial	[mm]
S_0	Área da seção transversal inicial	[mm ²]
D_0	Diâmetro externo inicial	[mm]
k	Coefficiente de proporcionalidade	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Revisão Bibliográfica	1
1.2.2. Processo de conformação do conector	2
1.2.3. Processo de brasagem do conector	3
1.3. Objetivo	3
2. FUNDAMENTAÇÃO	4
2.1. Caracterização do componente	4
2.2. Metodologia de solução e de análise	4
3. CASO DE ESTUDO	5
3.1. Estudo do problema físico	5
3.1.1. Validações do problema físico	6
3.2. Estudo do problema experimental	6
4. RESULTADOS	8
4.1. Problema físico	8
4.2. Problema experimental	10
5. CONCLUSÃO	15
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

1. INTRODUÇÃO

O uso de tratores agrícolas permite o aumento da produtividade na agricultura. Segundo Varella (2006), são projetados para tracionar e fornecer potência para implementos agrícolas. Essas máquinas complexas surgiram no contexto de altas demandas de produção agrícola. De acordo com Carpanezzi, *et al.* (2016), eles foram feitos para substituir a força humana e animal, e baseado nisso modelos precursores como o Waterloo Boy, da John Deere, e o trator Froelich são apresentados ao mundo na década de 1920. O cenário atual conta com um número grande de montadoras, com extensos catálogos de produtos. A tecnologia permitiu que cada vez mais a necessidade do campo fosse considerada no desenvolvimento e na fabricação desses equipamentos. Essa aproximação elevou o nível de exigências dessas máquinas, e permitiu o monitoramento de falhas e de oportunidades de melhorias de projeto.

1.1. Motivação

Este trabalho permitirá o estudo de componentes hidráulicos de um trator agrícola, o que proporcionará o melhor entendimento do seu modo de fabricação, da sua aplicação e do seu desempenho no campo. O conhecimento construído servirá de base teórica para estudos de caso e para implementações de melhorias de conectores de tubos hidráulicos.

1.2. Revisão Bibliográfica

Tendo como base o cenário agrícola do Brasil, as aplicações são muito variadas. Segundo Márquez (2012), o desenvolvimento do trator se adapta às circunstâncias do seu uso, sendo o projeto um conjunto de funcionalidades padrão e um conjunto de funcionalidades específicas. Assim, o tamanho do trator dá a noção de qual será a sua utilização, sendo os modelos “standard” mais versáteis, presentes em todos os tipos de atividades, como: transporte, preparos de solo, plantio, entre outras. De modo geral, segundo Varella (2006), esses equipamentos podem ser analisados em módulos principais: motor, transmissão, chassi, sistema hidráulico e rodados. Destes, é o sistema hidráulico, juntamente com a transmissão, que permite grande parte das funcionalidades que o campo necessita. Os implementos agrícolas mais simples são considerados de arrasto, sendo puxados devido ao acoplamento direto na barra de tração. Já os mais complexos são acoplados ou não na barra de tração, e no circuito hidráulico do trator, fazendo uso do óleo hidráulico da transmissão para desempenhar sua funcionalidade.

De acordo com Relatório Interno (Empresa Confidencial, 2023), tratores são classificados por modelos de acordo com a potência nominal do motor, que pode variar entre 60 e 400 CV. O dimensionamento do sistema hidráulico de cada trator leva em consideração a potência nominal, a pressão de trabalho, e as demandas de fluxo necessárias para os implementos agrícolas, que segundo a Norma ISO 10448:2021 (ISO, 2021), deve ser de 0 l/min a 50 l/min com pressão máxima de 20,5 MPa no engate rápido traseiro. Além de bombas, de filtros e de mangueiras, grande parte dos circuitos hidráulicos é composta por tubos metálicos rígidos. Esses tubos são conectados através de conectores, que permitem o acoplamento e a vedação ao longo do circuito. Na Fig. 1 tem-se a imagem dos conectores estudados neste trabalho.

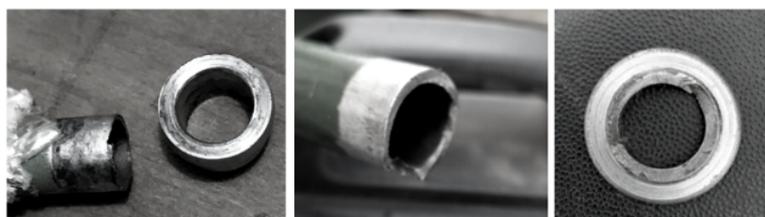
Figura 1 - Conectores de tubos hidráulicos.



Fonte: Do autor (2023)

Uma falha no sistema hidráulico implica na parada total do equipamento, o que impacta diretamente na produtividade do usuário. Por isso, torna-se essencial a análise e a avaliação dos processos de fabricação dos componentes que integram o circuito hidráulico, e principalmente, como esses processos impactam no desempenho desses componentes. Segundo Relatório Interno (Empresa Confidencial, 2023), no decorrer do último período de operações, o conector destes componentes fabricados por conformação a frio apresentou falhas de campo, em que a extremidade do conector apresentou uma trinca ou a quebra total, ocasionando vazamento no sistema. Na Fig. 2 tem-se a evidência de um caso de falha por quebra total do conector. Sendo as principais hipóteses de causa raiz: o processo de fabricação do conector ou a condição de montagem do componente.

Figura 2 - Evidência de quebra total do conector do tubo hidráulico.



Fonte: Empresa Confidencial (2023)

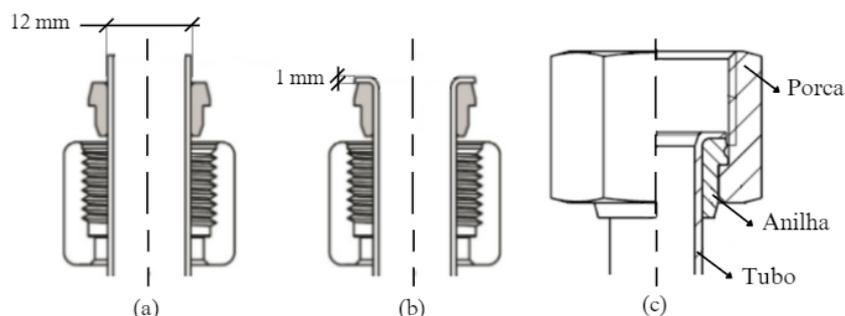
1.2.2. Processo de conformação do conector

Para Costa (1985), a conformação mecânica é o nome dado ao conjunto de processos que fazem uso de força externa para moldar a matéria-prima na forma final desejada. Existem diversos processos, podendo ser classificados quanto ao esforço conformante, como: compressão direta, compressão indireta, tração, dobramento e cisalhamento. O processo de conformação pode ser entendido como resultado de diversos fenômenos físicos, são eles: o fluxo de metais, o atrito na interface ferramenta/peça, geração e transferência de calor, particularidades da microestrutura, entre outros, por exemplo. A temperatura do processo influencia substancialmente no produto final obtido, podendo ser este feito a quente, a morno ou a frio. Segundo Costa (1985), a conformação a quente permite o atingimento de grandes deformações, devido à intensa vibração térmica que reduz o encruamento. Já nos processos a frio, na ausência de alívio de encruamento, obtém-se uma deformação total menor.

De acordo com Relatório (Fornecedor Confidencial, 2022), o processo de fabricação do conector conformado consiste na conformação a frio do tubo. O processo

inicia pela inserção da porca e da anilha ao tubo, sendo a conformação da extremidade do tubo feita em etapa única por método rotativo, fazendo-se uso de punção e de matriz. Ao final tem-se a montagem do tubo à uma anilha e porca através de um flange na extremidade do tubo. Na Fig. 3 é apresentada a configuração tubo/anilha antes e após a conformação, caracterizado pela presença da flange no produto final.

Figura 3 - Configuração antes (a), após a conformação a frio (b) e detalhamento (c).



Fonte: Fornecedor Confidencial (2023)

1.2.3. Processo de brasagem do conector

Para Groover (2014), define-se brasagem como o processo que permite a união de materiais através da fusão de um metal de adição, por ação capilar entre superfícies, mantendo os metais a serem unidos na fase sólida. Este processo apresenta dois fatores bastante influentes no produto final, que são: o molhamento do material base pelo metal de adição, que permite a união, e a capilaridade, que proporciona um ótimo preenchimento de junta. De acordo com Machado (1996), devido ao processo ser feito sob atmosfera controlada e, também, pelo fato de não fundir o metal base, a brasagem se destaca, entre os demais processos de solda, por não oferecer distorções estruturais e alterações metalúrgicas no material, entregando juntas de alta qualidade.

Segundo Relatório (Fornecedor Confidencial, 2022), a brasagem realizada para fabricação do conector estudado é feita por processo de indução forte, com garantia de resistência por meio de capilaridade, em que os materiais base e o metal de adição, liga de prata, são expostos a uma bobina de indução eletromagnética, responsável pelo processo de aquecimento dos materiais. Por Zazycki *et al.* (2017), as juntas produzidas por brasagem são sistemas heterogêneos e anisotrópicos, que apresentam capacidade de suportar cargas muito superiores à resistência à tração do metal de adição. Segundo Machado (1996), isso se deve ao fato de existirem grandes diferenças entre as propriedades elásticas e plásticas dos metais base e de adição. Na prática, estando a junta submetida a elevadas cargas, o metal de adição tende a escoar, porém os metais base impedem o escoamento, visto que estes ainda se encontram no estado elástico.

1.3. Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo estabelecer a avaliação comparativa entre o desempenho de um conector brasado e o de um conformado. Pretende-se avaliar o impacto do processo de fabricação na aplicabilidade do componente e, a partir disso, propor a melhoria mais adequada para o caso estudado.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1. Caracterização do componente

Trata-se de linhas de óleo do trem de força do trator, posicionados na carcaça do diferencial na transmissão, com a função de bloqueio do diferencial para acionamento da tração. Linhas de pressão, que trabalham sob condições de 180 bar (18 MPa), os tubos apresentam geometria similar, respeitando as restrições de projeto. Segundo BTL Steel Works, são tubos de aço carbono conformados a frio, com especificações definidas pela Norma DIN EN 10305-1:2016. Não apresentam costura e possuem elevada precisão dimensional e propriedades mecânicas bem definidas. Trata-se do material E235N, cuja composição química e propriedades mecânicas encontram-se na Tabela 1.

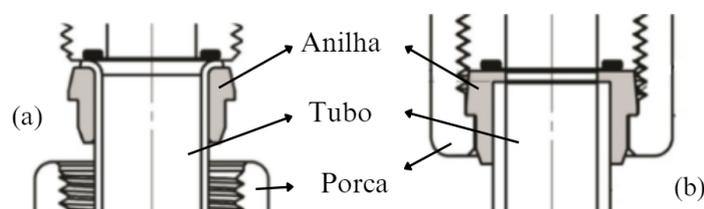
Tabela 1 - Composição percentual de massa e propriedades mecânicas do material.

Aço		Composição % de massa				Propriedades Mecânicas		
Nome	Número	C máx	Si máx	Mn máx	Al mín	Resistência à tração [MPa]	Tensão de escoamento [MPa]	Elongação após a fratura
E235	1.0308	0,17	0,35	1,20	0,015	360 a 480	235	25%

Fonte: Norma DIN EN 10305-1 (2016)

Os componentes apresentam conectores nas duas extremidades, para fins de conexão ao circuito hidráulico. A diferença expressiva consiste no processo de fabricação utilizado para confecção de uma flange na extremidade do tubo, que tem a função de apoio para fixação da anilha dos conectores. A anilha, de ambos os componentes, é feita de aço de baixo carbono, SAE 1008 a SAE 1012, usinada em torno CNC. É responsável por fixar a porca na extremidade do tubo. Na Fig. 4 tem-se a vista em corte de ambos os componentes, o que permite a visualização em detalhes das diferenças mencionadas anteriormente.

Figura 4 - Vista em corte: detalhamento dos conectores conformado (a) e brasado (b).



Fonte: Fornecedor Confidencial (2023)

2.2. Metodologia de solução e de análise

A partir do problema inicial proposto, foram abordados o estudo do problema físico e o estudo do problema experimental, em paralelo. No caso do problema físico foram realizadas verificações de hipóteses de causa raiz para as falhas de campo. Já para o problema experimental, visando agilidade para a sua solução, foram realizados ensaios de tração das amostras de conectores obtidas na Empresa Confidencial. A análise

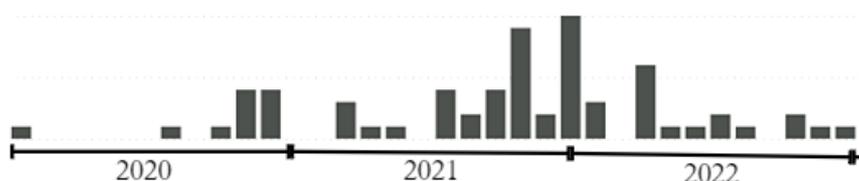
foi construída partindo-se do comparativo entre as informações obtidas por informações de Relatórios Internos de Empresa Confidencial (2023), de Normas Técnicas relacionadas ao problema e de resultados obtidos mediante experimentos realizados em laboratório, a fim de levantar considerações a respeito do desempenho de cada conector, de prováveis causas raiz da falha e das oportunidades de melhoria.

3. CASO DE ESTUDO

3.1. Estudo do problema físico

O estudo do problema físico teve foco na aquisição de informações de eventos ocorridos em campo, a partir de Relatório Interno (Empresa Confidencial,2023) e na verificação de hipóteses das falhas. O campo apresentou a ocorrência de eventos, de mesmo modo de falha, o que sugere a mesma causa raiz. Na Fig. 5, pode-se observar a distribuição desses eventos ocorridos de acordo com o mês de fabricação dos tratores. É importante mencionar que, em virtude do tipo de falha e da aplicação do produto, houve dificuldade em reunir evidências, com peças e fragmentos sendo ocultados pela terra.

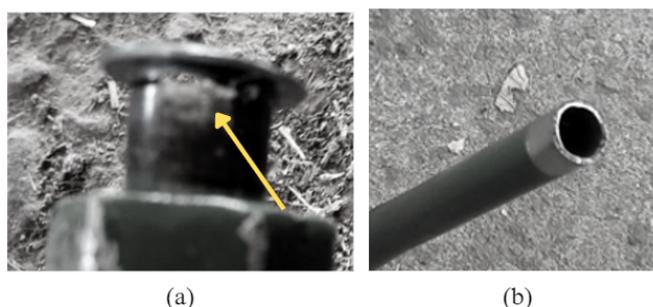
Figura 5 - Distribuição de falhas de campo das linhas hidráulicas por mês de fabricação dos tratores para o período correspondente entre janeiro de 2020 à dezembro de 2022.



Fonte: Empresa Confidencial (2023)

As falhas de campo foram casos de vazamento devido a ruptura parcial ou total, que ocorreram durante o uso do equipamento, como pode ser visto na Fig. 6 (a) a presença de uma trinca localizada na região de dobra para conformação da flange, indicando a ruptura parcial. Já na Fig. 6 (b) tem-se a ruptura total, sendo a marcação no tubo sem tinta o indicativo da posição de acomodação da anilha, o que sugere que a quebra também foi localizada na região próxima da flange.

Figura 6 - Casos de ruptura de tubos em campo: em (a) trinca localizada próxima à região de dobra para conformação da flange e em (b) ruptura total.



Fonte: Empresa Confidencial (2023)

Estas linhas hidráulicas são similares, ambas apresentam a mesma função, mesma aplicação, a mesma espessura de parede, o mesmo material, as mesmas

especificações e o mesmo fabricante. O que as diferem é que cada uma permite geometricamente a instalação de um opcional diferente no trator, que não interfere no fluxo de óleo, na pressão de trabalho e/ou nas condições de montagem dos mesmos.

Ressalta-se a importância da resposta ágil para o problema, tendo em vista que a falha ocasiona a parada total do equipamento, devido ao risco de superaquecimento do trator. Portanto, o tempo de implementação de análise e de melhoria interfere diretamente na disponibilidade do equipamento em pleno funcionamento ao usuário, que normalmente possui janelas fixas de períodos de operação.

3.1.1. Validações do problema físico

a) Material do tubo em conformidade com a Norma DIN EN 10305-1:2016: verificação de conformidade do material com o especificado, através da realização de metalografia no Laboratório de Materiais de Empresa Confidencial.

b) Espessura do tubo em conformidade com a Norma SAE J1065:2022: verificação de conformidade da espessura de parede do tubo com o especificado, relacionando a pressão nominal de trabalho, a resistência à tração mínima e o diâmetro nominal externo, fazendo-se uso das Eq. 1 e 2 sugeridas pela norma.

$$P_T = \frac{P_R}{4} \quad (1)$$

$$P_R = R_{m,min} * \ln\left(\frac{D_e}{D_e - 2t}\right) \quad (2)$$

Sendo, P_T a pressão nominal de trabalho (MPa), P_R a pressão nominal de ruptura (MPa), $R_{m,min}$ a resistência à tração mínima (MPa), D_e o diâmetro nominal externo (mm) e t a espessura do tubo (mm).

c) Condições de montagem: verificação das condições de montagem através da avaliação das orientações de serviço, indicações de torque e outras condições gerais do processo.

d) Método de fabricação do conector: verificação da assertividade da troca de processo de fabricação do conector, através da análise das ocorrências de campo, para o mesmo modo de falha, após implementação da melhoria.

e) Incrementos devido às alterações: verificação dos incrementos de custo, através da cotação de valores referentes às alterações.

3.2. Estudo do problema experimental

Para fins de entendimento e de análise do comportamento do conector do componente, optou-se pela realização de testes destrutivos, por meio de ensaios de tração, realizados a velocidade constante de 10 mm/min, seguindo definições e orientações previstas na Norma ISO 6892-1:2019 (ISO, 2019). Esta abordagem foi utilizada devido a localização da ocorrência de falhas compreender entre a extremidade do tubo e a interface

anilha-tubo. As amostras de conectores foram cortadas e preparadas para os ensaios, como mostrado na Fig. 7.

Figura 7 - Amostras de conectores preparadas para o ensaio de tração.



Fonte: Do autor (2023)

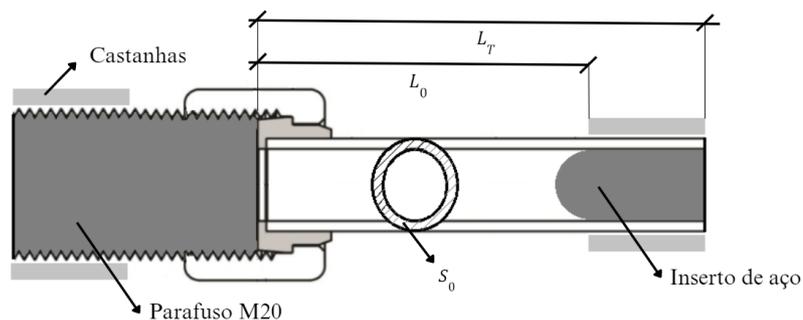
A Norma orienta que as extremidades do corpo de prova sejam ajustadas de modo que garanta a fixação nas castanhas (garras) do equipamento. A fixação está detalhada na Fig.8, sendo que, na extremidade da porca foram utilizados parafusos de aço classe 8.8 DIN 961 M20x1,5x50. Já na outra extremidade, a castanha foi diretamente fixada no tubo. Para fins de evitar a ruptura do tubo devido ao aperto da castanha, foram alocados insertos dentro dos tubos, obtidos a partir da usinagem de parafusos de aço classe 10.9 DIN 961 M12x1,5x55. Foi realizado o abaulamento da aresta, para evitar a concentração de tensão no local que viesse a acarretar na ruptura do tubo. Sendo L_T o comprimento total da amostra, L_0 o comprimento inicial efetivo da amostra e S_0 a área da seção transversal inicial.

De acordo com a Norma, os corpos de prova devem possuir L_0 maior que $\frac{D_0}{4}$, e apresentar um coeficiente de proporcionalidade k , com valor entre 5,65 e 11,3 que pode ser obtido pela Eq. 3.

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (3)$$

Para a realização dos testes, foi utilizado o equipamento Microcomputer Controlled Electronic Universal Testing Machine, modelo WDW-100E da marca Shijin. Equipamento disponível no Laboratório do GMap da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Figura 8 - Detalhamento da fixação dos corpos prova na máquina de tração



Fonte: Do autor (2023)

4. RESULTADOS

4.1. Problema físico

a) Material do tubo em conformidade com a DIN EN 10305-1:2016: segundo resultado encontrado a condição de não-conformidade foi descartada, pois a microestrutura, vista na Fig. 9, caracterizado pela colônia de perlita formada por inclusões de ferrita em cementita, está de acordo com o material especificado em norma para o aço carbono previsto para o projeto.

Figura 9 - Microestrutura do material obtida por análise metalográfica, aumento de 20x e 10x.



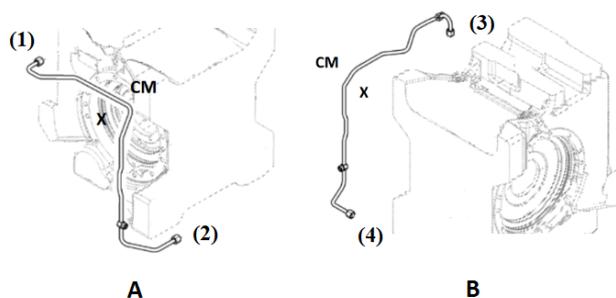
Fonte: Empresa Confidencial (2023)

b) Espessura do tubo em conformidade com a SAE J1065:2022: fazendo uso das Eq. 2 e 3, e dados da Tabela 1, obteve-se o resultado para a espessura da parede do tubo de 1,08 mm. Sendo a pressão nominal de trabalho de 180 bar, equivalente a 18 MPa, e a resistência à tração do material entre 360 e 480 MPa, visto na seção 2.1. e, o diâmetro nominal externo de 12 mm. De acordo com as tabelas fornecidas pela referida Norma, um tubo de D_0 igual a 12 mm, e considerando um material com mínima resistência à tração de 310 MPa e espessura de 1,5 mm, suporta 22 MPa de pressão de trabalho. Já um tubo em material com mínima resistência à tração de 415 MPa e espessura de 1,0 mm suporta 19 MPa. O tubo do componente apresenta espessura de parede de 1,0 mm. Desta forma, a espessura também se apresenta em conformidade com a Norma.

c) Condições de montagem do componente: os tubos A e B são montados de maneira análoga, possuindo as mesmas orientações de montagem, com as mesmas indicações de aproximação/alocação da peça no conjunto, e com mesma indicação de torque, de 50 Nm +/- 10 Nm. O torque é aferido fazendo-se uso de um torquímetro de cliques com torque pré-definido, modelo STLC FM 2.4 GHz, da marca Sturtevant Richmond. A montagem de ambos é realizada na mesma linha de montagem e no mesmo posto, o que elimina a influência de variações devido ao trabalho manual humano nas condições da montagem final.

Foi verificado que ambas as linhas hidráulicas apresentam apenas dois pontos de fixação na montagem, coincidentes com seus respectivos conectores. Sendo a fixação superior nos conectores (1) e (3) e a fixação inferior nos conectores (2) e (4), conforme Fig. 10. Isso sugere uma condição de montagem em balanço, o que pode ocasionar uma concentração excessiva de tensões justamente nos conectores (2) e (4) que apresentam as falhas.

Figura 10 - Esboço de posicionamento de montagem.

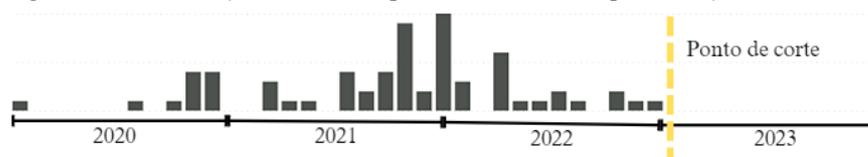


Fonte: Do autor (2023)

A partir da hipótese de concentração excessiva de tensões em virtude do processo atual de montagem, foram consideradas alterações no modo de fixação e na ordem de montagem. De forma a eliminar a sobrecarga nos conectores, sugere-se o uso de componentes adicionais, um suporte e abraçadeiras. Nessa nova configuração de montagem, inicialmente deve-se realizar a instalação e o aperto do suporte de fixação. Posteriormente deve-se instalar o tubo, realizando o apontamento dos conectores, mas ainda sem aplicação do torque final. Então, deve-se realizar a instalação e o aperto das abraçadeiras, e por fim, realizar o torque indicado para os conectores de conexão do tubo. Esse processo de montagem evitaria que a linha de óleo fosse tensionada devido ao aperto dos elementos de fixação.

d) Método de fabricação do conector: de acordo com o gráfico de distribuição de falhas apresentado na Fig. 11, pode-se notar que a ocorrência de falhas está concentrada no período anterior ao ponto de corte da implementação da melhoria.

Figura 11 - Distribuição de falhas e ponto de corte da implementação da melhoria



Fonte: Empresa Confidencial (2023)

O fato de não existirem falhas para tratores produzidos nos meses posteriores à implementação da troca do processo de fabricação do conector indica que a melhoria foi assertiva e tem apresentado ótimo resultado no campo. O esperado é que o conector conformado a frio suportasse maiores solicitações de tensão, devido ao encruamento que a região sofre para a conformação da flange. Porém a hipótese levantada é de que a área de interface tubo - anilha não é o suficiente para suportar os esforços da montagem. Ao alterar para o processo de brasagem, a área da interface é consideravelmente maior, visto que compreende toda a área da parede interna da anilha, que é preenchida de maneira uniforme, com garantia devido à capilaridade, pela liga metálica de adição na junta de união.

e) Incrementos devido às alterações consideradas: toda alteração a ser implementada não acarretará apenas em melhorias, mas, também causará efeitos não desejáveis, principalmente o incremento de custo e de tempo de montagem. Para fins de determinação

da melhor alteração, em termos de acréscimo de custo ao produto final, se faz necessário comparar os acréscimos de custo da melhoria em relação aos custos das falhas por máquina em campo, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparativo de incrementos de custos

Análise de custos	
Custo médio / máquina - falhas de campo	11,6% do custo do componente atual
Custo médio / máquina - alteração de processo de fabricação do conector	↑ 12% do custo do componente atual
Custo médio / máquina - alteração de fixação do componente	↑ 120% do custo do componente atual

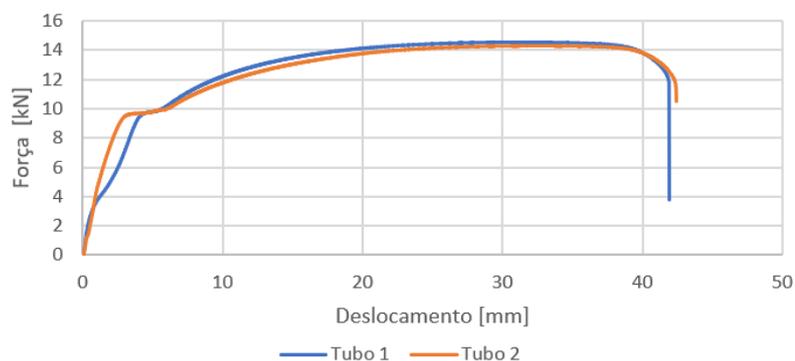
Fonte: Do autor (2023)

Os dados mencionados na Tabela 2 foram obtidos a partir de Relatório Interno (Empresa Confidencial, 2023). A cotação do custo de alteração de fixação do componente foi realizada a partir da listagem de peças comumente utilizadas para fixação de tubos hidráulicos, como: chapa suporte, abraçadeiras, pinos prisioneiros e porcas.

4.2. Problema experimental

As amostras foram cortadas apresentando L_T de aproximadamente 50 mm, L_0 de aproximadamente 40 mm e com seção transversal de área nominal s_0 de 34,56 mm². Deste modo a constante de proporcionalidade é de 6,8, validando os corpos de prova utilizados nos testes, segundo a Norma ISO 6892-1:2019 (ISO, 2019). A primeira rodada de ensaios teve por objetivo a verificação experimental da força de ruptura do tubo, Fig. 12, onde duas amostras (seções do tubo), de L_T de aproximadamente 100 mm, foram submetidas ao ensaio. Em seguida, foi determinada a curva tensão x deformação do material do tubo, Fig. 13. Por fim, foram realizados ensaios destrutivos para avaliação dos conectores fabricados por conformação à frio e por brasagem, sendo os resultados obtidos apresentados nos gráficos das Figuras 12 à 17 e nas Tabelas 3 à 5.

Figura 12 - Curva Força [kN] x Deslocamento [mm]: resultados obtidos para as amostras do tubo.



Fonte: Do autor (2023)

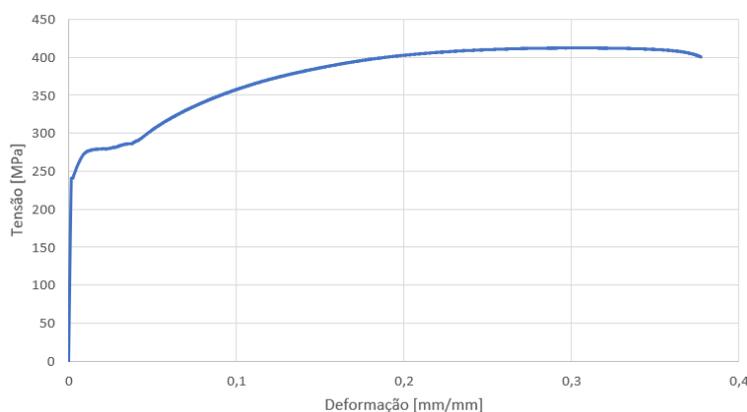
Segundo os resultados obtidos, as curvas se mostraram similares, com pequena diferença nos instantes iniciais do teste, que pode estar relacionado ao ajuste físico entre a amostra e as garras de fixação do equipamento.

Tabela 3 - Resultados obtidos para força máxima em amostras do tubo.

Amostra	Força máxima [kN]	Média
Tubo 1	14,54	14,40±0,20
Tubo 2	14,26	

Fonte: Do autor (2023)

Figura 13 - Tensão [MPa] x Deformação [mm/mm]: curva de escoamento do tubo.



Fonte: Do autor (2023)

Da curva mostrada na Fig. 13, pode-se observar pontos característicos do material, como a máxima tensão à tração, a tensão de escoamento e a tensão de ruptura. A curva se apresentou em um perfil bastante comum para materiais dúcteis, conforme o esperado, com escoamento em torno de 245 MPa, próximo do valor previsto para o material, de 235 MPa, observado para deformação de 0,002 [mm/mm]. O valor de tensão máxima encontrado, 415 MPa, está dentro da faixa prevista para o material, visto na Tabela 1 da seção 2.1, que varia entre 360 e 480 MPa.

Para os conectores, foram testadas 8 amostras, sendo 5 de conectores conformados e 3 de conectores brasados. Em todos os casos, a ruptura se deu ao longo do tubo, devido ao colapso pelo escoamento do material. Na Fig. 14 tem-se as amostras #2, #3 e #4, ambas conformadas, sendo testadas. Nos ensaios não foram medidos valores de deformação, pois a pretensão é de comparar as forças de ruptura dos conectores e com a força de ruptura do tubo.

Vale ressaltar que nenhuma das amostras com conector conformado apresentou a ruptura vista nas falhas de campo, caracterizada pela quebra do componente na região de dobra, com degola da flange. Da mesma forma, nenhuma das amostras com conectores brasados apresentou ruptura na região da solda, o que ocasionaria na separação da anilha do conector.

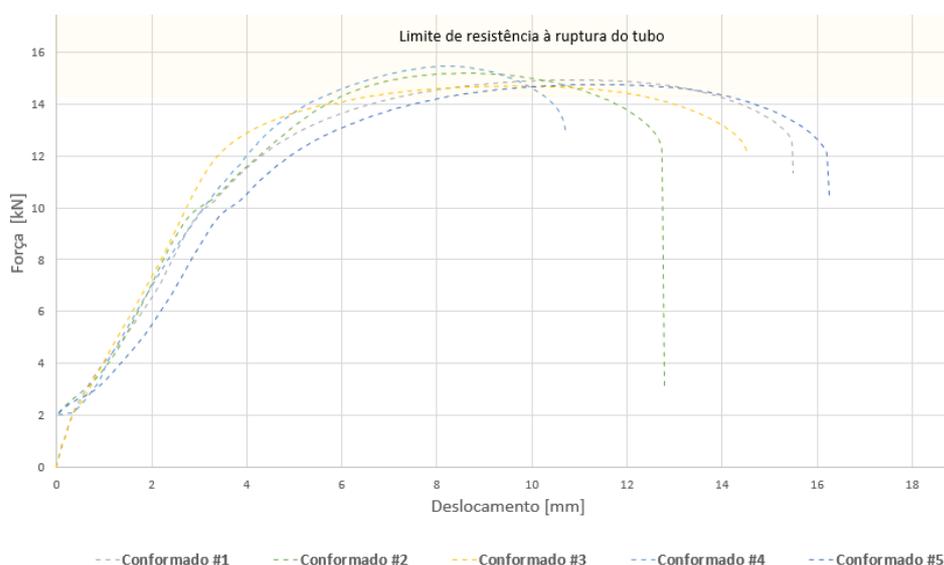
Figura 14 - Amostras #2, #3 e #4, com conectores conformados, sendo testadas.



Fonte: Do autor (2023)

O que se observou foi a ruptura por escoamento do tubo, com alguma variação de posição ao longo do eixo axial do tubo, como é possível notar na Fig. 14, em que a ruptura da amostra #2 é localizada na parte central da amostra, enquanto que na amostra #3 é mais próxima da extremidade do conector. Os resultados obtidos para as amostras de conectores são mostrados nas Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17 e na Tabela 4 são apresentados valores máximos e médios de força de ruptura para os ensaios realizados.

Figura 15 - Curva Força [kN] x Deslocamento [mm]: resultados obtidos para as amostras de conectores conformados.



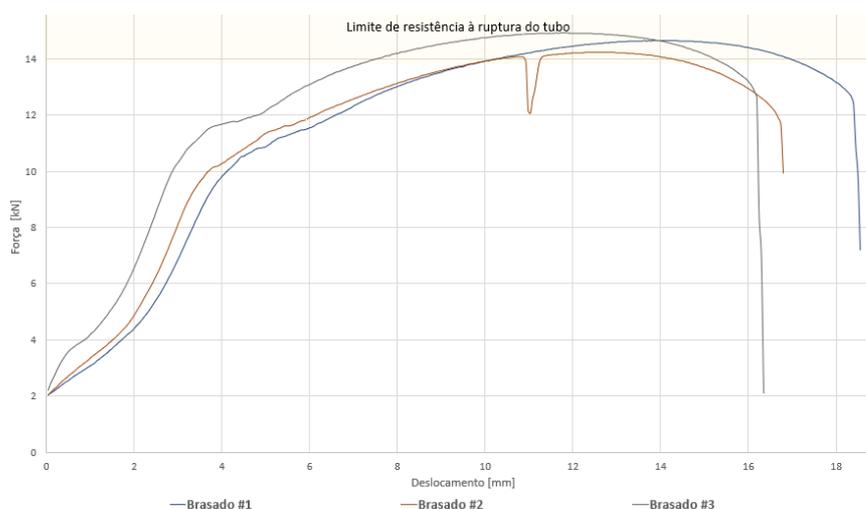
Fonte: Do autor (2023)

Para as amostras de conectores conformados, Fig. 15, os resultados obtidos para a força de ruptura foram ligeiramente superiores à da força máxima de ruptura obtida para o tubo, com valores variando entre 14,68 kN e 15,56 kN, sendo o valor médio de 15,00 kN. Entre as amostras de conectores conformados foi observada considerável variação no deslocamento. A amostra do conector conformado #5, suportou o menor deslocamento, de 10,73 mm, enquanto a amostra do conector conformado #1, suportou o maior, de 16,24 mm.

Para as amostras de conectores brasados, como pode ser visto na Fig. 16, os resultados obtidos para a força de ruptura próximos dos encontrados para os tubos, com valores variando entre 14,24 kN e 14,94 kN, sendo o valor médio de 14,61 kN. Em termos de deslocamento, os valores foram bastante superiores aos encontrados para os conectores

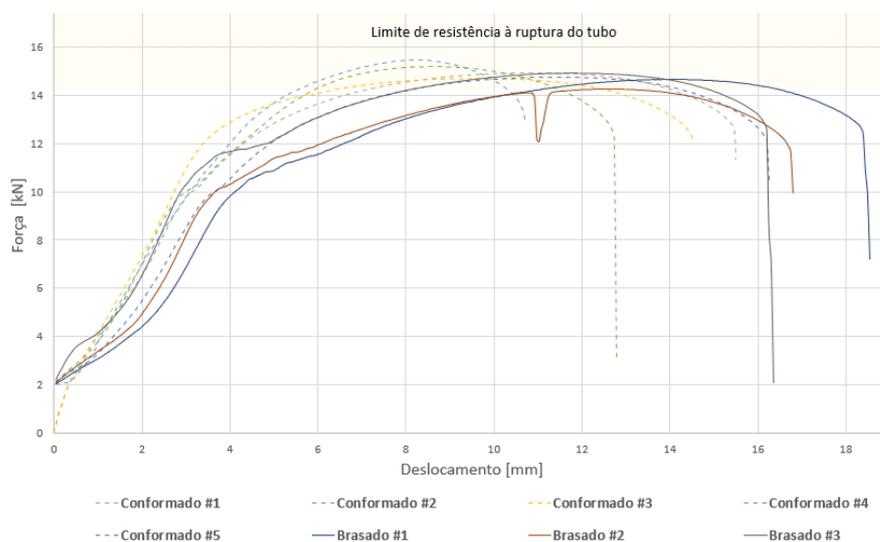
conformados. A amostra do conector brasado #3, suportou 16,35 mm, enquanto a amostra do conector brasado #1, suportou 18,55 mm. A amostra do conector brasado #2, apresentou uma queda brusca na força de ruptura, atingindo 12,06 kN para um deslocamento de 11,03 mm. Esse comportamento não foi observado em nenhuma outra amostra, conforme pode ser visto na Fig. 17, e pode estar relacionado a um escorregamento do corpo de prova em relação às garras de fixação do equipamento. Importante mencionar que a análise de conectores brasados resultou em apenas 3 amostras válidas, visto que outras 2 foram comprometidas devido problemas de fixação entre amostra e garras de fixação da máquina de ensaios.

Figura 16 - Curva Força [kN] x Deslocamento [mm]: resultados obtidos para as amostras de conectores brasados.



Fonte: Do autor (2023)

Figura 17 - Curva Força [kN] x Deslocamento [mm]: resultados obtidos para as amostras de conectores testadas.



Fonte: Do autor (2023)

Tabela 4 - Resultados obtidos para força máxima em amostras de conectores.

Amostra conector	Força máxima [kN]	Média
Conformado #1	14,74	15,00±0,33
Conformado #2	14,92	
Conformado #3	15,20	
Conformado #4	14,68	
Conformado #5	15,46	
Brasado #1	14,66	14,61±0,35
Brasado #2	14,24	
Brasado #3	14,94	

Fonte: Do autor (2023)

Em termos de força máxima de ruptura, quando comparados os resultados encontrados para os tubos e para os conectores, os valores foram bastante próximos, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise comparativa dos resultados obtidos.

Tipo de amostra	Força máxima média [kN]
Tubo	14,40±0,20
Conector Conformado	15,00±0,20
Conector Brasado	14,61±0,20

Fonte: Do autor (2023)

Como pode ser visto, todos os conectores apresentaram valor para forças de ruptura na zona de força de ruptura do próprio tubo. Isso indica que tanto a configuração de conector com flange conformada a frio, quanto a configuração de conector com anilha fixada por brasagem ao tubo, não oferecem ponto de fragilidade ao conjunto. De fato, sendo a montagem submetida a esforços de tração, o esperado é que a ruptura se daria no tubo, devido ao escoamento e estrição do mesmo. Este resultado complementa a hipótese levantada para causa raiz devido à montagem sob tensão, validando que os esforços responsáveis pela falha não são de natureza normal ou axial.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de conectores de tubos metálicos do sistema hidráulico de um trator agrícola. Para isso foram considerados os resultados obtidos a partir de verificações tanto do problema físico, quanto do problema experimental.

O estudo do problema experimental permitiu analisar comparativamente o desempenho dos tubos, com conectores conformados e brasados, submetidos a esforços de tração. Como parte da validação, a curva de escoamento do material, obtida experimentalmente, comprova que o tubo apresentou características de escoamento similares às do material especificado, com resistência a tração entre 360 MPa e 480 MPa. A sequência de verificações se deu a partir de comparações entre as forças de ruptura dos conectores e do tubo. Os tubos suportaram uma força máxima média de 14,40 kN, enquanto os conectores conformados suportaram 15,00 kN e, os brasados, 14,61 kN. Foi verificado que ambos os conectores suportaram força máxima dentro da zona limite de ruptura do tubo. Portanto, para o ensaio de tração tanto a região de dobra para a conformação da flange, quanto a região de brasagem não oferecem pontos de fragilidade para o componente, tendo em vista que a ruptura ocorreu devido ao escoamento e à estricção do tubo, dentro da zona limite que o material é capaz de suportar.

O estudo do caso físico permitiu concluir que o material está de acordo com as normas técnicas previstas em projeto, tanto para a especificação do material, quanto para o dimensionamento da espessura de parede dos tubos. Outra verificação foi realizada, no que diz respeito às condições de montagem do conjunto. Foi considerada a análise dos pontos de fixação e da condição na qual o componente é montado, sustenta como hipótese principal para a causa raiz da falha a condição de montagem em balanço. Essa condição sobrecarrega os conectores que fazem a conexão com a carcaça da caixa de tração, ocasionando o acúmulo de tensões, do qual o conector não se mostra capaz de suportar. Para essa principal hipótese levantada, são consideradas duas melhorias possíveis: a troca do processo de fabricação, de conformado a frio para brasado ou a alteração na montagem do componente. A segunda opção se mostra inviável, segundo a análise de custos apresentada, visto que a melhoria implicaria na alteração completa da fixação, em que seriam adicionados elementos como abraçadeiras e suportes, que tornaram a melhoria economicamente inviável, devido ao custo ser mais do que o dobro gasto atualmente.

Desta forma, sendo considerados todos os resultados obtidos, entende-se que a alteração do processo de fabricação se mostra como a melhoria mais adequada para o caso estudado, visto que se mostra economicamente viável, com acréscimo de custo equiparável ao custo atual com falhas de campo, além de ser efetiva devido ao aumento de área de interface tubo/anilha capaz de suportar à condição de montagem tensionada. Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam realizados outros tipos de ensaios destrutivos, capazes de simular condições de trabalho próximas das reais do componente, que consigam por exemplo, simular a fadiga devido à vibração do trator. E que nesses casos, sejam consideradas as possibilidades de testar alterações de condições de montagem e de fixação para fins de validação experimental de hipóteses verificadas para o problema físico neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação - ABNT NBR 14724 2011**, 2011.

BTL Steel Works. **Trefilados de Precisão**. Disponível em: <<https://www.btlsteelworks.com/trefilados-de-precisao-br/>> Acesso em: 15 de janeiro de 2023.

CARPANEZZI, L.; LEARDINI, O.; SILVA, C. G. C.; ZANARDI, R. **História e evolução da mecanização**. FAEF. São Paulo, 2016.

COSTA, H. B.; MIRA, F. M.: **Processos de fabricação: conformação mecânica de metais**. Laboratório de Conformação Mecânica. Universidades Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 1985.

DIN EN 10305-1: **Steel tubes for precision applications - Technical delivery conditions. Part 1: Seamless cold drawn tubes**. European Committee for Standardization, August, 2016.

EMPRESA CONFIDENCIAL. **Relatório de Fornecedor**. Porto Alegre, 2022.

EMPRESA CONFIDENCIAL. **Relatório Interno**. Porto Alegre, 2023.

GROOVER, M. P.: **Introdução aos processos de fabricação**. Grupo Editorial Nacional. LTC: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Rio de Janeiro, 2014.

ISO 6892-1:2019: **Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature**. International Standard. Third Edition, 2019.

ISO 10448:2021. **Agricultural tractors - Hydraulic pressure for implements**. International Standard. Second Edition, 2021.

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. 1 ed. Porto Alegre: UFRGS, 1996.

MÁRQUEZ, L.: **Tractores agrícolas: tecnología y utilización**. Editora B&H Editores. Espanha, 2012.

SAE J1065:2022. **Nominal reference working pressures for steel hydraulic tubing**. SAE Internacional, 2022.

VARELLA, C. A. A.: **Introdução ao estudo dos tratores agrícolas**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

YIN, R. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZAZYCKI, E. A.; SOUZA, V. P.; LAMPERT, V. R.; DALCIN, R. L.: **União de tubos hidráulicos de alta pressão por brasagem: estudo de caso.** Faculdade Horizontina, Horizontina, Brasil, 2017.