

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ARTUR PANTANO BUCK BERTAIA

ANÁLISE DE FALHA EM MATERIAIS METÁLICOS:
Uma abordagem complexa utilizando PLS-SEM

SÃO CARLOS -SP

2020

ARTUR PANTANO BUCK BERTAIA

ANÁLISE DE FALHA EM MATERIAIS METÁLICOS: Uma abordagem complexa utilizando
PLS-SEM.

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de São Carlos, para obtenção do
título de bacharel em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Armando Ítalo Sette Antonialli

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Artur Pantano Buck Bertaia, realizada em 15/12/2020:

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli
Universidade Federal de São Carlos

Profa. Dra. Fabiane Leticia Lizarelli
Universidade Federal de São Carlos

Dra. Izabela Simon Rampasso
Universidade Federal Fluminense

DEDICATÓRIA

Dedico esta monografia ao meu pai, à minha mãe e à minha irmã.

AGRADECIMENTO

Foi essencial estar acompanhando de pessoas excepcionais durante minha trajetória.

Aos meus pais, Osvaldo e Maura, o meu muito obrigado. Vocês me proporcionaram todas as condições para chegar até aqui, me incentivaram, me ensinaram e me acompanharam. Existem três, abrangentes, tipos de conversas e ensinamentos entre pais e filhos, aquelas que nós concordamos logo de início; aquelas que nós discordamos, mas o amadurecimento nos faz concordar; e aquelas que, de fato, discordamos. Muito obrigado por todas elas.

A minha irmã, Vitória, o meu muito obrigado. Irmãos são companheiros e cúmplices, nós compartilhamos uma existência e um amor poderosíssimo. O simples fato de você ser minha irmã carrega minhas energias todos os dias.

Aos meus companheiros de república, o meu obrigado. Nós vivemos de maneira conjunta em um lugar onde nós estávamos seguros, estávamos todos nas mesmas situações e nos compreendíamos, foram ótimos anos. Um agradecimento especial ao meu amigo Fernando, que me acompanhou durante a graduação e em grande parte da elaboração desse trabalho com nossos enriquecedores “Encontros Culturais”.

Aos meus amigos do Menezes, o meu obrigado. Plínio, compartilhamos de vitórias e dores de maneira muito próxima e isso foi essencial para conseguimos chegar até as próximas vitórias e dores. Guilherme, compartilhamos a vida por alguns anos, pode-se dizer que éramos praticamente um só. Jean, grande amigo e com ótimos gostos em comum, além de possuir o dom do ensinamento e a paciência para com seus amigos. Lucas, amigo insistente e visionário, nunca, nunca mesmo, nos deixava renunciar a algo. Formamos um belo time meus amigos!

Aos meus amigos de Limeira, o meu obrigado. Um agradecimento especial para o Marcos, meu companheiro desde a infância e que teve participação fundamental nessa etapa com nossas conversas de assuntos dos mais banais aos mais sérios.

Ao meu orientador, Armando, o meu obrigado. Iniciamos com uma conversa filosófica e terminamos com uma monografia de fim de curso. Obrigado por caminharmos juntos com isso.

RESUMO

Materiais metálicos podem falhar por diversas razões e de diversas maneiras. Em linhas gerais, é comum se verificarem sobrecarga (dúctil ou frágil) ou fadiga. Essas falhas sempre deixam evidências que, quando investigadas, podem explicar a sua natureza. Este trabalho utiliza de estudos de casos de análises de falha em componentes de aço para alimentar um modelo estrutural e, por meio do método estatístico de modelagem por equações estruturais e mínimos quadrados parciais, ou PLS-SEM, do inglês *Partial Least Squares - Structural Equation Modelling*, descrever as falhas de maneira geral e abrangente. Como resultado, foi desenvolvido um modelo em que os parâmetros de avaliação, tanto do modelo como do método, não atingiram os valores especificados pela literatura para conferir relevância estatística. Embora o resultado não tenha sido plenamente satisfatório, há de se destacar que não foi encontrado, na literatura, qualquer trabalho relacionando PLS-SEM e análise de falha. Dessa forma, foram observados pontos de melhoria a serem implementados em futuros trabalhos visando garantir a referida relevância.

Palavras-chave: Aços. Modelo Estrutural. *Partial Least Squares. Structural Equation Modeling.*

LISTA DE SIGLAS

PLS-SEM – *Partial Least Squares – Structural Equation Modeling*

SEM – *Structural Equation Modeling*

CB-SEM – *Covariance Based – Structural Equation Modeling*

VIF – *Variation Inflation Factor*

AVE – *Average Variance Extracted*

LISTA DE SÍMBOLOS

R^2 – Coeficiente de Determinação de Pearson

f^2 – Tamanho do Efeito

ρ_c – Confiabilidade Composta

Q^2 – Validade Preditiva

Γ – Coeficiente de Caminho

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	MÉTODO PLS-SEM APLICADO	6
2.1.1	Análise da maturidade de células de manufatura	6
2.1.2	Estimativa de um modelo complexo no contexto do <i>big data</i>	8
2.1.3	Modelo de estimativa de custo para mineração de asteroide	10
3	MATERIAIS E MÉTODOS	12
4	RESULTADOS	16
4.1	MODELO CONSIDERANDO 36 ARTIGOS	16
4.2	MODELO CONSIDERANDO 88 ARTIGOS	19
4.2.1	Primeira Iteração	20
4.2.2	Segunda Iteração	23
5	CONCLUSÕES	28
	REFERÊNCIAS	30
	APÊNDICE A – Referências de artigos utilizados no banco de dados	33
	APÊNDICE B – Tabela preenchida para ser utilizada como banco de dados	38

1 INTRODUÇÃO

Fraturas em componentes mecânicos têm sido um problema para a sociedade desde o início da construção de estruturas; problema esse que se agrava quanto mais complexa e tecnológica ela for. A maioria dos motivos das falhas se encaixa em duas grandes categorias: negligência durante o projeto, manufatura ou utilização; e aplicação de um novo material ou projeto que pode ocasionar um resultado inesperado. No século XX, mais especificamente entre as décadas de 1960 e 1980, as fraturas eram consideradas como de duas naturezas: linear elástica, quando grande quantidade de deformação plástica ocasionava a fratura; e não-linear elástica, nos casos em que a deformação plástica ocorria de forma cíclica. Em tempos mais recentes, foi incluída a dependência temporal no comportamento não-linear dos materiais, por meio de parâmetros como a viscoelasticidade e viscoplasticidade (ANDERSON, 1994).

A fratura consiste na separação de um corpo em duas ou mais partes como resposta a um esforço estático em temperaturas abaixo da temperatura de fusão do material, podendo ser constante ou dependente do tempo. Uma fratura também pode ocorrer quando são impostas tensões cíclicas, situação em que é denominada fratura por fadiga; ou deformações que variam com tempo sob temperaturas elevadas, ao que se nomeia fratura por fluência. A natureza desse esforço pode assumir diferentes contornos, embora seja possível classificar a fratura em dois grandes grupos: fratura frágil e fratura dúctil. Essa classificação é baseada na capacidade do material de apresentar deformação plástica (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Quando uma fratura ocorre, alguns sinais específicos são deixados no material; esses sinais são diversos e podem traduzir diversos significados, como apresentado a seguir.

A fratura dúctil é comumente verificada em materiais extremamente dúcteis, como ouro e chumbo puro à temperatura ambiente, ou em outros materiais em temperaturas elevadas. O processo em que a fratura ocorre começa com o empescoamento, ou seja, deformação plástica; posterior a isso, são formadas pequenas cavidades ou microvazios; em seguida, esses microvazios começam a aumentar de tamanho e se transformam em trincas; após um período de propagação

lenta dessas trincas, a fratura ocorre pela rápida propagação de uma mesma trinca.

Fraturas dúcteis possuem uma aparência bastante característica. Em se tratando de, por exemplo, um estado de tensão trativa uniaxial, é possível ver o processo de empescoçamento e a redução da área da seção, como mostrado na Figura 1.

Figura 1: Processo de empescoçamento em corpo de prova submetido a tração uniaxial.



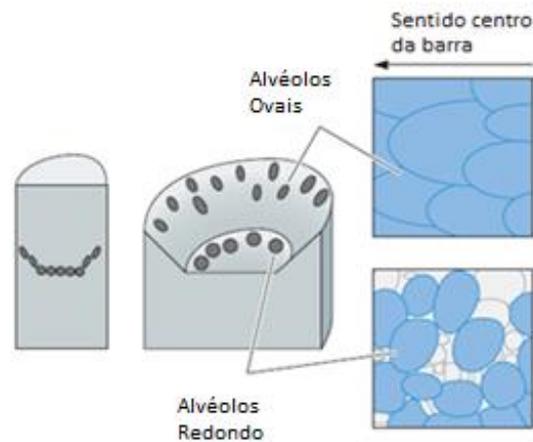
Fonte: Adaptado de Callister; Rethwisch (2012)

A aparência cônica da superfície é decorrente das tensões de cisalhamento que aparecem em razão da deformação por escorregamento e que atingem seu valor máximo no plano a 45° da direção da sollicitação uniaxial, originando o cone.

Além das aparências macroscópicas, a fratura dúctil possui uma aparência microscópica bastante característica, a superfície alveolar (Figura 2). Ao iniciar o processo que potencialmente ocasionará a fratura, começam a nuclear microvazios; o aumento da tensão faz com que esses microvazios cresçam e coalesçam até que, em um certo momento, o contato entre metal e metal é pequeno demais para suportar a tensão, e o material rompe, dando origem a superfície alveolar.

A fratura frágil ocorre sem qualquer deformação plástica visível e através da rápida propagação de uma trinca. É possível observar características macroscópicas em uma fratura frágil, como: superfície ausente de sinais de deformação plástica; marcas em “V” apontadas para o início da fratura (conhecidas como “marcas de sargento”); e ainda linhas ou nervuras que apontam para o início da trinca, formando um padrão de leque.

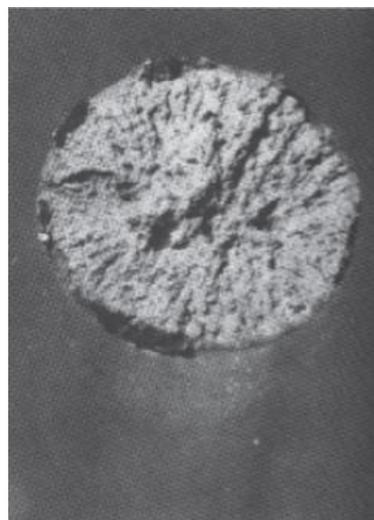
Figura 2: Formação de alvéolos durante uma fratura dúctil.



Fonte: Adaptado de Askeland (2014).

Para a maioria dos materiais cristalinos, a propagação da trinca acontece com a ruptura sucessiva de ligações atômicas ao longo dos planos e direções cristalinas específicas, processo conhecido como clivagem (Figura 3); ou seja, a frente da trinca passa através dos grãos e, por isso, denomina-se fratura transgranular (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Porém, em alguns casos, como na presença de segregações e inclusões, a fratura pode acontecer no contorno do grão, situação em que se identifica como fratura intergranular (ASKELAND, 2014).

Figura 3: Superfície típica de clivagem em fratura frágil.

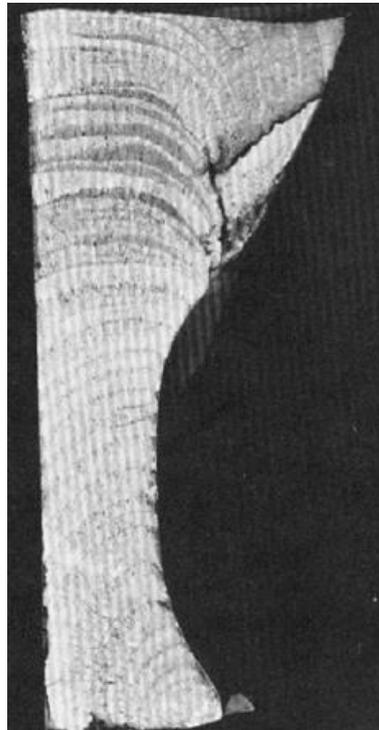


Fonte: Shackelford (2014).

A falha por fadiga, também conhecida por fratura cíclica, é um processo de deformação progressiva e localizada que ocorre em componentes que estão sujeitos a carregamentos caracterizados por tensões e deformações flutuantes. Esse tipo de falha só acontece quando da ação simultânea de três fatores: deformação plástica, tensão cíclica e trativa. A tensão cíclica e a deformação plástica propiciam o início da trinca, e a tensão trativa faz com que essa trinca se propague, ou seja, cresça até que finalmente ocorra a ruptura. É importante observar que tensões compressivas não causam falhas por fadiga (BECKER; SHIPLEY, 2002).

Falhas por fadiga também têm algumas características peculiares. A região da superfície por onde a trinca se propagou pode ser caracterizada por dois aspectos visuais: as marcas de praia e as estrias. Ambos indicam a extremidade da trinca e aparecem como nervuras concêntricas que se expandem a partir do local onde a trinca foi iniciada. Marcas de praia podem ser observadas a olho nu, enquanto as estrias possuem dimensões microscópicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Na Figura 4, é possível observar as marcas de praia.

Figura 4: Marcas de praia originadas por falha cíclica.



Fonte: Becker; Shipley (2002).

O modo como a sociedade funciona atualmente tem mudado; pensamentos, atitudes e problemas individuais têm atingido uma esfera mais ampla do que a única e restrita esfera em que estava inserida anteriormente. Pascal disse no século XVII “Não posso conhecer o todo se não conhecer particularmente as partes, e não posso conhecer as partes se não conhecer o todo”. No sentido dessa frase, é preciso partir do global para o particular e do particular para o global (MORIN, 2003). É possível fazer uma analogia entre a frase supracitada e as falhas, considerando que múltiplas razões originam uma falha, de múltiplas e diferentes maneiras, a maneira como acontece importa, bem como a combinação entre os fatores.

Esse raciocínio sobre complexidade foi a grande inspiração para esse trabalho. É importante deixar claro que complexidade é diferente de complicado. A palavra complexidade é baseada no latim *complexus* (o que é tecido em conjunto); o termo complexo é definido no Dicionário Aurélio de língua portuguesa como “Grupo ou conjunto de coisas, fatos ou circunstâncias que têm qualquer ligação ou nexos entre si” (FERREIRA, 1988).

Com esses conceitos apresentados, esse trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo que represente as análises de falha em componentes de aço de modo geral, contemplando as fases de projeto e operação, além das propriedades dos materiais metálicos. Para criação desse modelo, será utilizado o método estatístico *Partial Least Squares – Structural Equation Modelling*, conhecido como PLS-SEM, que será mais bem explicado ao longo do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Modelagem por equações estruturais ou *structural equation modeling* (SEM) trata de um conjunto de técnicas estatísticas que permite estabelecer relações entre uma ou mais variáveis, contínuas ou discretas. Esse método permite resolver casos que envolvam regressões de múltiplos fatores (TABACHNICK, 2006).

SEM pode ser utilizada tanto para confirmar uma teoria pré-estabelecida, quanto para identificar relações e padrões em uma base de dados. É chamada de confirmatória quando tem ao intuito de testar hipóteses de teorias existentes; e exploratória quando busca padrões em uma base de dados, caso haja pouco, ou não

haja, conhecimento prévio sobre como as variáveis se relacionam. Há dois tipos de modelagem por equações estruturais: *covariance-based* SEM (CB-SEM), primordialmente utilizado para casos confirmatórios, e *partial least square* SEM (PLS-SEM), comumente utilizado para casos exploratórios (HAIR *et al*, 2014).

2.1 MÉTODO PLS-SEM APLICADO

Nesta subseção, serão apresentados três artigos em que o método de modelagem por equações estruturais e mínimos quadrados parciais (PLS-SEM) foi utilizado. Dessa forma, pretende-se subsidiar a metodologia utilizada no desenvolvimento desse trabalho de maneira a permitir a sua ampla compreensão.

2.1.1 Análise da maturidade de células de manufatura

O estudo de Rampasso *et al.* (2019) tem como principal objetivo desenvolver e validar um modelo capaz de medir a maturidade de células de manufatura em um ambiente de produção enxuta, ou *lean*.

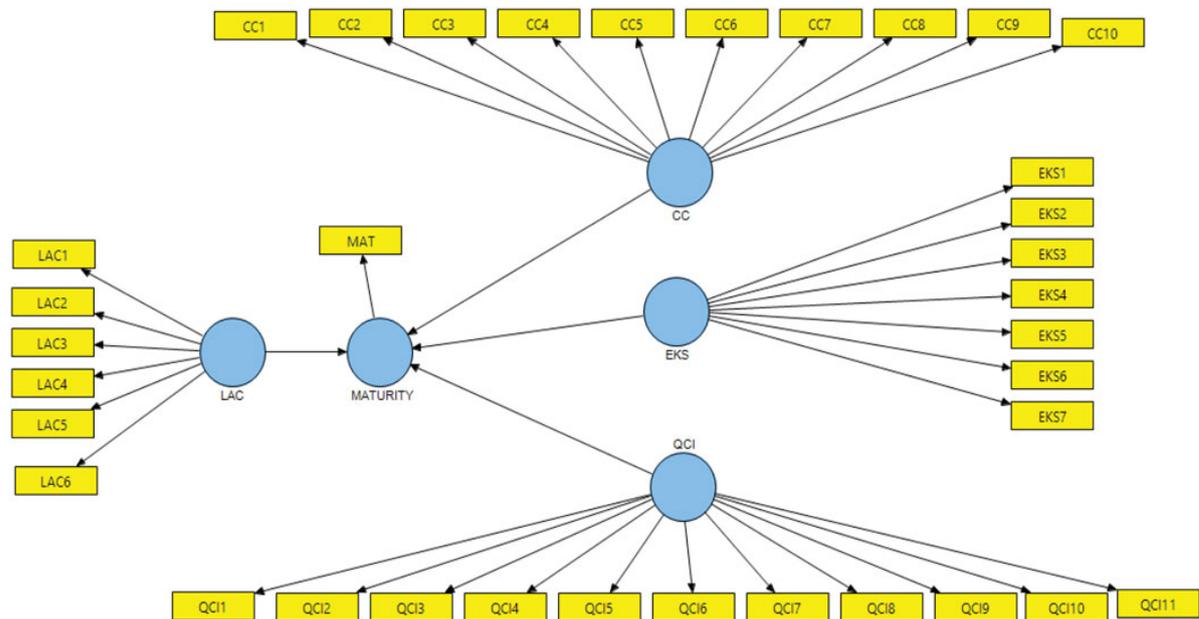
Seu trabalho consistiu em uma vasta revisão bibliográfica e pesquisa de campo que possibilitassem a criação de um modelo teórico inicial; além disso, contém um painel feito com especialistas em produção *lean* para permitir que os parâmetros do modelo ainda não verificados durante a revisão bibliográfica fossem identificados, e todos eles organizados, de modo que o primeiro modelo pudesse se assemelhar ao máximo com o esperado. Mediante os parâmetros organizados e identificados, foi desenvolvido um questionário contendo 35 questões, às quais os profissionais envolvidos com o tema deveriam responder indicando um valor dentro de uma escala de 0 a 10.

O método PLS-SEM foi desenvolvido seguindo os nove passos encontrados em Hair *et al.* (2014), cuja primeira etapa consiste no modelo teórico já descrito no parágrafo anterior. No segundo passo, o tamanho mínimo da amostra foi calculado utilizando o *software* G*Power, em função do nível de significância, poder estatístico desejado e o efeito da população a ser detectada, todos eles comparados com os valores de referência encontrados na literatura. No terceiro passo, foi utilizado o

software SmartPLS para a validação da estrutura proposta. O quarto passo consistiu em obter a variância média extraída e a sua comparação com o valor recomendado encontrado na bibliografia. Durante o quinto passo, foram calculados o alfa de Cronbach e a confiabilidade composta, a fim de averiguar os vieses e a confiança dos dados. No sexto passo foi avaliado, por meio do método *cross-loadings*, se as variáveis estavam devidamente alocadas em seus construtos. No sétimo passo, os coeficientes de determinação foram avaliados, para verificar o quão relacionadas estavam uma variável dependente e uma variável independente. A seguir, no oitavo passo, foram analisadas as correlações e regressões lineares. No nono e último passo, foi analisada a qualidade do modelo encontrado utilizando dos parâmetros redundância e comunalidade, também comparados com os valores recomendados pela literatura.

É interessante destacar que é possível que o primeiro modelo estrutural não corresponda ao modelo final. Nesse estudo, o primeiro modelo contava com quatro construtos, durante o seu desenvolvimento, um deles mostrou não ter influência sobre o modelo, conforme pode ser visto na Figura 5; sendo assim, um segundo modelo foi desenvolvido para testar se o construto em questão tinha influência sobre os demais construtos, e o resultado foi positivo. Concluiu-se, assim, que o modelo estava completo, visto que o referido construto exercia influência no modelo a partir dos construtos restantes. Por fim, foi possível desenvolver e validar um modelo capaz de medir a maturidade das células de manufatura e, além disso, entender a realidade e permitir a melhora do desempenho de outras células.

Figura 5: Modelo estrutural para maturidade da célula.



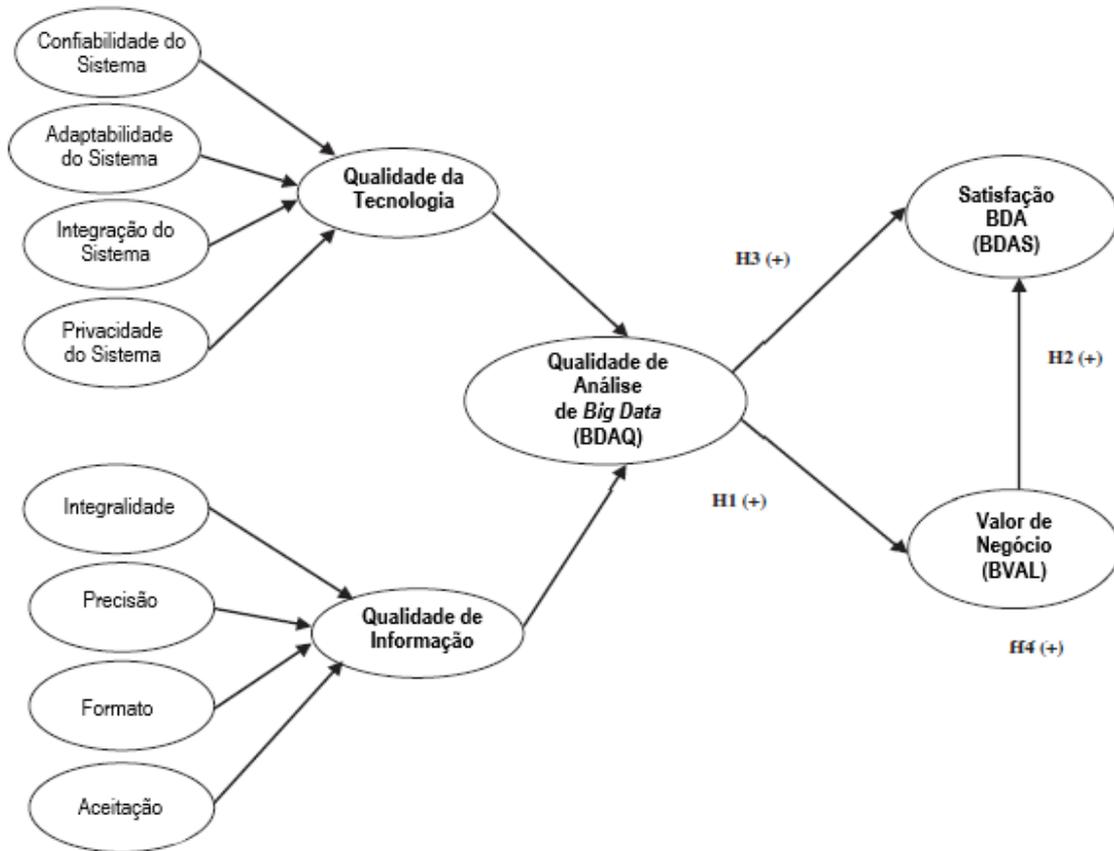
Fonte: Rampasso *et al* (2019).

2.1.2 Estimativa de um modelo complexo no contexto do *big data*

A questão chave a ser respondida no estudo de Akter, Wamba e Dewan (2014) é se o método PLS-SEM é capaz de prever o comportamento de um problema complexo dentro do contexto de análise de *big data*, mais precisamente avaliando a qualidade do banco de dados relacionada com o valor do negócio e a satisfação do *big data*.

De início, um modelo hierárquico foi desenvolvido baseado na teoria existente. O estudo para a confecção do modelo identificou duas dimensões principais: qualidade da tecnologia e qualidade da informação, com oito subdimensões. Em razão do grande número de constructos relacionados, esse modelo pode ser considerado complexo; outro fato relevante para a complexidade do modelo é sua característica reflexiva-formativa, ou seja, a influência existe tanto no sentido das variáveis latentes como no sentido das variáveis observáveis. Isso é exemplificado na Figura 6. A etapa de desenvolvimento do modelo hierárquico é crucial para a essência do trabalho.

Figura 6: Modelo estrutural para a qualidade da análise de *big data*.



Fonte: Adaptado de Akter, Wamba e Dewan (2014).

A coleta de dados foi feita utilizando um formulário, respondido por analistas de *big data*, em que os variáveis eram medidas por meio da escala de Likert com sete níveis; com exceção do constructo “satisfação”, que foi medido com uma escala de diferencial semântico de sete pontos.

Em posse dos dados, foi utilizado o *software* SmartPLS 3.0 para estimar as propriedades do modelo e avaliar confiabilidade, validade da convergência e validade da discriminação. A avaliação da confiabilidade foi feita com base nos valores dos pesos de cada variável observável: *alpha* de Cronbach, *composite reliability* e *average variance extracted*; esses parâmetros são comparados com os recomendados pela literatura. Os valores dos pesos de cada variável eram muito maiores em seus respectivos constructos, o que validou a convergência. Por fim, a raiz quadrada da variância média extraída validou a discriminação do modelo. Essa etapa confirma as hipóteses adotadas no desenvolvimento do modelo estrutural. Foi estimado o peso dos itens de ordem superior com significância $p < 0,05$ e os valores de *variance inflation*

factor maiores que 5 evidenciaram minimamente a colinearidade do modelo.

Esse estudo validou o modelo de pesquisa por meio do método PLS-SEM e, além disso, investigou a importância do ajuste do modelo, a relevância preditiva e a heterogeneidade, expressando a rigorosidade do modelo. Mais do que validade, existe uma enorme possibilidade em utilizar PLS-SEM em contextos preditivos complexos, como o ambiente de *big data*.

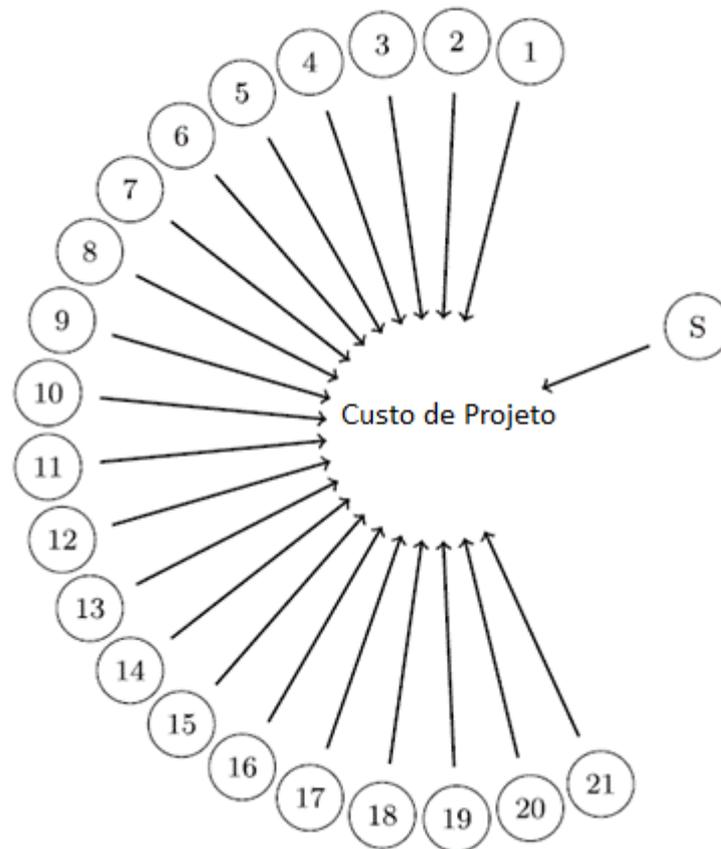
2.1.3 Modelo de estimativa de custo para mineração de asteroide

Estimar o custo de uma viagem espacial é algo exatamente complicado, dados a natureza única do problema, o excesso de incertezas e o alto índice de inovação. Quando isso é feito, existem três métodos comuns: o primeiro consiste em estimar os custos de baixo para cima, começando com materiais, mão de obra e produção; o segundo trata de fazer uma analogia de custo com um projeto existente e escalar para tamanhos e complexidades maiores; e o terceiro relaciona custos a parâmetros físicos, técnicos e de desempenho por meio de relações matemáticas. Probst *et al* (2020) utilizam em seu artigo o PLS-SEM como abordagem para criar um modelo preditivo do custo de uma viagem espacial com objetivo de minerar asteroides.

O processo de criação do modelo foi iniciado utilizando a Método Delphi de entrevistas para o levantamento dos parâmetros que poderiam influenciar no custo. As conversas foram individuais e guiadas como *brainstorms*, de modo que os especialistas estivessem isolados um dos outros para evitar qualquer viés entre elas. Essas entrevistas foram responsáveis pela identificação dos fatores de influência sobre o custo e pela criação de um questionário, em que cada questão fosse referente a cada um desses fatores, sendo que as respostas se dariam em escala de Likert.

Esses fatores de influência foram dispostos em um modelo estrutural, com todos eles diretamente conectados ao custo. É importante dizer que dois cenários foram previstos: asteroides próximos à Terra ou no Cinturão de Asteroides (localizado próximo a Marte e Júpiter). O modelo estrutural, como descrito, é apresentado na Figura 7.

Figura 7: modelo estrutural para custo de mineração em asteroide.



Fonte: Adaptado de Probst *et al* (2020)

Para a análise estatística, ou seja, para a implementação propriamente dita do método PLS-SEM, os autores utilizaram o *software* SmartPLS. Com o modelo estrutural, as respostas do formulário e o *software*, foi possível calcular o coeficiente de cada relação, chamado coeficiente de caminho, que consiste em uma grandeza que mensura a influência de cada variável sobre o custo.

Apenas esses coeficientes não são suficientes para avaliar a eficácia do modelo. Essa avaliação deve ser feita levando em consideração outros três aspectos além do coeficiente de caminho: o coeficiente de determinação (R^2), que assume valores de 0 a 1 e classifica o ajuste do modelo de equações estruturais; o tamanho do efeito ou *effect size* (f^2), que avalia o impacto de cada um dos parâmetros sobre o custo total; e a colinearidade VIF (do inglês *variation inflation factor*), que exprime quanta informação é transportada por um parâmetro, mas que pode ser explicada por outros parâmetros (alta colinearidade significa alta dependência entre os parâmetros).

Como resultado da primeira iteração do PLS-SEM, foram obtidos alguns valores de tamanho do efeito e colinearidade fora do intervalo recomendado para esse modelo; sendo assim, essas variáveis foram retiradas do modelo e outra iteração foi feita. O segundo modelo foi admitido como o final e os resultados foram analisados.

Foi observado que a variável Cenário não exerce influência sobre o custo. Ademais, devem ser levados em consideração, sobre o modelo, os valores positivos do coeficiente de caminho (que indicam que o custo aumenta se esses parâmetros aumentarem) e também os valores negativos (casos em que é possível observar que a relação entre as variáveis tem efeito contrário sobre o custo). De maneira interessante, o modelo indica que o custo diminui conforme o desenvolvimento de alta tecnologia aumenta, relação contrária à experiência empírica em gerenciamento de projetos.

Um modelo para estimativa de custo foi estabelecido, de maneira que um usuário pode fazer essa estimativa seguindo alguns passos. Contudo, mais análises e discussões devem ser feitas; novos especialistas, neutros ao modelo, devem ser questionados e, talvez, até outro modelo deva ser desenvolvido a fim de melhorar a estimativa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

É recomendado que a primeira etapa do processo para desenvolver um modelo estrutural e aplicar o método PLS-SEM seja um painel com especialistas no assunto. Esse painel tem por objetivo levantar todos os parâmetros que deveriam fazer parte desse modelo e suas respectivas perguntas para a coleta de dados.

Neste trabalho o levantamento de parâmetros é feito com base na literatura disponível. O conjunto de parâmetros foi dividido em três grupos, que descrevem a “natureza” da falha: Projeto, Materiais e Operação. O grupo Projeto engloba os parâmetros que estão relacionados com as razões de falhas que aconteceram na fase de execução do projeto mecânico, momento de criação prévio à fabricação. O grupo Materiais conta com todos as falhas que são caracterizadas por uma propriedade do material ou por algo que pode ser encontrado fisicamente em um material. E, por fim, o grupo Operação está relacionado aos parâmetros que descrevem falhas que

acontecem durante a utilização do componente ou durante sua vida útil.

Para o preenchimento do grupo Projetos foram utilizados como referências os livros “Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada” (NORTON, 2013) e “Elementos de Máquinas de Shigley: Projetos de Engenharia Mecânica” (BUDYNAS; NISBETT, 2011). Para o grupo Materiais, foram utilizados os livros “*Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*” (ANDERSON, 1994), “Conformação Plástica dos Metais” (FILHO *et al*, 2011) e “Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução” (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). E, para o grupo Operação, foi utilizado o livro “Manutenção Centrada em Confiabilidade” (MOUBRAY, 2000). Durante esse movimento, foram levantadas 45 possíveis causas para uma falha.

A questão a ser avaliada é: Quão significativa uma determinada causa é para a falha? E a resposta é dada em uma escala de 1 a 5, sendo que 1 representa nenhuma relevância e 5 representa máxima importância. Para que essa pergunta fosse respondida, foram utilizados artigos científicos de análises de falhas; ou seja, para cruzar a importância de cada um dos parâmetros listados para uma falha, era preciso ter em mãos uma série de falhas já ocorridas, bem como análises contendo as causas principais e coadjuvantes.

Os estudos de caso nesses artigos podem possuir causas principais e causas coadjuvantes, a distribuição da escala de 1 a 5 foi feita de maneira que a causa principal, podendo ser mais do que uma, recebesse o valor 5 da escala, as causas secundárias recebessem o valor 3 na escala e as causas não relacionadas recebessem o valor 1 na escala, em alguns casos foram utilizados os valores 2 e 4, estes foram distribuídos de acordo com a interpretação de cada artigo.

Utilizando a base de dados Science Direct, com a *string* de busca *Failure Analysis AND Metallurgy AND Steel* (Análise de Falha E Metalurgia E Aço), e com o período de publicação do ano 2015 até 2020, foram encontrados 36 artigos com estudos de caso e análises de falhas dos mais diversos tipos. O modelo foi criado no *software* SmartPLS® 2.0 e o algoritmo aplicado, porém o resultado não foi satisfatório. Nesse sentido, foi preciso utilizar o *software* GPower 3.1 para calcular o tamanho mínimo da amostra, obtendo-se a cifra de 77 artigos, como será mencionado adiante. A partir desse resultado, uma nova busca foi feita, estendendo o período de publicação para de 2000 até 2020; e, nessa busca, foram encontrados 88 artigos.

É importante ressaltar que todos os artigos utilizaram métodos consolidados e

reconhecidos para analisar as falhas, como por exemplo: inspeção visual, exame metalúrgico, inspeção microscópica, análise química, metalografia, escaneamento eletrônico microscópico, espectroscopia de raios X, dentre outros. Os 88 artigos utilizados estão referenciados no Apêndice A.

Uma planilha foi construída para cruzar os resultados das análises de falha de cada artigo com as 45 causas citadas anteriormente; então, cada artigo foi lido para que as causas da falha fossem identificadas e distribuídas de acordo com o grau de importância para cada um dos parâmetros identificados. Além disso, uma última linha e coluna foi adicionada nessa planilha, representando a variável Falha e o caso em que não havia falha, assim o valor de todas as variáveis é 1. Essa planilha é demonstrada no Apêndice B.

O modelo foi, então, adaptado para o novo número de artigos. Toda a criação do modelo estrutural no software, *upload* do banco de dados, execução dos algoritmos e extração dos relatórios foi suportada por Ringle, Silva, Bido (2014) e Hair *et al* (2014), bem como a análise dos resultados também.

Foram seguidos os oito passos descritos por Ringle, Silva, Bido (2014) para fazer a avaliação tanto do modelo de mensuração como do modelo estrutural; adicionalmente, alguns ajustes foram feitos de modo a tentar atender aos requisitos estatísticos. Essas iterações estão detalhadas na seção de resultados.

A primeira etapa do processo consiste em avaliar a convergência do modelo, ou seja, se uma medida se relaciona positivamente com medidas alternativas de um mesmo constructo. Isso foi feito avaliando valores da variância média extraída ou *average variance extracted (AVE)*.

A seguir, na segunda etapa, foi avaliada a validade discriminante do modelo: se os constructos são distintos, únicos e não capturam os fenômenos de outro constructo. Como, neste modelo, a quantidade de variáveis permite analisar uma a uma, foi utilizado o método de cargas cruzadas ou *cross loadings*. Esse método verifica se as variáveis medidas possuem o maior valor de carga em suas respectivas variáveis latentes (constructos); o próprio *software* faz a aplicação das variáveis medidas em todos os constructos, bastando no final fazer apenas a comparação dos valores.

A terceira etapa avalia a consistência interna do modelo ou a confiabilidade do modelo. Em geral, para isso é utilizado o Alfa de Crombach; porém, esse assume que

todos os indicadores são igualmente confiáveis e o método de PLS-SEM prioriza a confiabilidade individual de cada indicador. Portanto, foi utilizada a Confiabilidade Composta (ρ_c).

Na quarta etapa, deve ser avaliado se as relações do modelo são significantes. Este modelo é composto por correlações e regressões lineares, e é desejado que o erro probabilístico esteja dentro do esperado; para isso, o software calcula os testes *t* de Student por meio da execução do algoritmo de *Bootsrapping*, ou reamostragem, e esses valores seriam interpretados.

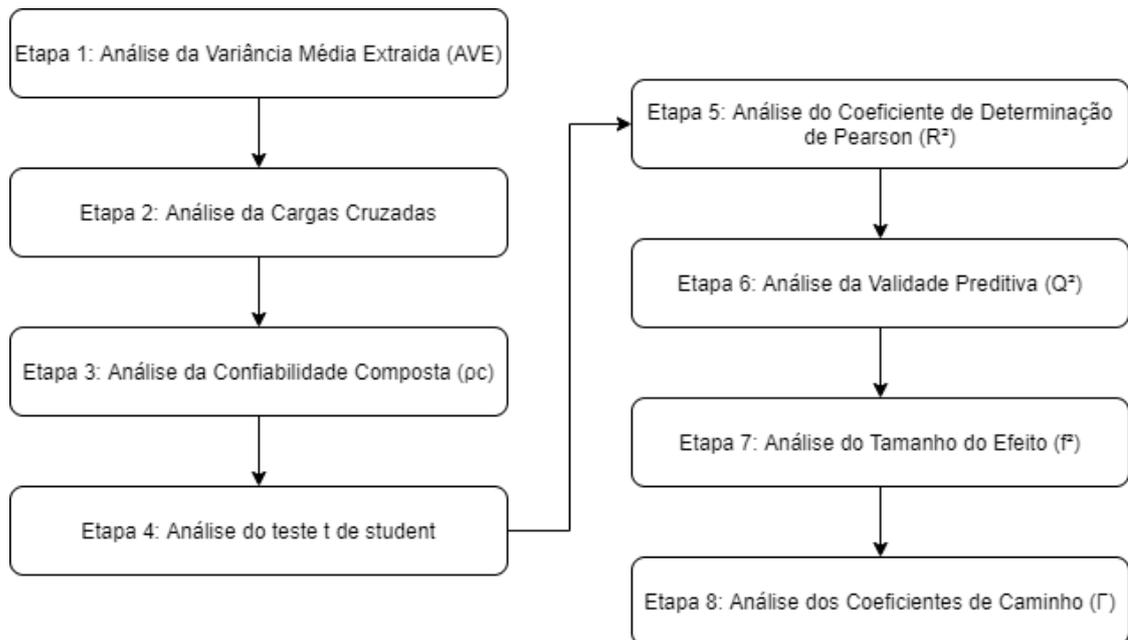
No quinto passo, foi verificada a precisão preditiva do modelo; para isso é utilizado o Coeficiente de Determinação de Pearson (R^2).

Tanto a etapa 6, como a etapa 7, são concluídas utilizando outro módulo no *software* SmartPLS®, o módulo *Blindfolding*. Nesse momento, são calculados os valores de Validade Preditiva (Q^2) e Tamanho do Efeito (f^2). A Validade Preditiva avalia se o modelo se aproxima do esperado; em outras palavras, avalia a acurácia do modelo. Enquanto o Tamanho do Efeito avalia a importância de cada constructo para o modelo.

Na última etapa, deve-se interpretar e avaliar os Coeficientes de Caminho (Γ). Esses são os valores que relacionam um constructo ao outro e devem ser interpretados como coeficientes angulares em equações de reta; ou seja, multiplicadores entre um constructo e outro.

A Figura 8 é um fluxograma que demonstra as 8 etapas.

Figura 8: Fluxograma demonstrando as etapas de análise.



Fonte: Próprio Autor.

4 RESULTADOS

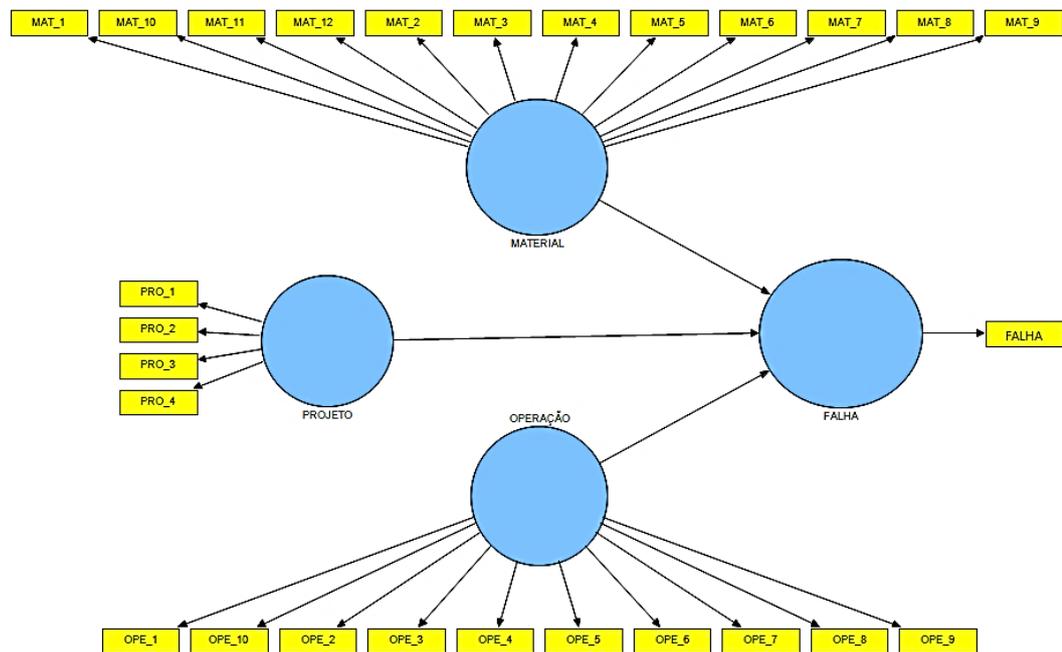
Essa seção será distribuída em subseções para facilitar a explanação dos resultados. A seção inicial é referente ao modelo que utilizou o banco de dados com 36 artigos; e a segunda seção é aquela cujo banco de dados contava com 88 artigos.

4.1 MODELO CONSIDERANDO 36 ARTIGOS

Com o banco de dados de 36 artigos, alguns dos parâmetros de causa das falhas inicialmente levantados não foram citados; assim, eles não deveriam fazer parte do conjunto que alimentaria o modelo e nem do modelo em si. O banco de dados dessa iteração pode ser encontrado no Apêndice A. A Figura 9 mostra como ficou esse modelo estrutural.

Como descrito na seção Materiais e Métodos, a primeira análise deve ser feita observando os valores da Variância Média Extraída (AVE). A Tabela 1 foi extraída do relatório fornecido pelo software SmartPLS® 2.0 M3 e dispõe dos valores da AVE.

Figura 9: Modelo estrutural da iteração com 36 artigos.



Fonte: Próprio Autor.

De acordo com Hair *et al* (2014) o valor da AVE deve ser superior 0,50. Observando-se a Tabela 1, pode-se verificar que em nenhum dos casos isso é atendido, com exceção do constructo FALHA; mas, considerando que essa variável assume o mesmo valor em todos os casos com exceção de um, claramente o constructo representaria toda a variância dos indicadores. No caso dos demais, nenhum deles representa uma quantidade suficiente da variação dos indicadores; o recomendado é que indicadores com pesos baixos sejam retirados, porém, isso não será feito por ora.

Tabela 1: Critérios de qualidade da iteração com banco de dados de 36 artigos.

	AVE	pc	R²
FALHA	1,000	1,000	0,152
MATERIAL	0,116	0,202	-
OPERAÇÃO	0,138	0,486	-
PROJETO	0,329	0,238	-

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que os demais valores encontrados na Tabela 1 não são elevados. Para estudos exploratórios, o valor da confiabilidade composta (ρ_c) se torna aceitável entre 0,60 e 0,70. Já o valores do coeficiente de determinação de Pearson (R^2) são: 0,75; 0,50; 0,25 para precisão alta, média e baixa, respectivamente (Hair *et al*, 2014); podem ser considerados também os valores de 0,26; 0,13 e 0,02 para estudos nas áreas de ciências sociais e comportamentais (Cohen, 1988). Isso permite a reflexão de que algumas áreas específicas de estudo permitem trabalhar com modelos de precisão preditiva menor.

Os valores de confiabilidade composta não atendem o esperado e o coeficiente de correlação de Pearson é considerado baixo. Os constructos MATERIAL, OPERAÇÃO E PROJETO não possuem coeficiente de correlação de Pearson pois são considerados independentes, ou seja, não há nenhum constructo precedente a eles.

As Tabelas 2, 3 e 4 mostram o que cada um dos indicadores significa.

Tabela 2: Indicadores do constructo PROJETO para 36 artigos.

Indicador	Título
PRO_1	Condições do Meio de Trabalho
PRO_2	Definição das cargas
PRO_3	Método de Fabricação Incorreto
PRO_4	Seleção do Material

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3: Indicadores do constructo MATERIAL para 36 artigos.

Indicador	Título
MAT_1	Defeitos de Fabricação
MAT_2	Dureza
MAT_3	Inclusões
MAT_4	Material Não Conforme
MAT_5	Mudança de Fase
MAT_6	Precipitação
MAT_7	Riscado/Rugosidade
MAT_8	Trincas
MAT_9	Vazios

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4: Indicadores do constructo OPERAÇÃO para 36 artigos.

Indicador	Título
OPE_1	Corrosão
OPE_2	Danos Externos
OPE_3	Falta de Manutenção
OPE_4	<i>Fretting</i>
OPE_5	Lubrificação Incorreta
OPE_6	Montagem Incorreta
OPE_7	Temperatura Elevada
OPE_8	Utilização Incorreta
OPE_9	Vibração

Fonte: Próprio Autor.

Apenas com essa análise geral dos critérios de qualidade desse modelo, é possível dizer que esse não representa a variância dos dados coletados, os indicadores não são confiáveis e o modelo tem uma baixa precisão preditiva.

4.2 MODELO CONSIDERANDO 88 ARTIGOS

Logo de início, foi calculado o tamanho mínimo da amostra, que para esse trabalho se refere a quantidade de artigos utilizados no banco de dados. Utilizando o software

G*Power® 3.1.9.7 foi preciso estabelecer alguns valores desejados de variáveis iniciais. Segundo o encontrado em Ringle, Silva, Bido (2014), o valor recomendado para o uso do poder é 0,80 e o valor mediano de tamanho de efeito é 0,15, além do erro probabilístico de 0,05. Outro ponto relevante para esse cálculo é o constructo que recebe o maior número de variáveis; nesse caso o constructo FALHA recebe 3 variáveis, assim o software foi preenchido como ilustrado na Figura 10, e o tamanho mínimo da amostra encontrado foi 77. Destaca-se que, nessa iteração, contam 88 artigos; ou seja, 11 a mais do que o tamanho mínimo da amostra.

Figura 10: Tela utilizada para calcular o tamanho mínimo da amostra.

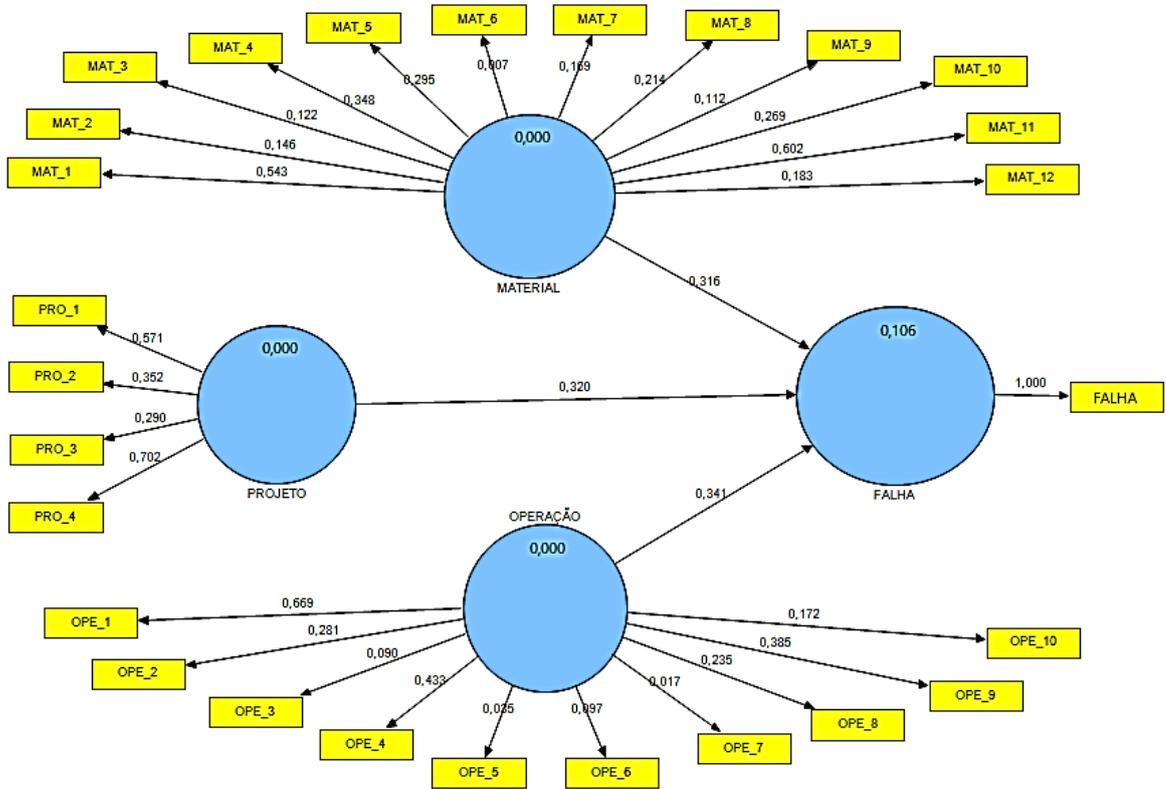
Test family		Statistical test	
F tests		Linear multiple regression: Fixed model, R ² deviation from zero	
Type of power analysis			
A priori: Compute required sample size - given α , power, and effect size			
Input Parameters		Output Parameters	
Determine =>	Effect size f ²	Noncentrality parameter λ	11.5500000
	α err prob	Critical F	2.7300187
	Power (1- β err prob)	Numerator df	3
	Number of predictors	Denominator df	73
		Total sample size	77
		Actual power	0.8017655

Fonte: Próprio Autor.

4.2.1 Primeira iteração

Com o banco de dados de 88 artigos, alguns novos parâmetros de causas de falha começaram a fazer parte do modelo. O banco de dados com o preenchimento da tabela pode ser encontrado no Apêndice B. Assim, a Figura 11 ilustra o modelo para uma primeira iteração, já com os valores dos pesos externos calculados pelo software. Nota-se que o modelo segue o mesmo padrão utilizado na versão anterior, apenas organizado de maneira a facilitar o entendimento.

Figura 11: Modelo estrutural da iteração com 88 artigos.



Fonte: Próprio Autor.

O número de parâmetros aumentou em relação ao modelo com 36 artigos, e cada um dos indicadores, com seu respectivo título, é listado nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5: Indicadores do constructo PROJETO.

Indicador	Título
PRO_1	Condições do Meio de Trabalho
PRO_2	Definição das cargas
PRO_3	Método de Fabricação Incorreto
PRO_4	Seleção do Material

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 6: Indicadores do constructo MATERIAL.

Indicador	Título
MAT_1	Defeitos de Fabricação
MAT_2	Dureza
MAT_3	Fragilização
MAT_4	Inclusões
MAT_5	Material Não Conforme
MAT_6	Mudança de Fase
MAT_7	Porosidade
MAT_8	Precipitação
MAT_9	Riscado/Rugosidade
MAT_10	Tensão residual
MAT_11	Trincas
MAT_12	Vazios

Fonte: Próprio Autor.

Para a avaliação do modelo, será seguido o passo-a-passo descrito na seção Materiais e Métodos. Portanto, a primeira análise a ser feita é da convergência do modelo, observando diretamente a variância média extraída, como pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 7: Indicadores do constructo OPERAÇÃO.

Indicador	Título
OPE_1	Corrosão
OPE_2	Danos Externos
OPE_3	Deterioração
OPE_4	Falta de Manutenção
OPE_5	<i>Fretting</i>
OPE_6	Lubrificação Incorreta
OPE_7	Montagem Incorreta
OPE_8	Temperatura Elevada
OPE_9	Utilização Incorreta
OPE_10	Vibração

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 8: Critérios de qualidade da primeira iteração.

	AVE	ρ_c	R²
FALHA	1,000	1,000	0,106
MATERIAL	0,091	0,454	-
OPERAÇÃO	0,096	0,392	-
PROJETO	0,257	0,552	-

Fonte: Próprio Autor.

Na Tabela 8, está claro que os valores da variância média extraída não atendem o esperado (conforme citado anteriormente, espera-se que esses valores estejam acima de 0,5); inclusive, o resultado dessa versão do modelo é menor do que aquele em que o banco de dados não estava completo.

Nos casos em que a variância média extraída não atinge o aceitável, Hair, Ringle, Sarstedt (2011) recomendam que os indicadores com carregamentos menores que 0,4 sejam removidos do modelo. Isso não será feito neste trabalho, pois caso fosse, o modelo não estaria sendo fiel às causas de falha mais reportadas em toda a literatura relacionada a isso. Observando a Figura 11, se esse critério fosse seguido, dos 26 indicadores que fazem parte do modelo, 20 seriam removidos. Portanto, foi realizada mais uma iteração removendo os indicadores com carregamentos externos inferiores a 0,1.

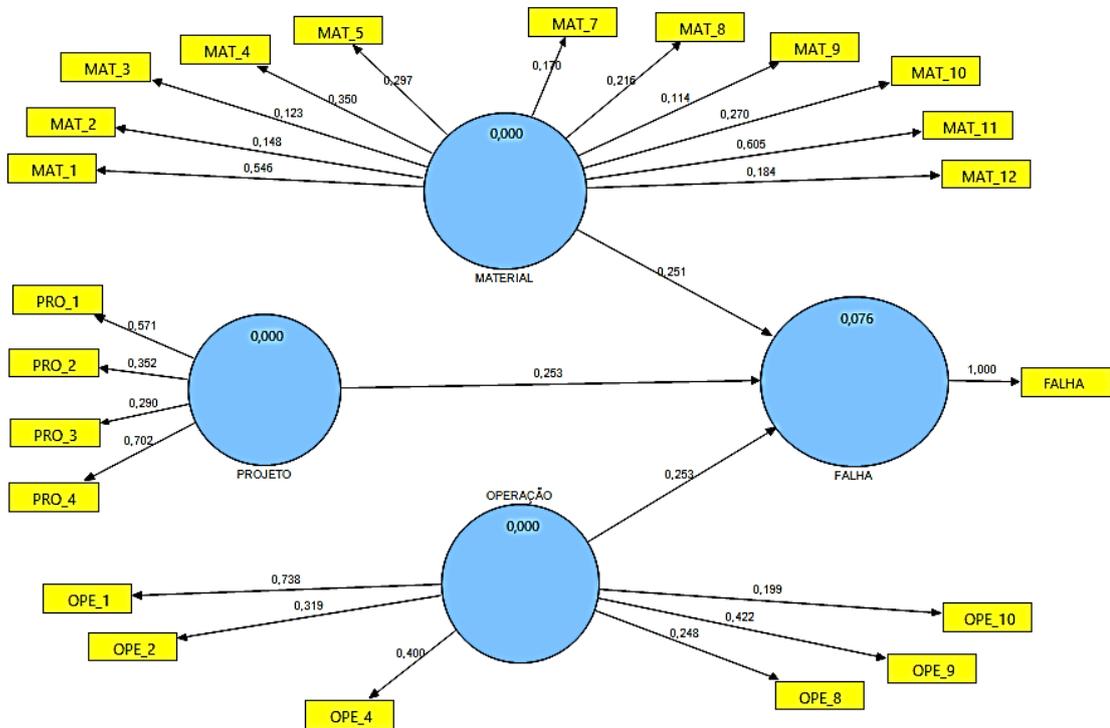
Também é interessante dizer que os valores de confiabilidade composta (ρ_c) estão fora do intervalo aceitável e o coeficiente de correlação de Pearson (R²) é considerado baixo.

4.2.2 Segunda Iteração

Nesse momento, foram removidos os parâmetros: Mudança de Fase, Deterioração, *Fretting*, Lubrificação Incorreta e Montagem Incorreta. O problema da fidelidade às literaturas relacionadas a análise de falha é que esses parâmetros removidos são, de fato, causas de falha comprovadas.

O modelo estrutural da segunda iteração é mostrado na Figura 12.

Figura 12: Modelo estrutural da segunda iteração.



Fonte: Próprio Autor.

Retornando à primeira etapa da análise, vamos verificar a variância média extraída, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Critérios de qualidade da segunda iteração.

	AVE	pc	R²
FALHA	1,000	1,000	0,076
MATERIAL	0,100	0,480	-
OPERAÇÃO	0,181	0,524	-
PROJETO	0,257	0,552	-

Fonte: Próprio Autor.

Os valores da variância média extraída mostrados na Tabela 9 ainda não são satisfatórios, embora tenham aumentado um pouco. Seria possível fazer mais uma iteração e tirar os indicadores com carregamentos externos menores do que 0,2, mas

o modelo começaria a deixar de fazer sentido para análise de falhas. Entretanto, seguem todas as análises recomendadas para avaliar o método PLS-SEM.

Em seguida, avalia-se a validade discriminante do modelo pelo método de *cross loadings*. Para isso, observa-se se cada um dos indicadores tem o maior carregamento em seu próprio constructo. A Tabela 10 mostra cada um dos indicadores e seus carregamentos variados entre constructos.

A grande maioria dos indicadores está relacionada com o constructo correto, com exceção dos indicadores MAT_2 (Dureza) e MAT_9 (Riscado/Rugosidade). Porém, refletindo sobre o que são, de fato, esses indicadores, faz sentido que eles estejam alocados onde estão. Considerando que não serão retirados mais indicadores e realizadas outras iterações, seguem as próximas análises.

Na terceira etapa, avalia-se a confiabilidade do modelo. Para isso, verifica-se, desde a Tabela 9, que os valores de confiabilidade composta (ρ_c) estão abaixo do início do intervalo aceitável (entre 0,6 e 0,7), porém próximos dele.

Tabela 10: Carregamentos cruzados entre constructos.

	FALHA	MATERIAL	OPERAÇÃO	PROJETO
FALHA	1,000	0,099	0,105	0,098
MAT_1	0,053	0,546	-0,244	-0,218
MAT_10	0,023	0,270	-0,106	-0,130
MAT_11	0,056	0,605	0,067	-0,246
MAT_12	0,020	0,184	0,171	-0,121
MAT_2	0,025	0,148	-0,227	0,230
MAT_3	0,019	0,124	-0,077	-0,039
MAT_4	0,029	0,350	-0,217	-0,164
MAT_5	0,029	0,297	-0,213	-0,216
MAT_7	0,016	0,170	-0,025	-0,034
MAT_8	0,022	0,216	-0,017	-0,116
MAT_9	0,020	0,114	-0,116	0,324
OPE_1	0,081	-0,181	0,738	-0,096
OPE_10	0,021	-0,038	0,199	0,084
OPE_2	0,030	-0,140	0,319	-0,173

OPE_4	0,031	-0,251	0,400	-0,178
OPE_8	0,041	0,039	0,248	-0,225
OPE_9	0,031	-0,176	0,422	-0,230
PRO_1	0,046	-0,342	0,084	0,571
PRO_2	0,045	-0,099	-0,154	0,352
PRO_3	0,040	-0,039	-0,274	0,290
PRO_4	0,062	-0,138	-0,247	0,702

Fonte: Próprio Autor.

Na quarta etapa, seria avaliada a significância das relações do novo modelo (considerando um intervalo de confiança de 95%). Porém, não foi possível executar o algoritmo *bootstrapping* no SmartPLS® 2.0 M3. Foi feita uma pesquisa para encontrar a razão disso e, em um fórum do próprio *software*, um dos desenvolvedores afirmou que isso pode acontecer quando algum dos indicadores tem a variância muito baixa. Isso, de fato, acontece, pois o indicador Falha praticamente tem a variância nula, já que a base de dados não contém análises de não-falhas. Isso é comentado mais a fundo na seção Conclusões.

Na quinta etapa, é avaliada a precisão preditiva do modelo através do valor de R^2 . Mais uma vez, observando a Tabela 9, pode-se verificar que o valor de R^2 é baixo; porém, como citado para o modelo de 36 artigos, algumas áreas de estudo permitem que a precisão preditiva do modelo seja baixa. Como não foi encontrado na revisão bibliográfica nenhum trabalho versando sobre a utilização do método PLS-SEM para análise de falhas em materiais metálicos, considera-se o valor de referência padrão sugerido por Hair *et al* (2014) de 0,25. Com isso, o novo modelo segue tendo um valor menor do que considerado como baixo pela literatura.

Em seguida, são analisados Validade Preditiva (Q^2) e Tamanho do Efeito (f^2). A Tabela 11 ilustra os valores encontrados no relatório do *software* SmartPLS® 2.0 M3.

Tabela 11: Valores de Q² e f².

	Q ²	f ²
FALHA	0,035	1,000
MATERIAL	0,116	0,116
OPERAÇÃO	0,227	0,227
PROJETO	0,300	0,300

Fonte: Próprio Autor.

Os valores de Q² devem ser maiores do que 0; e, quanto mais próximo de 1, mais o modelo se aproxima do real. Os valores mostrados na Tabela 11 são maiores do que 0; porém, observado o constructo FALHA, percebe-se que o valor é praticamente 0, de forma que se pode dizer que o modelo não se aproxima do esperado.

Quanto a f², Hair *et al* (2014) estabelecem valor de 0,02; 0,15; 0,35 como baixo, médio e alto, respectivamente. Com isso, pode-se dizer que o constructo MATERIAL tem importância média neste modelo, e os constructos OPERAÇÃO e PROJETO têm importância de média para alta, sendo o constructo PROJETO o de maior importância.

Na última etapa, avaliam-se os coeficientes de caminho (Γ) e buscam-se compreender as relações entre os constructos. Nesse modelo, todos os constructos relacionam-se apenas com o constructo FALHA. A Tabela 12 relaciona os constructos por meio de seus coeficientes de caminho.

Tabela 12: Valores dos Coeficientes de Caminho (Γ).

	FALHA
MATERIAL	0,251
OPERAÇÃO	0,254
PROJETO	0,253

Fonte: Próprio Autor.

Com essas informações, pode-se dizer que o índice da falha é composto pela soma desses constructos multiplicados por seus coeficientes de caminho. Além disso, um termo de erro deve ser considerado. A Equação 1 mostra esse resultado.

$$\text{FALHA} = 0,251 * \text{MATERIAL} + 0,254 * \text{OPERAÇÃO} + 0,253 * \text{PROJETO} + \text{erro} \quad (1)$$

A escala utilizada para desenvolver esse modelo é de 1 a 5. Portanto, é necessário normalizar essa equação, visto que, ao atribuir-se o valor máximo para cada uma das variáveis, o resultado do outro lado da equação não é 5. A equação foi normalizada com (5/3,78) e o resultado está apresentado na Equação 2.

$$\text{FALHA} = 0,331 * \text{MATERIAL} + 0,335 * \text{OPERAÇÃO} + 0,334 * \text{PROJETO} + \text{erro} \quad (2)$$

Com a Equação 2, mostra-se o peso que cada constructo tem na FALHA. Porém, o resultado estaria em uma escala de 1 a 5, sendo que não foram consideradas não-falhas no estudo; ou seja, na teoria, o significado da falha é binário, mais sobre isso será discorrido na seção Conclusão.

O componente erro dessa equação poderia ser obtido pelo método de reamostragem ou *bootstrapping*; porém, como citado anteriormente, não foi possível executar esse algoritmo. Não se pode negligenciar que, apesar desses resultados, o modelo desenvolvido falhou em vários aspectos, o que pode implicar em que essa equação não reflita a realidade.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho era descrever e analisar, utilizando o método estatístico PLS-SEM, análise de falhas em componentes de aço de modo abrangente, considerando desde o início do projeto até o fim da operação, abordando a complexidade de ser um evento influenciado por diversas variáveis, incluindo razões físicas, químicas e comportamentos do ser humano. De fato, isso foi feito. Porém, os índices que garantiriam a relevância e valor estatístico não foram atingidos, bem como as análises conduzidas para verificar se o modelo se ajustaria ao banco dados não foram bem sucedidas.

Algumas especulações podem ser feitas para explicar isso. A primeira delas é que o tamanho do banco de dados, embora atendesse ao requisito inicial, é pequeno.

A sugestão, nesse aspecto, é buscar outras fontes de artigos, ou alterar a *string* de buscas, visto que a utilizada aqui está esgotada.

Outro ponto que pode ser relevante para o sucesso desse modelo em outros trabalhos é uma mudança no conceito de falha utilizado. Neste caso, foram consideradas somente falhas; ou seja, todos os artigos que preencheram o banco de dados continham uma falha. Assim, esse parâmetro não assumiu valores com diferenças significativas, apresentando variância praticamente zero. A sugestão seria diferenciar, por exemplo, falhas catastróficas de falhas não-catastróficas, de forma que a variável assumisse valores diferentes de 1 e 5, e não um valor binário como proposto.

Algumas considerações também podem ser feitas quanto ao método utilizado, existem possibilidade da utilização do método PLS-SEM aplicados a dados DCE (*discrete choices experiments*) e dados categóricos, que são variáveis que recebem os valores de “sim” ou “não”; ou então variáveis booleanas com valores de 0 e 1. A possibilidade de executar o método PLS-SEM baseado em DCM (*discrete choice modelling*) pode gerar resultados interessantes.

Mantendo o modelo proposto, outra sugestão de melhoria é avaliar o modelo considerando seus constructos como formativos e não reflexivos, já que as variáveis latentes são formadas pelos seus respectivos itens, com essa consideração alguns critérios de avaliação seriam diferentes e o resultado dessa avaliação também poderia ser.

Por fim, esperava-se um resultado mais satisfatório, é verdade. Mas isso não torna o resultado obtido nesse trabalho menos significativo; é importante que isso seja utilizado como uma lição aprendida para futuros trabalhos, considerando que não foram encontrados, nas bases de dados científico-acadêmicas, trabalhos com a aplicação do método PLS-SEM à análise de falhas.

REFERÊNCIAS

AKTER, Shahriar; WAMBA, Samuel Fosso; DEWAN, Saifullah. Why PLS-SEM is suitable for complex modelling? An empirical illustration in big data analytics quality. **Production Planning & Control**, [s. l.], v. 28, p. 1011-1021, jul. 2017.

DOI: 10.1080/09537287.2016.1267411

ANDERSON, T.L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**. 2 ed. Florida: CRC Press, 1994. 688 p.

ASKELAND, D.R.; WRIGHT, W.J. **The science and engineering of materials**. 7 ed. Massachusetts: Cengage Learning, 2014. 690p.

BUDYNAS, R. G.; NISBET, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de engenharia mecânica**. Tradução João Batista de Aguiar, José Manuel de Aguiar. 8 ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 1096 p.

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Tradução José Roberto Moraes d'Almeida. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 844 p.

COHEN, J. **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. 2 ed. [s. l.] Lawrence Erlbaum Associates, 1988. 567 p.

Fatigue Failures. *In*: BECKER, W. T.; SHIPLEY, R. J. **Failure Analysis and Prevention**. Ohio: ASM International, 2002. p. 1470-1530. (Coleção ASM Handbook)

FERREIRA, A. B. H. **Dicionário Aurélio básico da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1988.

FILHO, E. B. *et al.* **Conformação Plástica dos Metais**. 6 ed. São Paulo: EPUSP, 2011. 258 p.

HAIR, J. F. *et al.* **A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)**. 1 ed. California: Sage Publications, 2014. 307 p.

HAIR, Joe F.; RINGLE, Christian M.; SARSTEDT, Marko. PLS-SEM: Indeed a Silver Bullet. **Journal of Marketing Theory and Practice**, [s. l.], v. 19, n. 2, p 139-152, 2011. DOI: 10.2753/MTP1069-6679190202

MORIN, E. **A cabeça bem-feita**. Tradução Eloá Jacobina. 8 ed. Rio de Janeiro: Bertrant Brasil, 2003. 128 p.

MOUBRAY, J. **RCM II - Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Tradução Kleber Siqueira. ed Brasileira. [s. l.] Aladon LTD, 2000. 425 p.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. Tradução Konstantinos Dimitriou Stravopoulos *et al.* 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1060 p.

PROBST, A. *et al.* Cost estimation of an asteroid mining mission using partial least squares structural equation modelling (PLS-SEM). **Acta Astronautica**, Neubiberg, v. 167, p.440-454, fev. 2020. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.07.032>. Acesso em 23 set. 2020.

RAMPASSO, Izabela S. *et al.* Maturity analysis of manufacturing cells. **Production Planning & Control**, [s. l.], v. 30, p. 1250-1264, mai. 2019. DOI: 10.1080/09537287.2019.1612108

RINGLE, Christian M.; SILVA, Dirceu; BIDO, Diógenes. Modelagem de Equações Estruturais com Utilização do SmartPLS. **Revista Brasileira de Marketing**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 56-73, mai. 2014. DOI: 10.5585/remark.v13i2.2717

SHACKELFORD, J. F. **Introduction to materials science for engineers.** 8. ed. [s. /.] Pearson, 2014.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. **Using Multivariate Statistics.** 3 ed. [s. /.] Pearson, 2006. 1008 p.

APÊNDICE A – Referências de artigos utilizados no banco de dados

Essa lista de referências está na mesma sequência em que foi utilizada durante a execução do trabalho, os 36 primeiros são aqueles utilizados no primeiro modelo e todos os artigos foram utilizados no segundo modelo.

- 1 Dehnavi, F.; Eslami, A.; et al. A case study on failure of superheater tubes in an industrial power plant. **Engineering Failure Analysis**, v. 80, n. April 2016, p. 368–377, 2017.
- 2 Boromei, I.; Ceschini, L.; et al. Aluminium bronze-steel sliding contact in packaging applications: Failure analysis and lab-scale tribological tests. **Engineering Failure Analysis**, v. 112, n. March, p. 104528, 2020.
- 3 Son, D.; Kim, H.; et al. Analyses of the failures on shear cutting blades after trimming of ultra high-strength steel. **Engineering Failure Analysis**, v. 71, p. 148–156, 2017.
- 4 Valles González, M.P.; González Meije, A.; et al. Determination of the fracture cause in an aircraft motor cylinder. **Engineering Failure Analysis**, v. 82, n. August, p. 816–822, 2017.
- 5 Kishore, K.; Adhikary, M.; et al. Development of wear resistant hammer heads for coal crushing application through experimental studies and field trials. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 79, n. October 2018, p. 185–196, 2019.
- 6 Luder, D.; Hundhausen, T.; et al. Failure analysis and metallurgical transitions in SS 304L air pipe caused by local overheating. **Engineering Failure Analysis**, v. 59, p. 292–303, 2016.
- 7 Dalvi, S.D.; Hariom; et al. Failure analysis of a carbon steel roller shaft of continuous pad steam machine. **Case Studies in Engineering Failure Analysis**, v. 9, n. November, p. 118–128, 2017.
- 8 Shabani, H.; Goudarzi, N.; et al. Failure analysis of a natural gas pipeline. **Engineering Failure Analysis**, v. 84, n. October 2017, p. 167–184, 2018.
- 9 Gagliardi, A.; Lanzutti, A.; et al. Failure analysis of a plate heat exchanger used in a blast chiller. **Engineering Failure Analysis**, v. 92, n. June, p. 289–300, 2018.
- 10 Lanzutti, A.; Magnan, M.; et al. Failure analysis of a safety equipment exposed to EAF environment. **Engineering Failure Analysis**, v. 95, n. June 2018, p. 107–116, 2019.
- 11 Haghghat-Shishavan, B.; Firouzi-Nerbin, H.; et al. Failure analysis of a superheater tube ruptured in a power plant boiler: Main causes and preventive strategies. **Engineering Failure Analysis**, v. 98, n. January, p. 131–140, 2019.
- 12 Pal, U.; Kishore, K.; et al. Failure analysis of boiler economizer tubes at power house. **Engineering Failure Analysis**, v. 104, n. January 2017, p. 1203–1210, 2019.
- 13 Zhao, L.; Chu, F.; et al. Failure analysis of branch connection on the reactor primary pipeline. **Engineering Failure Analysis**, v. 85, n. February 2017, p. 137–148, 2018.
- 14 Gürer, G.; Gür, C.H. Failure analysis of fretting fatigue initiation and growth on railway axle press-fits. **Engineering Failure Analysis**, v. 84, n. November 2017, p. 151–166, 2018.
- 15 Darvishi, P.; Zareie-kordshouli, F.; et al. Failure analysis of syngas bypass line rupture in an industrial ammonia plant. **Engineering Failure Analysis**, v. 84, n. October 2017, p. 59–69, 2018.
- 16 García-Martínez, M.; García de Blas Villanueva, F.J.; et al. Failure analysis of the rod-end bearing of an actuating cylinder. **Engineering Failure Analysis**, v. 104, n. May, p. 292–299, 2019.
- 17 Nasiri, A.M.; Shen, Z.; et al. Failure analysis of tool used in refill friction stir spot welding of Al 2099 alloy. **Engineering Failure Analysis**, v. 84, n. October 2017, p. 25–33, 2018.
- 18 Xu, S.; Meng, W.; et al. Failure analysis of TP304H tubes in the superheated steam section of a

reformer furnace. **Engineering Failure Analysis**, v. 79, n. March, p. 762–772, 2017.

19 Firouzeh, A.; Ranjbar, K.; et al. Failure assessment of ASTM A213-T12 superheater boiler tubes in a natural gas liquid plant. **Engineering Failure Analysis**, v. 89, n. January, p. 15–27, 2018.

20 Senthur Prabu, S.; Choudhary, A.; et al. Failure evaluation of SA 210C raffle water wall tubes in 70 MW CFBC boiler. **Engineering Failure Analysis**, v. 95, n. September 2018, p. 239–247, 2019.

21 Ravindranath, K.; Alazemi, R. Failure of stainless steel 304L air cooler tubes due to stress corrosion cracking caused by organic chlorides. **Engineering Failure Analysis**, v. 102, n. January, p. 79–86, 2019.

22 Pantazopoulos, G.; Pressas, I.; et al. Fatigue failure analysis of a Ø14 B500C steel rebar: Metallurgical evaluation and numerical simulation. **Engineering Failure Analysis**, v. 101, n. March, p. 180–192, 2019.

23 Prabhakar, M.; Prasad, A.K.; et al. Influence of Metal Forming Process in the Fatigue life of Axle Housings & Failure Investigation. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 2124–2131, 2019.

24 Otunniyi, I.O.; Olorunoba, D.T.; et al. Metallurgical analysis of the collapse of a telecommunication tower: Service life versus capital costs tradeoffs. **Engineering Failure Analysis**, v. 83, n. October 2017, p. 125–130, 2018.

25 Varnosfaderani, M.A.; Eslami, A.; et al. Metallurgical aspects of a blowdown pipe failure in a petrochemical plant. **Engineering Failure Analysis**, v. 98, n. June 2018, p. 141–149, 2019.

26 Kiani Khouzani, M.; Bahrami, A.; et al. Metallurgical aspects of failure in a broken femoral HIP prosthesis. **Engineering Failure Analysis**, v. 90, n. January, p. 168–178, 2018.

27 Ahmed, M.H.; El-Zomor, M.A.; et al. Metallurgical failure analysis of twisted-off heavy weight drillpipe. **Engineering Failure Analysis**, v. 112, n. October 2019, p. 104531, 2020.

28 Sarkar, P.P.; Dhua, S.K.; et al. Metallurgical investigation into the failure of an iron ore sintering car pallet. **Engineering Failure Analysis**, v. 63, p. 31–42, 2016.

29 Chandra, K.; Kain, V.; et al. Metallurgical investigation of a heat-exchanger tube of 70/30 cupronickel failed by fretting corrosion. **Engineering Failure Analysis**, v. 116, n. July, p. 104756, 2020.

30 Krishnakumar, K.; Selvakumar, A. Metallurgical investigation of failure analysis in industrial machine components. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 2076–2080, 2019.

31 Tawancy, H.M. On the comparative degradation of selected Cr₂O₃-forming alloys by high-temperature carburization with a case study involving 310 stainless steel. **Engineering Failure Analysis**, v. 110, n. October 2019, p. 104402, 2020.

32 Srnc Novak, J.; Lanzutti, A.; et al. On the damage mechanisms in a continuous casting mold: After-service material characterization and finite element simulation. **Engineering Failure Analysis**, v. 94, n. July, p. 480–492, 2018.

33 Díaz, E.; Soria, L.; et al. Post-failure life evaluation: A corrosion-fatigue case history. **Engineering Failure Analysis**, v. 105, n. January, p. 828–836, 2019.

34 Bertuccioli, C.; Ceschini, L.; et al. Steel components for packaging devices in sliding/rolling contact: Metallurgical failure analysis. **Engineering Failure Analysis**, v. 102, n. January, p. 338–350, 2019.

35 Wasnik, D.N. A failure study of condenser tube manufactured from low nickel stainless steels. **Engineering Failure Analysis**, v. 23, p. 69–75, 2012.

36 Ilman, M.N.; Kusmono Analysis of internal corrosion in subsea oil pipeline. **Case Studies in Engineering Failure Analysis**, v. 2, n. 1, p. 1–8, 2014.

37 Nasirpouri, F.; Mostafaei, A.; et al. Assessment of localized corrosion in carbon steel tube-grade AISI 1045 used in output oil-gas separator vessel of desalination unit in oil refinery industry. **Engineering Failure Analysis**, v. 40, p. 75–88, 2014.

- 38 Torres, Y.; Gallardo, J.M.; et al. Brittle fracture of a crane hook. **Engineering Failure Analysis**, v. 17, n. 1, p. 38–47, 2010.
- 39 Sha, W.; Malinov, S. Cantilever steel post damaged by wind. **Case Studies in Engineering Failure Analysis**, v. 2, n. 2, p. 162–168, 2014.
- 40 Roffey, P. Case study: Failure of a high nitrogen stainless steel femoral stem. **Engineering Failure Analysis**, v. 20, p. 173–182, 2012.
- 41 Wallstabe, R.; Klinger, C. Cause of an implant fracture: Material- or fabrication failure? **Engineering Failure Analysis**, v. 25, p. 261–270, 2012.
- 42 Daneshvar-Fatah, F.; Mostafaei, A.; et al. Caustic corrosion in a boiler waterside tube: Root cause and mechanism. **Engineering Failure Analysis**, v. 28, p. 69–77, 2013.
- 43 Srikanth, S.; Sankaranarayanan, T.S.N.; et al. Corrosion in a buried pressurised water pipeline. **Engineering Failure Analysis**, v. 12, n. 4, p. 634–651, 2005.
- 44 Yu, Z. wei; Xu, X. lei Cracking damage of diesel engine injector nozzles. **Engineering Failure Analysis**, v. 16, n. 1, p. 112–118, 2009.
- 45 Chen, G.; Wang, X.; et al. Damage investigation of the aged aluminium cable steel reinforced (ACSR) conductors in a high-voltage transmission line. **Engineering Failure Analysis**, v. 19, n. 1, p. 13–21, 2012.
- 46 Rathod, D.W.; Pandey, S.; et al. Experimental analysis of dissimilar metal weld joint: Ferritic to austenitic stainless steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 639, p. 259–268, 2015.
- 47 Espadafor, F.J.; Villanueva, J.B.; et al. Experimental and dynamic system simulation and optimization of a centrifugal pump-coupling-engine system. Part 1: Failure identification. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, n. 1, p. 1–11, 2011.
- 48 Ilman, M.N.; Barizy, R.A. Failure analysis and fatigue performance evaluation of a failed connecting rod of reciprocating air compressor. **Engineering Failure Analysis**, v. 56, p. 142–149, 2015.
- 49 Yu, Z.W.; Xu, X.L. Failure analysis and metallurgical investigation of diesel engine exhaust valves. **Engineering Failure Analysis**, v. 13, n. 4, p. 673–682, 2006.
- 50 Torkar, M.; Tehovnik, F.; et al. Failure analysis at deep drawing of low carbon steels. **Engineering Failure Analysis**, v. 40, p. 1–7, 2014.
- 51 Prasanthi, T.N.; Sudha, C.; et al. Failure analysis of a 304 steel component aged at 623K. **Engineering Failure Analysis**, v. 31, p. 28–39, 2013.
- 52 Nasirpouri, F.; Alizadeh, H.; et al. Failure analysis of a carbon steel screw under the service in the presence of hydrogen sulphide. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, n. 8, p. 2316–2323, 2011.
- 53 Ashrafizadeh, H.; Karimi, M.; et al. Failure analysis of a high pressure natural gas pipe under split tee by computer simulations and metallurgical assessment. **Engineering Failure Analysis**, v. 32, p. 188–201, 2013.
- 54 Boniardi, M.; D’Errico, F.; et al. Failure analysis of a motorcycle brake disc. **Engineering Failure Analysis**, v. 13, n. 6, p. 933–945, 2006.
- 55 Zheng, S. qi; Chen, L. qiang; et al. Failure analysis of an A333Gr6 pipeline after exposure to a hydrogen sulfide environment. **Engineering Failure Analysis**, v. 35, p. 516–523, 2013.
- 56 Yu, Z.; Xu, X. Failure analysis of an idler gear of diesel engine gearbox. **Engineering Failure Analysis**, v. 13, n. 7, p. 1092–1100, 2006.
- 57 Lancha, A.M.; Serrano, M.; et al. Failure analysis of a river water circulating pump shaft from a NPP. **Engineering Failure Analysis**, v. 8, n. 3, p. 271–291, 2001.
- 58 Kan, W.B.; Pan, H.L. Failure analysis of a stainless steel hydrotreating reactor. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, n. 1, p. 110–116, 2011.

- 59 Barella, S.; Bellogini, M.; et al. Failure analysis of a steam turbine rotor. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, n. 6, p. 1511–1519, 2011.
- 60 Peng, C.H.; Liu, Z.Y.; et al. Failure analysis of a steel tube joint perforated by corrosion in a well-drilling pipe. **Engineering Failure Analysis**, v. 25, p. 13–28, 2012.
- 61 Pilone, D.; Brotzu, A.; et al. Failure analysis of connecting bolts used for anchoring streetlights of a mountain highway. **Engineering Failure Analysis**, v. 48, p. 137–143, 2015.
- 62 Xu, X.; Yu, Z. Failure analysis of diesel engine flywheel ring-gears. **Engineering Failure Analysis**, v. 12, n. 1, p. 25–34, 2005.
- 63 Ul-Hamid, A.; Tawancy, H.M.; et al. Failure analysis of furnace radiant tubes exposed to excessive temperature. **Engineering Failure Analysis**, v. 13, n. 6, p. 1005–1021, 2006.
- 64 Jha, A.K.; Swathi Kiranmayee, M.; et al. Failure analysis of maraging steel fasteners used in nozzle assembly of solid propulsion system. **Engineering Failure Analysis**, v. 27, p. 308–313, 2013.
- 65 Majid, Z.A.; Mohsin, R.; et al. Failure analysis of natural gas pipes. **Engineering Failure Analysis**, v. 17, n. 4, p. 818–837, 2010.
- 66 Bhattacharyya, S.; Banerjee, A.; et al. Failure analysis of oxygen hose of the lance equipment in LD shop of Tata steel. **Engineering Failure Analysis**, v. 15, n. 8, p. 1019–1026, 2008.
- 67 Azevedo, C.R.F.; Hippert, E. Failure analysis of surgical implants in Brazil. **Engineering Failure Analysis**, v. 9, n. 6, p. 621–633, 2002.
- 68 Li, Y.; Xu, N.; et al. Failure analysis of the 304 stainless steel tube in a gas analyzer. **Engineering Failure Analysis**, v. 20, p. 35–42, 2012.
- 69 Ranjbar, K.; Abasi, A. Failure assessment of crude oil preheating tubes in mono ethylene glycol-water mixture solution. **Engineering Failure Analysis**, v. 31, p. 161–167, 2013.
- 70 Kain, V.; Chandra, K.; et al. Failure of carbon steel tubes in a fluidized bed combustor. **Engineering Failure Analysis**, v. 15, n. 1–2, p. 182–187, 2008.
- 71 Sekercioglu, T. Failure study of pneumatic rock drill piston. **Engineering Failure Analysis**, v. 13, n. 7, p. 1108–1115, 2006.
- 72 Azevedo, C.R.F.; Henriques, A.M.D.; et al. Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor. **Engineering Failure Analysis**, v. 16, n. 1, p. 136–151, 2009.
- 73 Anderson, M.J.; McGuire, K.; et al. Identifying the dominant failure mode in the hot extrusion tooling used to forge nickel based superalloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 1, p. 111–119, 2013.
- 74 Lee, J.; Han, S.; et al. Metallurgical analysis of failed jaws used in joint of a water supply pipe line. **Engineering Failure Analysis**, v. 26, p. 266–273, 2012.
- 75 Pavan, A.H.V.; Vikrant, K.S.N.; et al. Metallurgical analysis of SA-106 Gr. B pipe failure during hot bending. **Case Studies in Engineering Failure Analysis**, v. 1, n. 2, p. 120–130, 2013.
- 76 Lancha, A.M.; Lapeña, J.; et al. Metallurgical failure analysis of a BWR recirculation pump shaft. **Engineering Failure Analysis**, v. 7, n. 5, p. 333–346, 2000.
- 77 Krishnadev, M.; Larouche, M.; et al. Metallurgical failure analysis of a Guy rope assembly. **Engineering Failure Analysis**, v. 15, n. 7, p. 894–902, 2008.
- 78 Jha, A.K.; Sreekumar, K.; et al. Metallurgical failure analysis of the 560 mm dia 0.15C-1.25Cr-1Mo-0.25V steel pressure vessel. **Engineering Failure Analysis**, v. 17, n. 4, p. 802–809, 2010.
- 79 Sudhakar, K. V. Metallurgical investigation of a failure in 316L stainless steel orthopaedic implant. **Engineering Failure Analysis**, v. 12, n. 2, p. 249–256, 2005.
- 80 Sapate, S.G.; Didolkar, V.K. Metallurgical investigation of failure of coal mill drag chain pin. **Materials and Design**, v. 30, n. 7, p. 2623–2629, 2009.

- 81 Pantazopoulos, G.; Vazdirvanidis, A. Metallurgical investigation on fatigue failure of stainless steel chain in a continuous casting machine. **Engineering Failure Analysis**, v. 16, n. 5, p. 1623–1630, 2009.
- 82 Shirinzadeh-Dastgiri, M.; Mohammadi, J.; et al. Metallurgical investigations and corrosion behavior of failed weld joint in AISI 1518 low carbon steel pipeline. **Engineering Failure Analysis**, v. 53, p. 78–96, 2015.
- 83 Sekercioglu, T.; Kovan, V. Pitting failure of truck spiral bevel gear. **Engineering Failure Analysis**, v. 14, n. 4, p. 614–619, 2007.
- 84 Deflorian, F.; Rossi, S. Premature corrosion failure of structural highway components made from weathering steel. **Engineering Failure Analysis**, v. 9, n. 5, p. 541–551, 2002.
- 85 Govindarajan, N.; Gnanamoorthy, R. Study of damage mechanisms and failure analysis of sintered and hardened steels under rolling-sliding contact conditions. **Materials Science and Engineering A**, v. 445–446, p. 259–268, 2007.
- 86 McDonald, B.; Ross, B.; et al. The Bellevue crane disaster. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, n. 7, p. 1621–1636, 2011.
- 87 Chao, J.; Peña, C. Effect analysis of an arc-strike-induced defect on the failure of a post-tensioned threadbar. **Case Studies in Engineering Failure Analysis**, v. 5–6, p. 1–9, 2016.
- 88 Kim, S.; Yu, H.; et al. Failure analysis and structural improvement for cracked circular finned tube. **Engineering Failure Analysis**, v. 92, n. January 2017, p. 95–106, 2018.

