

QUEBRA DO COMPRESSOR DE AR DA ARCELORMITTAL TUBARÃO – ANÁLISE DE FALHA E OPERAÇÃO COM DOIS ESTÁGIOS¹

Humberto Celeste Gomes²
Hernani de Pinho Carvalho³
Mauro César Soares Tamandaré⁴
Giovani do Carmo Caser⁵

Resumo

Este trabalho tem o objetivo de apresentar a falha ocorrida no 3º estágio do compressor de ar de alimentação (CP-101) da Unidade de Fracionamento de Ar N°3 (FOX 3) da ArcelorMittal Tubarão, a análise das causas e a obtenção de sua recuperação para operar com dois estágios. Foi utilizada a ferramenta de árvore de falhas para auxiliar na análise das inúmeras possíveis causas identificadas. Dentre estas possíveis causas, apresentamos a análise das peças danificadas, realizadas em laboratório pelo fabricante do compressor. Como destaque, apresentamos o estudo de viabilidade e de adaptações que permitiu a operação do compressor com dois estágios por um período de quatro meses. Todo este trabalho permitiu o retorno da operação da FOX 3, mesmo com a sua capacidade nominal reduzida, minimizando o impacto no custo de produção de aço.

Palavras-chave: Quebra; Compressor; Análise; Operação reduzida.

FEED AIR COMPRESSOR'S FAILURE AT ARCELORMITTAL TUBARAO- FAILURE ANALYSIS AND OPERATION WITH TWO STAGES

Abstract

This paper aims to present the failure occurred in the third stage of the feed air compressor of the air separation plant # 3 of ArcelorMittal Tubarão, the causes investigation and its repairing in order to permit its operation with two stages. It was applied the failure tree analysis tool to advise possible root causes. Among the possible causes, one laboratorial analysis of damaged parts is presented, performed by compressor's manufacturer. As a highlight, the operation of the compressor with two stages for a period of four months and studies together with the manufacturer of the equipment enabled this operation. All this work allowed operating the air separation plant with reduced capacity, minimizing the impact on the steel production cost.

Key words: Failure; Compressor; Analysis; Reduced operation.

¹ *Contribuição técnica ao 23º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2008, Porto Seguro, BA*

² *Especialista de Manutenção Mecânica – ArcelorMittal Tubarão.*

³ *Especialista de Engenharia Mecânica – ArcelorMittal Tubarão.*

⁴ *Supervisor de Predição e Inspeção Mecânica – ArcelorMittal Tubarão.*

⁵ *Especialista de Engenharia Mecânica – ArcelorMittal Tubarão.*

1 INTRODUÇÃO

O compressor de ar de alimentação (CP-101) possui 03 estágios de compressão e tem a função de alimentar com ar atmosférico a Unidade de Fracionamento de Ar n° 3 (FOX 3). Este ar é processado nas colunas de fracionamento da planta, produzindo os seguintes produtos: O₂ gás, O₂ líquido, N₂ gás e Argônio Líquido.

Em Junho de 2007, após manutenção programada, ocorreu falha no 3° estágio do compressor CP-101, vindo a danificar os seguintes elementos: Impelidor, eixo pinhão e parafusos de fixação do impelidor e cone.

Durante o período (quatro meses) de fabricação das peças sobressalentes pelo fabricante do equipamento, realizamos um estudo e plano de trabalho para reparo do compressor e operação com dois estágios, o qual será mostrado ao longo desta apresentação. Segue abaixo fluxograma do processo da FOX 3:

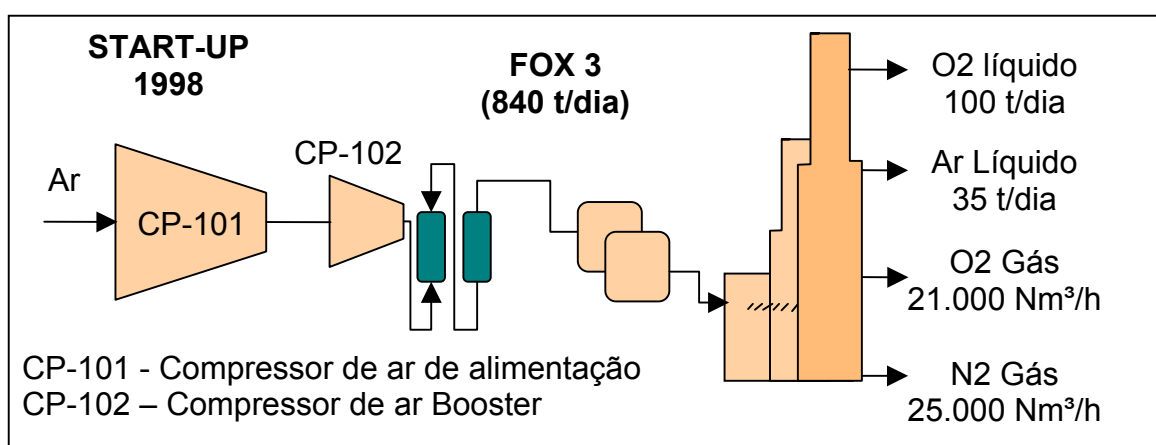


Figura 1. Processo produtivo FOX # 3.⁽¹⁾

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Especificação Técnica

2.1.1 Compressor CP-101

Quadro 1. Lista de materiais do 3° estágio do compressor.⁽²⁾

Vazão	115.753 Nm ³ /h
Pressão sucção	Atm
Pressão descarga	5,06 Kgf/cm ² (g)
Potência	11MW
Rotação Motor	1800 rpm
Rotação eixo pinhão 1° e 2° estágio	7322 rpm
Rotação eixo pinhão 3° estágio	11507 rpm
Fabricante	GHH BORSIG
Start-up	1998

2.1.2 Vista em corte do compressor

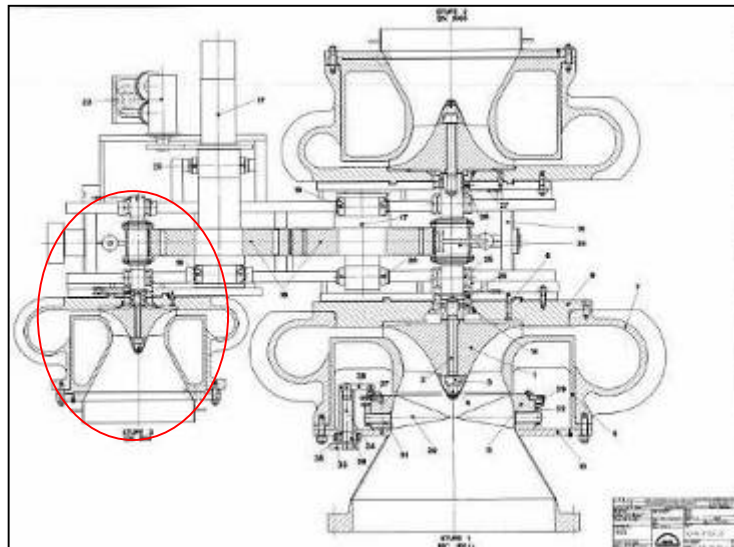


Figura 2. Detalhe em corte do compressor.

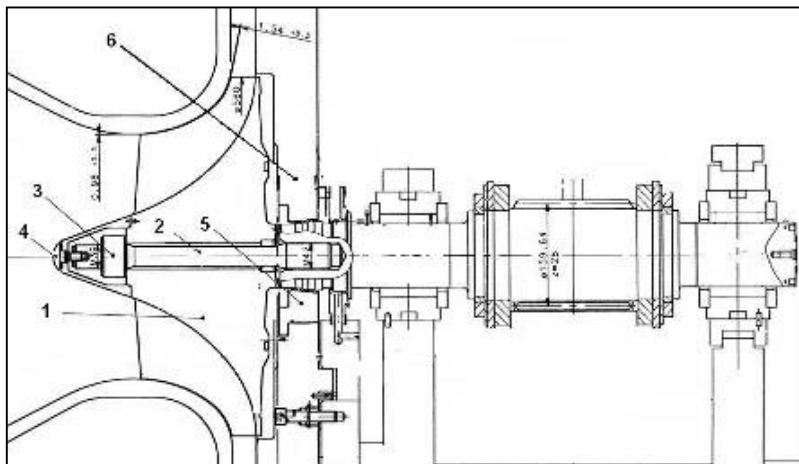


Figura 3. Detalhe do 3º estágio do compressor.⁽²⁾

Quadro 2. Lista de materiais do 3º estágio do compressor.⁽²⁾

Item	Descrição	Material
1	Impelidor	X5CrNi13.4V Ø560mm
2	Parafuso	Wr. X5CrNi13.4V – M39 x M42 x 428 mm
3	Porca	Wr. X5CrNi13.4V – M39
4	Parafuso	X20Cr13V- M12
5	Labirinto	Alumínio
6	Voluta	Ferro Fundido

3 MANUTENÇÃO

3.1 Filosofia de Manutenção

A manutenção nas empresas modernas é considerada parte do processo produtivo, pois o investimento em uma manutenção sistematizada é infinitamente inferior aos custos decorrentes de quebras, perdas de produção, lucros cessantes e prejuízos às pessoas e à imagem da companhia. Desta forma, a manutenção tem que estar

trabalhando para fazer, a cada dia, os processos melhores, reduzindo as variabilidades e prolongando a vida útil dos ativos, para que a empresa tenha longevidade e sustentabilidade. Acreditando nisso, a ArcelorMittal Tubarão trabalha fortemente na predição, baseada na análise de tendência e planejamento, programação e controle. Abaixo representamos um resumo de nossa filosofia de manutenção:

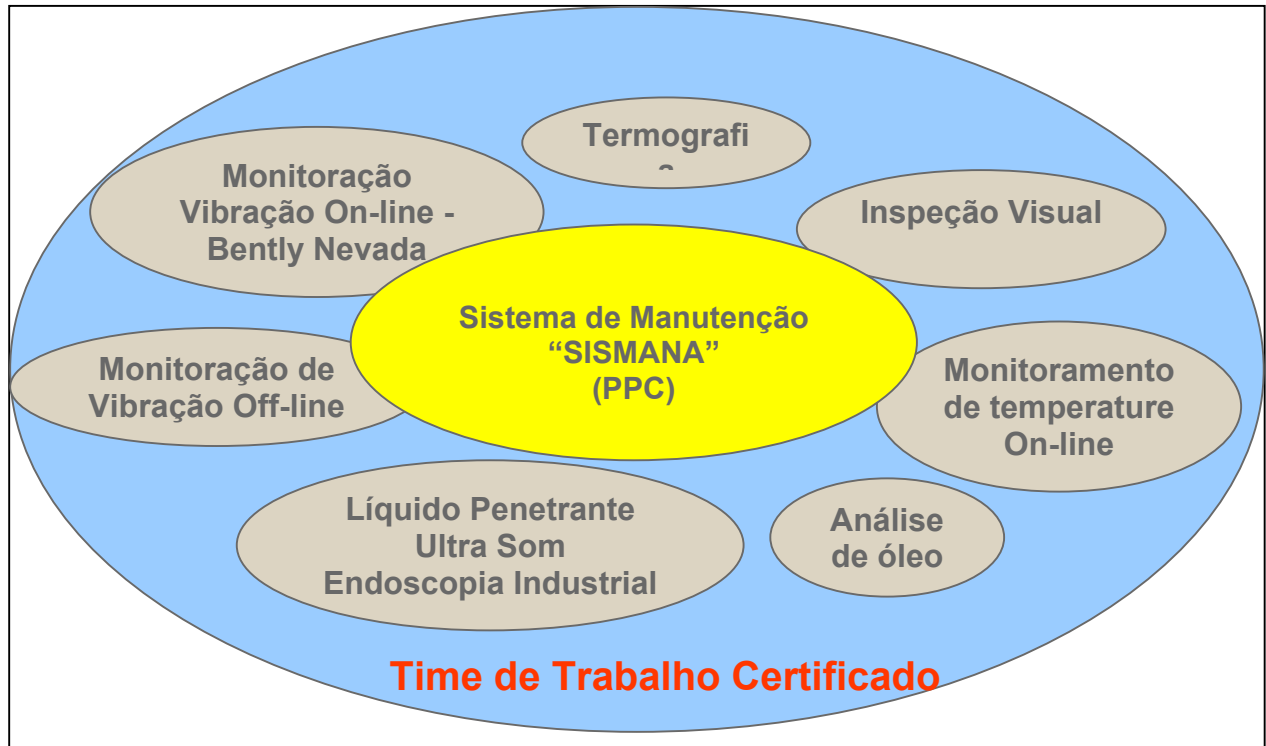


Figura 4. Filosofia de Manutenção Preditiva da ArcelorMittal Tubarão.⁽¹⁾

3.2 Parada Programada do CP-101

Em junho de 2007 realizamos a parada programada do CP-101 e conseqüentemente manutenção na planta e periféricos da FOX 3. Dentre os serviços executados no compressor CP-101 e periféricos, vale destacar:

- Desmontagem completa das engrenagens, impelidores selos labirintos e mancais;
- Limpeza adequada e inspeções de Ensaios Não Destrutivos;
- Substituição das peças desgastadas por sobressalentes;
- Montagem e teste.

Ao término dos trabalhos e durante o teste de performance do compressor, ocorreu quebra do terceiro estágio, com conseqüentes danos irreparáveis nas seguintes peças: Eixo pinhão, impelidor, mancais e voluta (carcaça).



Figura 5. Foto das peças de fixação do impelidor e impelidor após o acidente.⁽¹⁾

4 ANÁLISE DE FALHA

4.1 Conceitos e Tipos de Metodologia

A análise da falha em equipamento rotativo deve sempre ter como meta a identificação da sua causa básica, ou seja, seu fator primário gerador da falha. Isto é de extrema importância, uma vez que, na grande maioria dos casos a causa básica é facilmente confundida com uma das conseqüências desta e, caso isto aconteça, o problema não será eliminado em definitivo.

Permanecendo ainda ativa a causa básica o problema fatalmente irá se manifestar novamente, talvez até de maneira mais catastrófica do que em sua última manifestação.

Atualmente existem inúmeras metodologias para assessorar na análise de falha. Dentre os métodos existentes podemos citar abaixo os mais utilizados:

- Diagrama Sequencial De Ishikawa “Causa E Efeito” – “Espinha de Peixe”:



Figura 6. Exemplo de diagrama seqüencial de Ishikawa.⁽³⁾

- Árvores de Falhas:

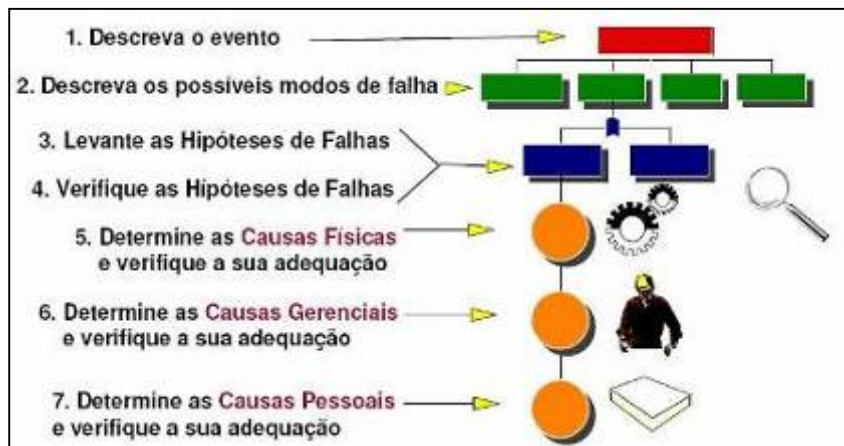


Figura 7. Exemplo árvore de falhas.⁽³⁾

4.2 Falhas em Compressores Centrífugos

Normalmente as falhas em compressores centrífugos acontecem devido aos fatores externos à máquina. Na maioria das vezes podemos relacioná-los como:

- Manutenção inadequada – Procedimentos inadequados, mão-de-obra especializada, ajustes incorretos e etc.;
- Projeto de engenharia inadequado - Especificação incorreta do equipamento para as condições de uso, como por exemplo, quando o equipamento instalado não é projetado para as exigências do processo, tais como: tipo de fluido a ser admitido, grau e natureza dos contaminantes ou temperatura de admissão, presença de condensado;
- Operação inadequada - operação do equipamento em condições diferentes das previstas no seu projeto original, como por exemplo, quando variações no processo produtivo resultam em pressão de descarga do fluido em valores diferentes, podendo levar o compressor ao Surge.

Como pode-se observar, a análise de falha em compressores centrífugos não é tarefa fácil, pois, varias hipóteses de causas básicas e de diferentes disciplinas são identificadas.

4.3 Análise de Falha do 3º Estágio do Compressor CP-101

Após o acidente do compressor CP-101 foi montado um grupo multidisciplinar para estudo da causa básica geradora do evento. Abaixo listamos as principais causas possíveis analisadas:

4.3.1 Montagem inadequada do impelidor

Neste tipo de compressor, a montagem e desmontagem do impelidor no eixo pinhão é uma atividade crítica, sendo obrigatoriamente realizada com critério. Após o acidente foi verificado que o impelidor foi montado corretamente. Na Figura 8, pode-se ver que o pino guia localizado no serrilhado de acoplamento do impelidor e eixo pinhão, estava montado corretamente. **Causa provável descartada.**



Figura 8. Foto parafuso de fixação do cone.⁽⁴⁾

4.3.2 Fadiga do parafuso e pino de fixação do cone

Pela foto (Figura 5) do impelidor logo após a falha, foi levantado a possibilidade de quebra do parafuso e pino de fixação do cone. Após esta quebra, o cone ficaria girando em conjunto com o impelidor, causando vibração alta e conseqüentemente travamento do rotor. Esta causa foi analisada no laboratório de ensaios mecânicos e metalograficos do fabricante. Após análise, foi verificado que o tipo de fratura não apresentava características de fadiga. Também não foi encontrado trinca nas regiões próximas a fratura. **Causa provável descartada.**

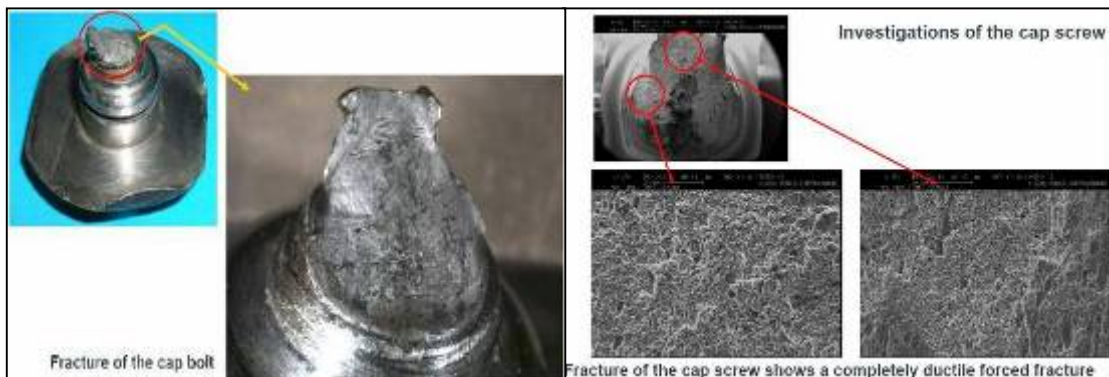


Figura 9. Foto parafuso de fixação do cone.⁽⁴⁾

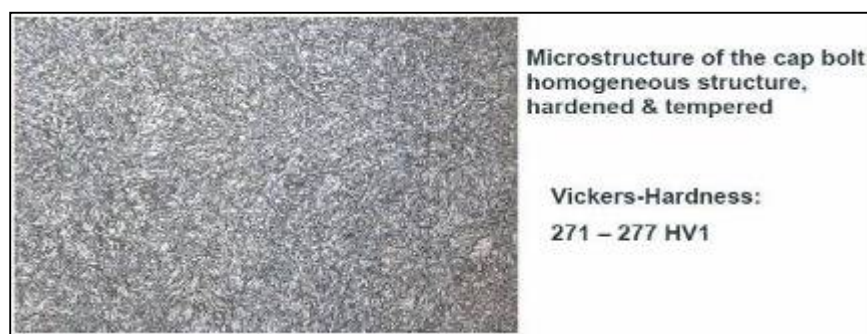


Figura 10. Foto da microestrutura do parafuso de fixação do cone.⁽⁴⁾

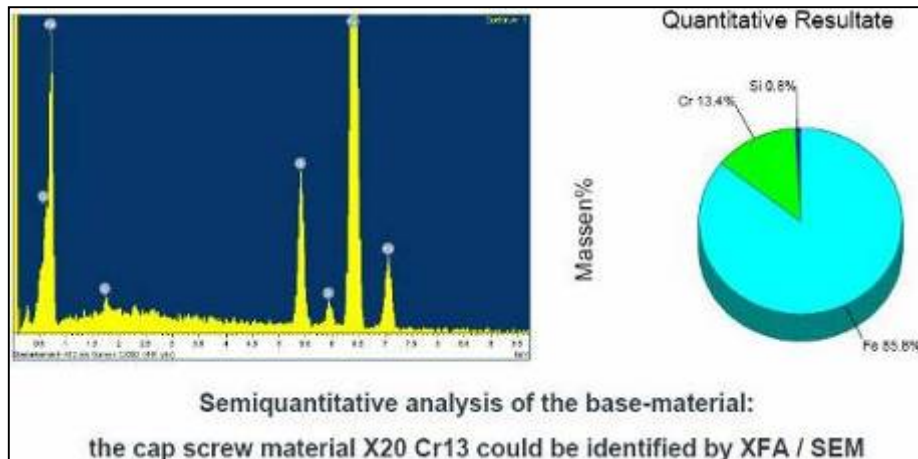


Figura 11. Análise do material do parafuso de fixação do cone.⁽⁴⁾

4.3.3 Fadiga do parafuso de fixação do impelidor

A observação visual do parafuso rompido, logo após o acidente, nos levou a apontar esta hipótese como a mais provável. Porém após a análise em laboratório do fabricante, esta causa foi descartada pelos seguintes motivos:



Figura 12. Parafuso de fixação do cone.⁽⁴⁾

- Microestrutura e dureza do material conforme projeto;

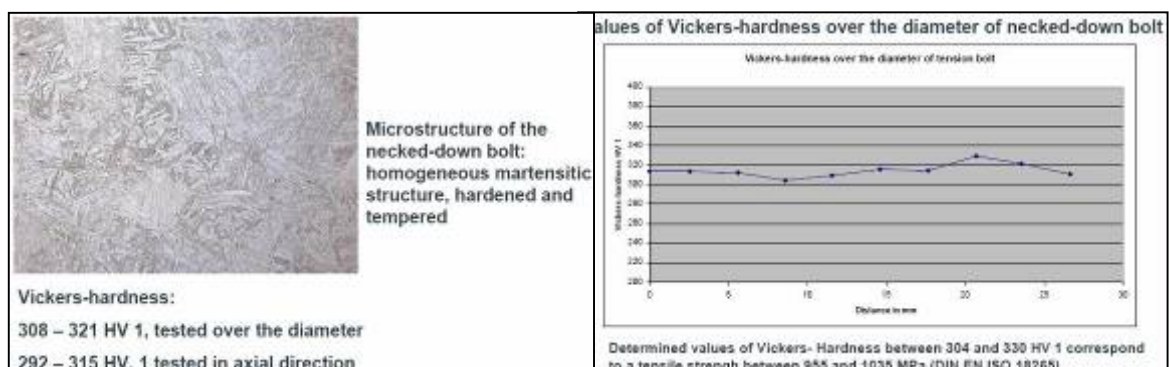


Figura 13. Análise da microestrutura e dureza do material.⁽⁴⁾

- Limite elástico, limite de resistência e análise química do material conforme projeto;

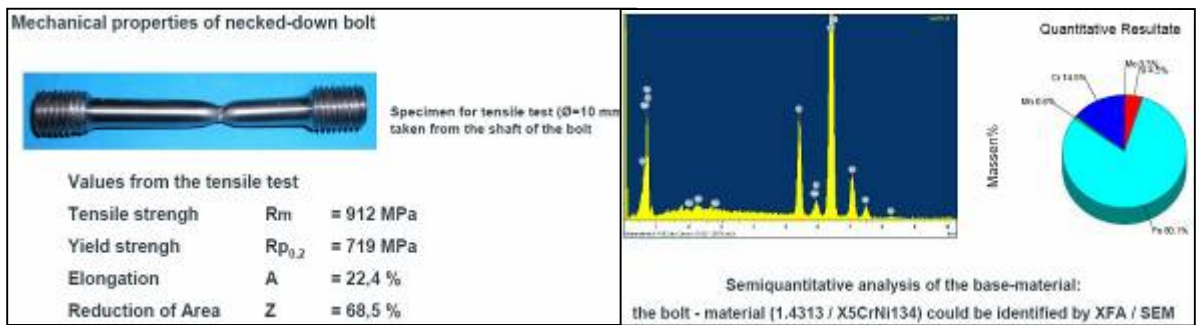


Figura 14. Teste de tração e análise química do material.⁽⁴⁾

- Não há indicação de deformação plástica ou fadiga nas proximidades da face da fratura;

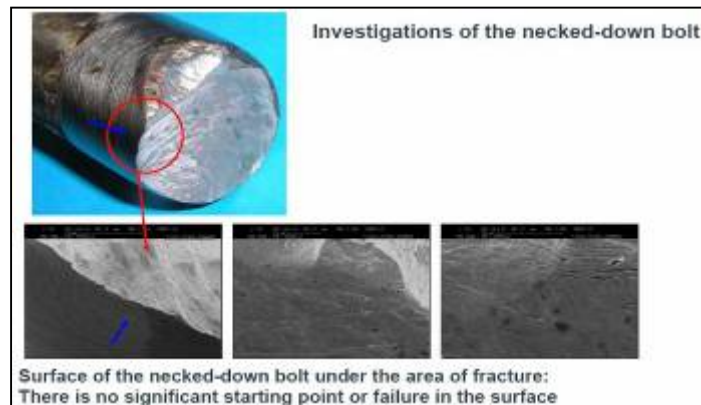


Figura 15. Teste de tração e análise química do material.⁽⁴⁾

- A face de fratura, houve presença de coalescência de micro-vazios (*dimples*, via MEV), esta forma dos micro-vazios indica ação de torção no parafuso no momento da fratura (tensão cisalhante);

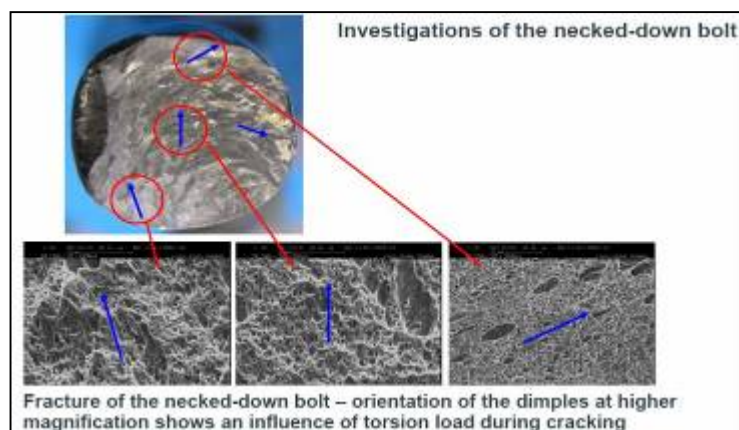


Figura 16. Teste de tração e análise química do material.⁽⁴⁾

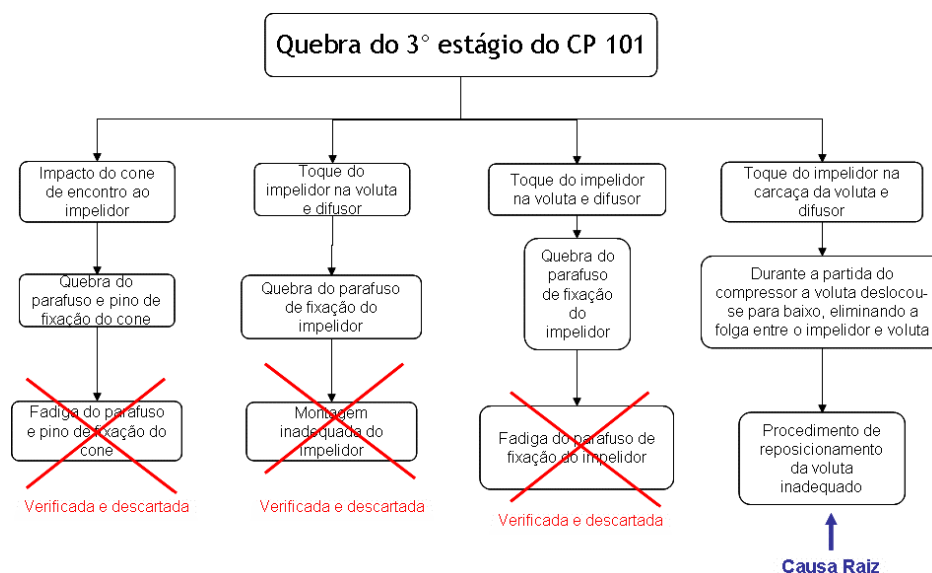
4.3.4 Procedimento de ajuste da voluta inadequado

Durante os procedimentos de inspeção no 3º estágio do compressor, foi verificado que a furação de fixação do labirinto de ar, não estava concêntrico com o centro do eixo pinhão. Esta diferença deslocava o labirinto de ar, causando contato do mesmo contra o eixo pinhão no momento da partida do compressor, consequentemente desgaste desigual e vazamento de ar para o meio-ambiente.

Para correção do desvio, a voluta foi reposicionada de forma a deixar o diâmetro interno do furo de assentamento do labirinto de ar e eixo pinhão concêntricos.

Na análise detalhada do procedimento de reposicionamento da voluta, este fornecido pelo fabricante do compressor, foi verificado que o mesmo não estava correto, pois, a voluta não estava em contato com seu apoio, ficando o peso da mesma (aprox. 3 ton) fixada somente nos parafusos. Durante a partida do compressor, a voluta deslocou-se para baixo e permitiu que o impelidor tocasse na voluta, gerando deformação plástica do parafuso de fixação do impelidor e consequentemente aumento da carga de trabalho sobre o parafuso até a sua ruptura. **Causa raiz identificada.**

Após verificação das possíveis causas, foi montado a seguinte árvore de falha:



5 REPARO DO COMPRESSOR APÓS ACIDENTE E OPERAÇÃO COM DOIS ESTÁGIOS

Pelo histórico de falhas em equipamentos rotativos na área de separação de ar da ArcelorMittal Tubarão este evento mostrou-se ser o mais severo, pelo fato dos danos ao compressor e principalmente ao potencial de perda de produção dos produtos da FOX # 3, bem como, redução da produção de aço líquido na Aciaria.

Buscando minimizar os impactos durante a fabricação dos novos componentes dos 3º estágio do compressor, realizamos um estudo de viabilidade e adaptações de modo a permitir que o compressor pudesse operar somente com dois estágios. Este estudo foi desenvolvido em parceria com o fabricante do compressor, que forneceu as curvas de performance do compressor modificada para operação com dois estágios. Foi fornecido também a curva de performance do compressor a jusante, CP-102, com ponto de operação fora do seu projeto original.

Analisando as curvas de performance de ambas as máquinas, verificou-se:

-Pressão de descarga do CP-101: 4,0 bar (a)

-Vazão: 115.000 Nm³/h

-Pressão de descarga do CP-102: 6,5 bar (a)

-Vazão de descarga: 85.000 Nm³/h

Pelos dados acima a pressão e vazão de ar disponível para a FOX # 3 é de 6,5 bar(a) e 85.000 Nm³/h respectivamente. Esses valores foram confirmados no teste de campo e representam a necessidade de operação da FOX # 3 reduzida, ou seja, sem turbina de expansão.

Com a retirada do terceiro estágio, foi realizada uma adaptação interligando a saída do intercooler n° 2 a tubulação de descarga do CP-101. No interior da caixa multiplicadora, foi removido o eixo pinhão do terceiro estágio e mantidos os mancais radiais do mesmo, para controle da pressão e fluxo de óleo para os demais mancais e engrenagens. As figuras 19 e 20 mostram com clareza estas alterações.

Seguem as curvas de performance do CP-101 e CP-102:

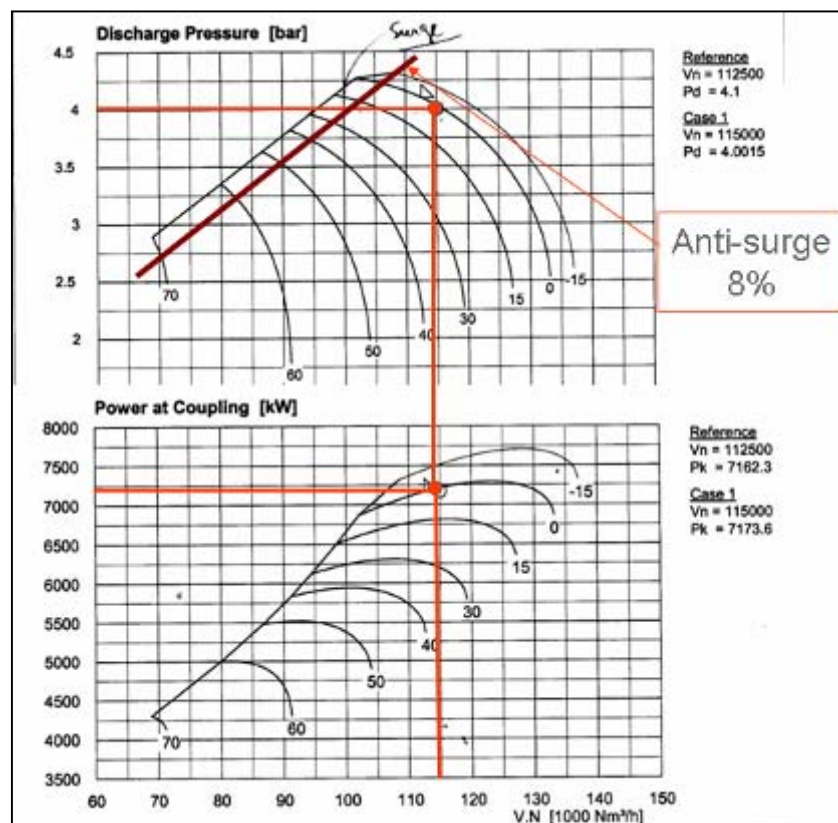


Figura 17. Curva de performance do CP-101 com dois estágios.⁽¹⁾

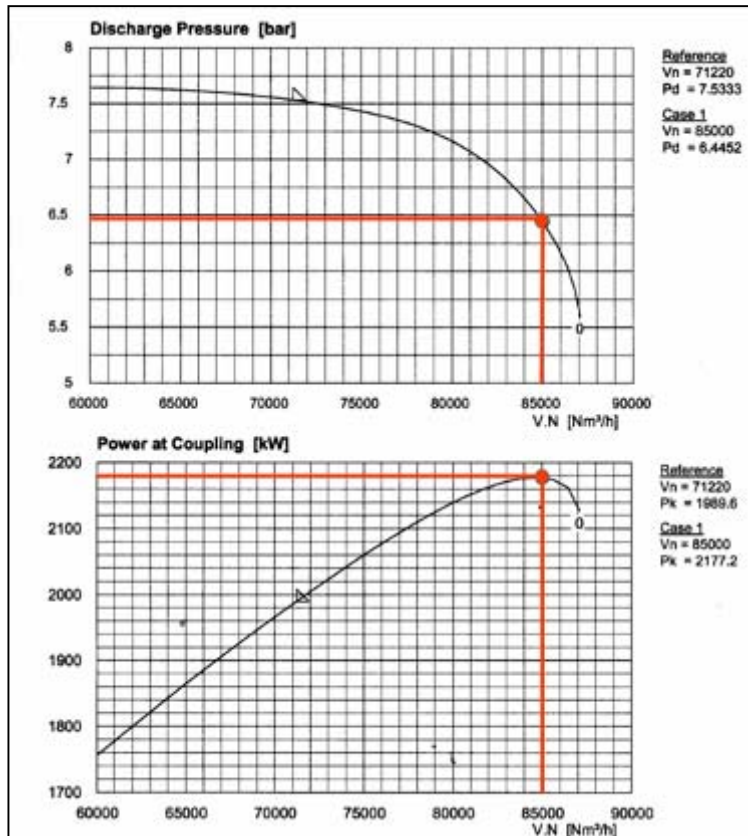


Figura 18. Curva de performance do CP-102 modificada.⁽²⁾



Figura 19. Compressor CP-101 antes e após a retirada do 3º estágio.⁽²⁾

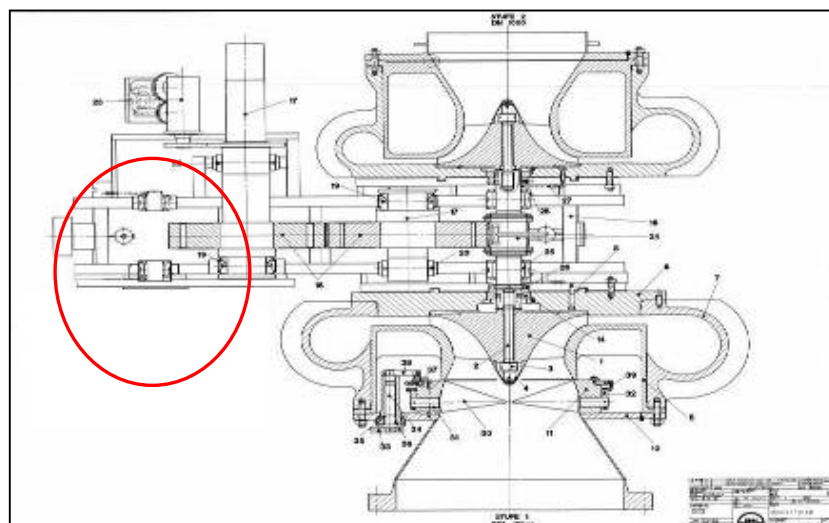


Figura 20. Compressor CP-101 após a retirada do 3º estágio.⁽¹⁾

6 RESULTADOS

Todos os dois temas desenvolvidos e apresentados neste trabalho trouxeram resultados positivos para a ArcelorMittal Tubarão. O primeiro deles, a análise de falha, proporcionou descobrir a causa raiz, que deverá ser trabalhada para evitar falhas repetitivas no futuro. Com a identificação da causa raiz, tivemos tranquilidade e segurança para reparar e operar o compressor com dois estágios, bem como, em meados do mês de Novembro de 2007, restabelecemos sua condição de projeto (três estágios).

No segundo tema, a operação do compressor com dois estágios durante um período de quatro meses, trouxe diretamente resultados positivos para a empresa. O mesmo viabilizou produzir em torno de 70% da capacidade nominal da FOX # 3, garantindo a produção de aço líquido na ArcelorMittal Tubarão e evitando o impacto no custo de produção de aço, caso tivéssemos com a unidade totalmente parada. Abaixo apresentamos um resumo dos resultados operacionais alcançados:

Tabela 3. Produção da FOX # 3.⁽¹⁾

Produto	Produção FOX # 3		Perda	
	Nominal	Reduzida	Potencial	Real
GOX Nm ³ /h	21.000	17.000	21.000	4.000
GN2 (Nm ³ /h)	22.500	18.000	22.500	4.500
LOX (ton)	100	0	100	100
LIN (ton)	0	0	0	0
LARG (ton)	45	30	45	15

Legenda: GOX: Oxigênio gás; GN2: Nitrogênio gás; LOX: Oxigênio líquido; LIN: Nitrogênio líquido; LARG: Argônio líquido

7 CONCLUSÃO

Os acidentes envolvendo equipamentos rotativos não são esperados numa empresa, por inúmeras razões como citado ao longo deste trabalho. Porém quando acontecem, devem ser obrigatoriamente analisados para encontrar e atacar a causa raiz da falha. Entretanto, esta análise mesmo que não desejada reforça e aprimora a experiência das equipes de Operação, Engenharia e Manutenção.

A tabela abaixo apresenta o resultado econômico alcançado com a minimização das perdas, caso tivéssemos com a planta totalmente parada, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 4. Resultado operacional final.⁽¹⁾

Resultado Final				
Produto		Quebra Total	Operação Reduzida	Recuperação de Perdas
Total Geral (Tonelada)	Oxigênio	161.216,00	83.448,11	77.767,89
	Nitrogênio	128.700,00	77.887,46	50.812,54
	Argônio	14.830,71	8.063,90	6.766,81

Este trabalho reforçou e aprimorou a experiência das equipes envolvidas, evitou a redução de produção de aço líquido na ArcelorMittal Tubarão e minimizou os impactos financeiros gerados por este acidente no valor aproximado de USD 4.000.000,00.

REFERÊNCIAS

- 1 ARCELOR MITTAL TUBARÃO, Documentos internos, 2008
- 2 MANTURBO. Maintenance Manual, Berlim, Alemanha, 1997.
- 3 GAMA, MARCIO PINHEIRO NOGUEIRA. Sistemática de Análise de Causas Raízes de Falhas. 2ºCurso de Pós-Graduação em Engenharia de Manutenção UNIVIX/ ABRAMAN, Novembro 2006.
- 4 MANTURBO. Vitair Damage of Compressor – Investigations on components of Stage 3, February 2008.
- 5 AFONSO, LUIZ OTAVIO AMARAL. Equipamentos Mecânicos: Análise de Falhas e Solução de Problemas. Qualitymark, Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- 6 Apostilas do 2º Curso de pós-graduação em Engenharia de Manutenção UNIVIX / Abraman.