

ANÁLISE DE FALHA DE UM EIXO VIRABREQUIM: PROPOSTA DE MELHORIA DE PROJETO

Natália Fernanda Santos Pereira, natsantos23@gmail.com¹

Samuel Almeida Pimenta, pimentasky@gmail.com¹

Anderson Júnior dos Santos, ndersonsantos@hotmail.com¹

Bárbara Cristina Mendanha Reis, babi_mreis@hotmail.com

Juan Carlos Campos Rubio, juan@ufmg.br¹

Augusto Moura Martins, augusto.mmartins2@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte (MG)

Resumo: O presente estudo visa detectar as principais causas da ocorrência de falha no eixo virabrequim de um pulverizador estacionário. Os virabrequins são peças robustas, superdimensionadas, constituídas de aço ou ferro fundido e mesmo assim ocorrem muitos casos de falhas nestes componentes. Foram levantadas as hipóteses para as possíveis falhas do eixo virabrequim e realizado levantamento de dados por meio de ensaios mecânicos, metalográficos, dureza, análises visual e química, com o objetivo de detectar as possíveis causas que levaram à ruptura. Por meio da análise dos dados, verificou-se divergências na composição química do material. Realizou-se o cálculo da tensão de cisalhamento após o dimensionamento do eixo na seção de ruptura e por meio desse cálculo e da análise dos dados coletados verificou-se a necessidade de alteração do projeto do eixo virabrequim. Outro fator levantado foi à falta de raios de concordância e a presença de carbonetos na estrutura que poderia acumular tensões e auxiliar na fratura do eixo. Foi proposto uma alteração no diâmetro dos munhões e aumento do raio de concordância nas cambotas do eixo, na qual a tensão de cisalhamento passaria de 8.334 para 371 Mpa, permitindo um maior equilíbrio de forças e evitando futuras rupturas para esse eixo.

Palavras-chave: Virabrequim, falha, projeto, materiais

1. INTRODUÇÃO

Virabrequins são componentes que transformam o movimento de translação dos cilindros de um motor de combustão interna. Muitos casos de falhas nestes eixos têm sido verificados apesar de ser um componente superdimensionado em termos de cargas estáticas. Uma causa comum de falha é a ruptura por fadiga. Em serviço é comum à ocorrência de trincas nucleadas por fadiga junto a regiões de alta concentração de tensões, como, por exemplo, nos filetes de rosca, raios de concordância, furos ou demais mudanças de seção que servem como concentradores de tensões. Sabe-se que problemas oriundos da própria fabricação, tensões residuais, tensões de montagem, entre outros fatores são responsáveis pela nucleação de trincas por fadiga o que leva o componente ao colapso (MORAES et al., 2006). As principais partes do virabrequim estão apresentadas na Fig. 1.

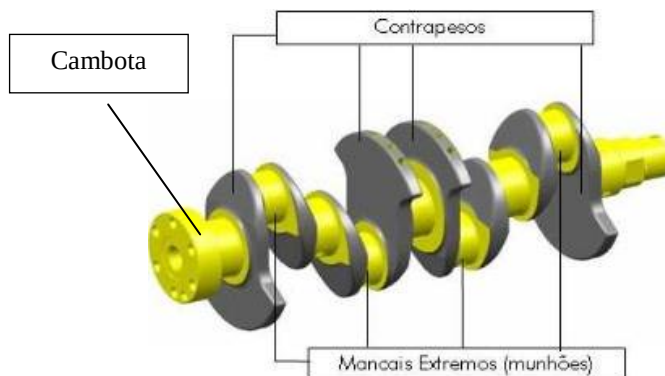


Figura 1: Partes de um virabrequim

Em muitas situações, a falha de um determinado material ocorre de modo brusco e inesperado, sendo necessário um levantamento das causas que podem estar relacionadas as propriedades mecânicas dos materiais ou o seu modo de aplicação e funcionamento.

O eixo virabrequim estudado neste caso é uma peça presente no pulverizador estacionário, Fig. 2 (modelo S40 do fornecedor X). Os pulverizadores estacionários são equipamentos de alta versatilidade, que atendem à todos os requisitos em aplicação de defensivos agrícolas. Podem ser acionados por motores elétricos, a diesel ou a gasolina. A peça em estudo apresentava três meses de uso e conforme informações da empresa usuária, o eixo trabalhou por vinte e quatro horas com o nível de lubrificação abaixo do especificado.



Figura 2: Pulverizador estacionário modelo S40

Nesse sentido, buscou-se identificar as possíveis causas que levaram a ruptura do eixo virabrequim e proposto melhorias de projeto para evitar futuras falhas, sendo por meio de ensaios mecânicos, metalográficos, dureza, análises visual e química. Realizaram-se os cálculos da tensão de cisalhamento após o dimensionamento do eixo na seção de ruptura e por meio desse cálculo e da análise dos dados coletados, verificou-se a necessidade de alteração do projeto do eixo virabrequim.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios realizados para levantamentos dos dados e identificação das possíveis falhas foram: análises visuais e registro fotográfico, análises químicas e metalográficas, análise da dureza e ensaio de tração. Posteriormente foi realizado o cálculo da tensão de cisalhamento após o dimensionamento do eixo. A metodologia utilizada para levantamento das possíveis causas para as falhas apresentadas foram o *Brainstorming*. De acordo com Montgomery (2016) o *Brainstorming* é popular e eficaz quando há necessidade de se obter respostas rápidas que envolvam questões relativamente simples, bem como a identificação de causas e soluções de problemas mais complexos. As possíveis hipóteses levantadas foram:

- material informado pelo fornecedor em desacordo com o fabricado;
- possibilidade de microrechupe, porosidade ou inclusões advinda do processo de fundição do eixo virabrequim;
- falta de raio de concordância nas cambotas do eixo;
- falha operacional (a peça trabalhou com nível de óleo de lubrificação abaixo do especificado).

Para o ensaio de dureza, utilizou-se um durômetro de bancada marca VEB, com diâmetro da esfera de 2,5 mm e carga de 62,5 kgf, do Instituto Politécnico da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (IPUC).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise Visual

A imagem da Figura 3 detalha a região do eixo virabrequim onde ocorreu a fratura e a imagem das Figuras 4 e 5 apresentam a seção da fratura, destacando a origem da fratura e a região da fratura final. A análise visual da seção rompida indicou que a fratura não ocorreu por fadiga, evidenciada pela ausência de marcas de praia.



Figura 3: Seção de rompimento do virabrequim. (O autor, 2017)



Figura 4: Imagem da região da fratura. (O autor, 2017)



Figura 5: Imagem da região da fratura (O autor, 2017)

3.2. Análise Química

O eixo foi submetido a análises químicas por espectrometria óptica em equipamentos de dois laboratórios distintos. Segundo informações do fabricante, o material corresponde ao eixo virabrequim seria um Aço inox 304, como detalhado na Tabela 1.

Tabela 1: Especificação Composição Química Aço Inox – 304 (Norma AISI 304)

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Cr%
0,08	1,00	2,00	0,04	0,03	8,00	18,00

Fonte: Norma AISI 304

Porém ao analisar a composição química do eixo virabrequim, na qual foi realizada em dois lugares diferentes, nota-se a presença do elemento magnésio (Mg) e o alto teor de silício (Si) indicando que o material não se tratava de um aço e sim provavelmente de um ferro fundido nodular. Pelo fato da amostra ter sido retirada da própria peça, o teor de carbono pode apresentar variação, pois para melhor caracterização da análise química de um material seria necessário avaliar por meio de uma amostra coquilhada.

Tabela 1 - Composição química do eixo virabrequim (Relatório de Ensaio no 6579/2010 (SENAI/CETEF))

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Mg%
3,53	3,09	0,59	0,06	0,03	0,039

3.3. Análise Metalográfica

Realizou-se a análise metalográfica com o objetivo de identificar alterações na microestrutura do material e verificar se o material do eixo realmente se tratava de um ferro fundido nodular.

Os resultados encontrados estão detalhados na Tabela 3 e na Figura 6, na qual apresenta a metalografia do ferro fundido nodular e a identificação da região com carbonetos presente nos contornos das células eutéticas, conforme detalhado nos círculos vermelhos. A presença de carbonetos de acordo com Rosário e Souza (2006) apresentam uma combinação de dureza elevada e pouca capacidade de suportar altas tensões de cisalhamento.

Tabela 3 - Características metalográficas

Matriz			Grafita			
Perlita (%)	Ferrita (%)	Carbonetos (%)	Nodularização (%)	Nódulos (p/mm ²)	Forma	Tamanho
60	40	1	92	180	I e II	6,7,8

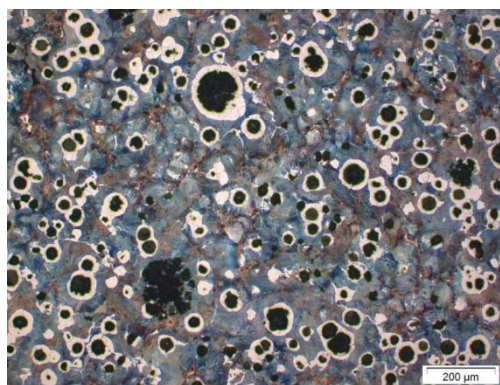


Figura 6. Metalografia do ferro fundido nodular (O autor, 2017)

Segundo Callister Jr. (2008) a adição de uma pequena quantidade de magnésio e/ou cério ao ferro fundido cinzento antes da fundição produz uma microestrutura e um conjunto de propriedades bastante diferentes. De acordo com (Chiaverini, 2012) grafita do ferro fundido nodular apresenta-se na forma esferoidal, a qual não interrompe a continuidade da matriz tanto quanto a grafita em veio, resultando em melhor ductilidade e tenacidade.

Conforme análise metalográfica, comprova-se que o material do eixo virabrequim seria um ferro fundido nodular com uma matriz perlítica e que o material informado pelo fornecedor não condiz com o Aço Inoxidável classe 304.

3.4. Ensaio Mecânico

Foi retirado um corpo de prova do eixo e o mesmo foi submetido a um ensaio de tração, segundo a norma ABNT-NBR-ISO 6892/2002, conforme detalhado na Tabela 3. Conforme indicado na Tab. 4 as propriedades mecânicas desse material pode ser classificado conforme a classe FE 66003, segundo a norma ABNT NBR 6916/1981 conforme especificado na Tab. 5.

Tabela 4 - Resultados obtidos após ensaio de tração (Relatório de Ensaio no 6578/2010 (SENAI/CETEF))

Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento %
619	486	1,9

Tabela 5 - Classificação do ferro fundido nodular, segundo ABNT 6916/1981 (Chiaverini, 2012)

Propriedades Mecânicas do Ferro Fundido Nodular - Norma ABNT NBR 6916/1981					
Classe	Limite mínimo de Resistência à tração - LR MPa	Limite mínimo de Escoamento (0,2%) - LE MPa	Alongamento mínimo em 5d - A %	Faixa Aproximada da dureza Brinell	Estrutura Metalográfica predominante
FE 38017	380	240	17	140-180	Ferrítica
FE 42012	420	280	12	150-200	Ferrítica-Perlítica
FE 50007	500	350	7	170-240	Perlítica-Ferrítica
FE 60003	600	400	3	210-280	Perlítica
FE 70002	700	450	2	230-300	Perlítica
FE 80002	800	550	2	240-312	Perlítica
FE 38017- RI *	380	240	17	140-180	Perlítica

* Classe com requisitos de impacto

3.5. Ensaio de Dureza

Realizou-se o ensaio de dureza Brinell (HB) conforme indicado na Fig. 7 que apresentou valores médios de 235 HB ± 5 . Conforme a norma ABNT 6916/1981, os valores de dureza apresentam dentro da faixa indicada para a classe FE 66003, sendo de 210-280.



Figura 7. Região onde realizou a medição da dureza. (O autor, 2017)

3.6. Diagrama de corpo livre

O cálculo da tensão de cisalhamento foi realizado para o eixo virabrequim após o seu dimensionamento, conforme detalhado na Fig. 8. A região da fratura ocorreu no diâmetro de 24,85 mm.

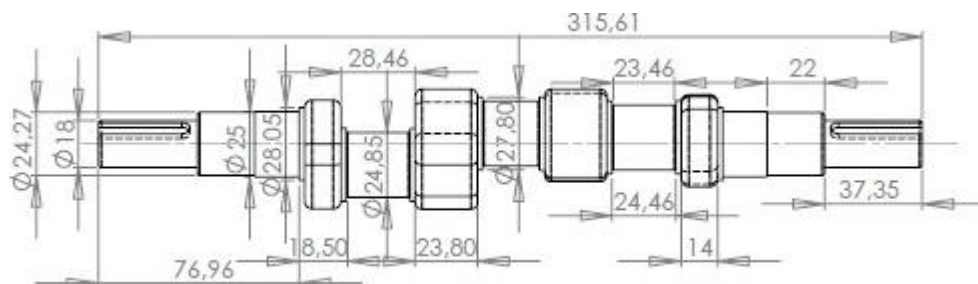
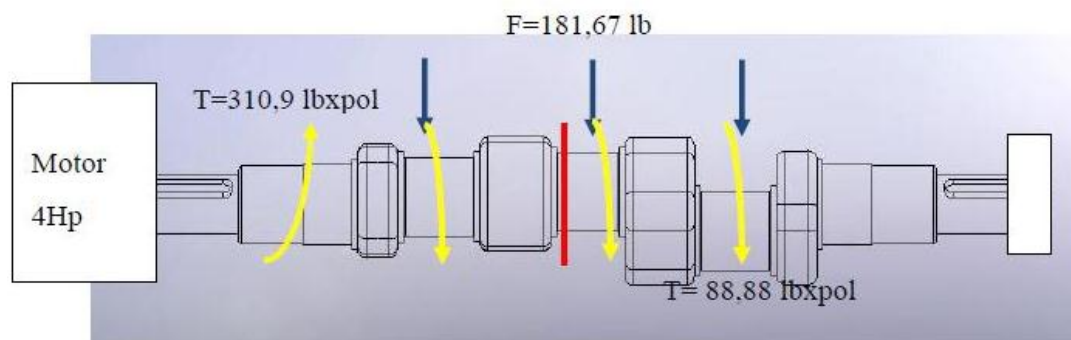


Figura 8. Dimensões do eixo virabrequim (O autor, 2017)

A Tabela 8 detalha a especificação do equipamento, na qual fornece a pressão exercida no pistão gerada pela potência do motor. Características como potência e rotação serão utilizadas para cálculo do torque do motor. E na Figura 9 apresenta o diagrama de corpo livre para o eixo virabrequim.

Tabela 2- Especificações do motor

Especificações Técnicas							
Modelo	S-12	S-25	S-40	S-80	SU	S-60	MS-7
Capacidade (l/min)	12	25	40	80	25	40~60	6
Pressão (lb/pol)	0~500	0~500	0~500	0~500	0~500	0~500	0~150
Potencia Requerida (HP)	1,0~1,5	2,5~3,0	3,5~4,0	7,0~8,0	2,5~3,0	4,0~6,0	-
Rotação (RPM)	800	800	800	800	800	400~600	-
Polia	7" x 1A	9" x 2A	9" x 2A	10" x 2B	9" x 2A	-	-
Registro de Saida	3/8 x 1	3/8 x 2	1/2 x 2	1/2 x 2	3/8 x 2	1/2 x 2	-
Peso Liquido (Kg)	8,7	13,8	23,0	33,0	25,8	34,4	12,2



— Torque — Local de ruptura — Observação: A força 181,67 lb e o torque de 88,88 lb x pol, é igual para os três munhões.

Figura 9: Diagrama de corpo livre (O autor, 2017)

3.7. Cálculos

Os cálculos para a tensão de cisalhamento no ponto de ruptura estão detalhados no Quadro 1. Observa que o tensão de cisalhamento apresentou valores de 8334,20 MPa.

Quadro 1- Cálculo dos esforços

Cálculo da Força exercida no Pistão: Pressão exercida no pistão = 500 lb x pol² Área do pistão 1,09 pol² Pressão = $\frac{\text{Força}}{\text{Área}}$ Força = 500 lb/pol² x 1,09 pol² Força = 545 lb A Força de 545 lb encontrada está sendo exercida nos 3 munhões. Portanto a força em cada munhão é de 181,67 lb. Torque em cada munhão: Torque = Força x Raio Torque = 181,67 lb x 0,49 pol = 88,88 lb.pol	Cálculo do torque exercido pelo motor: Motor = 4 hp / 1hp = 735 W (N.m/s) Potência = 2942 N.m/s 800 RPM / 60seg Frequência (f) = 13,33 segundo Potência = Torque x 2.π.f Torque = $\frac{2942 \text{ N.m/s}}{2\pi \cdot 13,33\text{s}}$ Torque = 35,12 N.m / 1 N.m = 8.85074579 lb.in Convertendo temos 310,90 lb.pol
--	---

Quadro 2- Cálculo da tensão de cisalhamento no ponto de ruptura

Cálculo da tensão de cisalhamento no ponto de ruptura:	
$\varnothing = 24,85 \text{ mm}$ $1_{\text{pol.}} = 25,4 \text{ mm}$ $24,85 \text{ mm} = 0,978 \text{ pol.}$ Tensão Cisalhamento = $\frac{\text{Torque} \times \text{Raio}}{J}$ Somatório dos Torque representados diagrama de equilíbrio: Torque = 310,09 lb.pol - 88,88 lb.pol Torque = 222,02 lb.pol Tensão Cisalhamento = $\frac{222,02 \text{ lb.pol} \times 0,49}{0,09 \text{ pol}^4}$ Tensão Cisalhamento = 1208,77 lb.pol ² 1 MPa = 1 N/mm ² = 1,45 x 10 Erro! Fonte de referência não encontrada. lb/in ² Tensão Cisalhamento = 8334,20 MPa	Calculando J é o momento polar de inércia: $J = \frac{\pi \cdot R^4}{2}$ $J = \frac{\pi \cdot 0,49^4}{2}$ $J = 0,09 \text{ pol}^4$

3.8. Proposta de melhoria do projeto

As principais alterações sugeridas para melhoria do projeto do eixo virabrequim:

- aumento diâmetro dos munhões em 29%, região onde ocorreu à ruptura;
- aumento do diâmetro do pistão e camisa do pistão em 33%, região que faz contra pressão em relação movimento do motor.

Após simulação incluindo as principais alterações sugeridas, a tensão de cisalhamento passaria de 8.334 para 371 Mpa conforme identificado na Tabela 9.

Tabela 9- Simulação das variáveis que influência o resultado do cálculo cisalhamento

Diâmetro (Ref.24,85)	35	mm	1,38	in
Raio	17,5	mm	0,69	in
Pressão Exercida Pistão	500	lb.in		
Diâmetro Pistão (Ref.29,92)	45	mm		
Diâmetro Pistão	1,77	in		
Área do Pistão (A=π.r²)	2,47	in²		
Pressão = Força / Área				
Força no sistema	1233	lb		
Força em cada Munhão (÷3)	410,86	lb		
Calcular Torque em cada Munhão (T= FxR)				
Torque em cada Munhão	283,07	lb.in		
Calcular Tensão de Cisalhamento				
Tenção Cisalhamento = $\frac{T \times R}{J}$				
Tensão Cisalhamento	53,90	lb.in²		
1 MPa = 1 N/mm² = 1,45 x 10 ⁻¹ lb/in²				
Tensão Cisalhamento	371,70	MPa		

Potência do Motor (Ref. 4)	4	hp
Conversão Watts Motor 1hp = 735 W (N.m/s)	2940	N.m/s
RPM do Motor	800	RPM
Transforma em frequência	13,33	f
Potência = T . 2 . π . f		
Torque do Motor	35,11	N.m
Torque do Motor 1N.m= 8.85074579 lb.in	310,76	lb.in
Calcular Torque no Sistema "Método das Seções" Torque do Munhão em relação Motor sentido de forças Contrárias		
Torque na Seção	27,69	lb.in
$J = \frac{\pi.R^4}{2}$		
J = Momento de inércia polar da área da seção transversal	0,35	in⁴

Baseado nas possíveis hipóteses levantadas, o material informado estava em desacordo com o indicado pelo fornecedor, dessa forma acredita-se que independentemente de qual seja o material, a causa para a falha do virabrequim não estaria associada propriamente ao tipo de material e sim vinculada a outras hipóteses levantadas.

Nesse sentido, outra hipótese apontada seria a possibilidade de microrechupe advinda do processo de fundição, que poderia contribuir para a falha. Nesse caso, seriam necessárias mais algumas análises na microestrutura e aprofundamentos, no qual não foi realizado nesse trabalho. Após o rompimento do eixo, a peça continuou o seu movimento provocando atrito entre as partes, dificultando a identificação de microrechupes, porosidades ou inclusões. Mas acredita-se que defeitos do material podem contribuir sim para a falha. A presença de carbonetos identificados pela análise metalográfica podem contribuir para ocorrência da fratura, corroborando as discussões de Rosário e Souza (2006) que apresentam uma combinação de dureza elevada e pouca capacidade de suportar altas tensões de cisalhamento.

Em relação à falta de raio de concordância nas cambotas, verificou-se que este contribuiu para a ocorrência da falha, nesse caso identificou-se uma necessidade de revisão de projeto, considerando uma alteração no raio de concordância.

Quanto à falha operacional relacionada ao baixo nível de óleo, acredita-se que essa falha, pode sim estar correlacionada a falha do virabrequim, pois o baixo nível de óleo provocou o atrito entre o pistão e a camisa de pistão, ocasionando o travamento brusco do mesmo e contribuindo para a ocorrência da falha. Esse travamento provocou uma tensão de cisalhamento acima do suportado pelo material que poderia ter levado a ruptura do eixo por torção gerada pelo motor. Foi proposto uma alteração no diâmetro nos munhões e aumento do raio de concordância nas cambotas do eixo, na qual a tensão de cisalhamento passaria de 8.334 para 371 Mpa, permitindo um maior equilíbrio de forças e evitando futuras rupturas para esse eixo.

4. CONCLUSÕES

Por meio das análises químicas, ensaios mecânicos e metalográfico, foi constatado que o material estava em desacordo com o especificado pelo fabricante (Aço Inox 304), sendo este um ferro fundido nodular (FE 60003), porém este não estaria associado às causas da falha. A não identificação de defeitos como microrechupe ou inclusões, impedem de verificar se a falha poderia ter ocorrido devido a esses defeitos apontados. A falta de raio de concordância identificado na região das cambotas intensifica o acúmulo de tensões e a presença de carbonetos verificada pela análise metalográfica contribuíram para ocorrência da fratura. Com base nas informações coletadas anteriormente, o equipamento trabalhou com baixos níveis de óleo, ocasionando o travamento brusco do mesmo, contribuindo para a falha. Apresentou-se uma proposta de alteração no diâmetro dos munhões e aumento do raio de concordância nas cambotas do eixo, na qual a tensão de cisalhamento passaria de 8.334 para 371 Mpa, apresentando uma redução dessa tensão e possíveis falhas para o material estudado.

5. AGRADECIMENTOS

Ao cliente usuário do pulverizador estacionário pela disponibilidade do eixo virabrequim para a análise de falha.

6. REFERÊNCIAS

- Morais, O.J.; Griza, S.; Strohaecker, T.T. Análise de falha me virabrequim. 61º Congresso Anual da ABM. Rio de Janeiro. R.J. Julho, 2006
- Callister JR, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais uma introdução. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- Chiaverini, V. Aços e Ferros Fundidos. 7 ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais-ABM, São Paulo, 2012.
- ABNT NBR 6916 - Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal, 1981.
- Souza, R. M.; Rosario, J. F. A.. Avaliação da Integridade Superficial no Torneamento de um Ferro Fundido Nodular com Carbonetos; 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2007.
- Montgomery, D.C.; Runger, G.C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho.

FAILURE ANALYSIS OF A CRANKSHAFT SHAFT: PROJECT IMPROVMENT PROPOSAL

Natália Fernanda Santos Pereira, natsantos23@gmail.com¹
Samuel Almeida Pimenta, pimentasky@gmail.com¹
Anderson Júnior dos Santos, ndersonsantos@hotmail.com¹
Bárbara Cristina Mendanha Reis, babi_mreis@hotmail.com
Juan Carlos Campos Rubio, juan@ufmg.br¹
Augusto Moura Martins, agosto.mmartins2@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte (MG)

Abstract: *The present study aims to detect the main causes of the occurrence of failure in the crankshaft axis of a stationary sprayer. The crankshafts are robust, oversized parts, made of steel or cast iron and yet there are many cases of failure in these components. The hypotheses for the possible failures of the crankshaft axis were studied and data were collected through mechanical, metallographic, hardness, visual and chemical analyzes, in order to detect the possible causes that led to rupture. By analyzing the data, there were differences in the chemical composition of the material. The shearing stress was calculated after the shaft dimensioning in the section of rupture and through this calculation and the analysis of the collected data, it was verified the need to change the design of the crankshaft shaft. Another factor raised was the lack of radii of agreement and the presence of carbides in the structure that could accumulate tensions and assist in the fracture of the axis. It was proposed a change in the diameter of the trunnions and increase of the radius of agreement in the axle crankshafts, in which the shear stress would increase from 8,334 to 371 MPa, allowing a greater balance of forces and avoiding future ruptures for this axis.*

Keywords: *Crankshaft, failure, project, materials*