

6 Análise do Modo e do Efeito da Falha - FMEA

O FMEA, do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*, é um método usado no desenvolvimento de produto e processo para o desenvolvimento de ações de melhoria para a minimização ou eliminação de falhas consideradas mais críticas segundo alguns critérios. Pode ser aplicado tanto na melhoria de produto quanto na melhoria de processo de fabricação. Em caso de novos produtos ou processos, o FMEA pode ser usado para desenvolver ações que visem minimizar a chance de ocorrência de uma falha potencial.

Assim, o método FMEA, quando aplicado a produto ou processo, foca no desenvolvimento de possíveis ações de melhoria, corretivas/preventivas, a partir da determinação de:

- Todos os possíveis modos de falhas;
- Os efeitos de cada modo de falha sobre o desempenho do produto ou processo;
- As causas dos modos de falhas;

A partir dessa análise, a priorização para a tomada de ações para a eliminação/minimização de falhas é feita com base nos critérios de:

- Gravidade (severidade) do efeito: qual a severidade da efeito da falha no cliente;
- Ocorrência da falha: a partir da análise da causa e de outras evidências, qual a frequência de ocorrência da falha;
- Detecção da falha: qual a chance de se detectar a ocorrência da falha antes que ela gere o efeito indesejável no cliente;

A partir da quantificação do risco baseado na combinação desses três fatores, as ações são priorizadas e implementadas. A figura 6.1 ilustra esse processo.

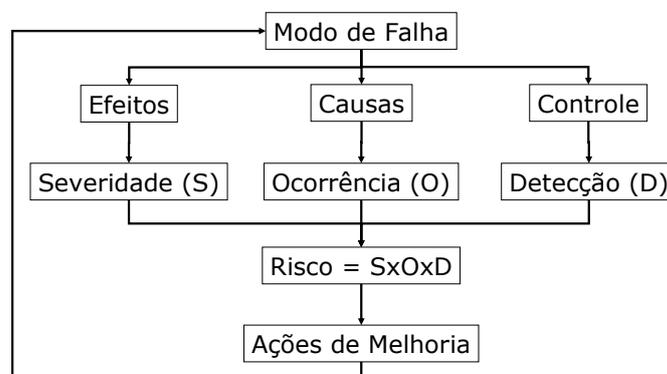


Figura 6.1 – Método FMEA para a priorização de ações de melhoria.

O método FMEA (inicialmente denominado FMECA – *Failure Mode Effects and Criticality Analysis*) foi desenvolvido nos Estados Unidos (USA) por iniciativa do exército americano para aplicações no desenvolvimento de produto e processo da indústria bélica e aeroespacial. A partir da década de 80, com a grande disseminação das práticas de gestão da qualidade, o FMEA começou a ser mais difundido como técnica para eliminação de problemas e melhoria. A norma QS9000, sobre sistema da qualidade, desenvolvido pelas montadoras americanas em 1994, incluía como requisito de gestão da qualidade a utilização de FMEA em produto e processo. Atualmente, a norma ISO/TS16949:2002 – *Quality management systems – particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations*, adotada pela cadeia produtiva do setor automotivo, também estabelece o uso de FMEA como requisito de gestão da qualidade.

6.1 Etapas do Método FMEA

O método FMEA inclui três etapas, conforme segue e ilustrado na figura 6.2:

- Etapa I: nessa etapa são identificadas as falhas, as possíveis causas e os meios existentes de detecção da falha. Em função dessa análise, são definidas as notas para severidade, ocorrência e detecção para em seguida definir as falhas de solução prioritária, com base no indicador RPN – Número de Prioridade de Risco.
- Etapa II: Após a análise de causas das falhas e meios de detecção existentes e tendo em vista a ordem de prioridade de resolução das falhas, devem-se definir planos de ação para a eliminação ou minimização das falhas prioritárias.
- Etapa III: Após a implementação das ações propostas, a equipe de FMEA deve re-analisar as falhas, ocorrências e detecção, para avaliar se as ações propostas eliminaram ou minimizaram a ocorrência das causas das falhas.

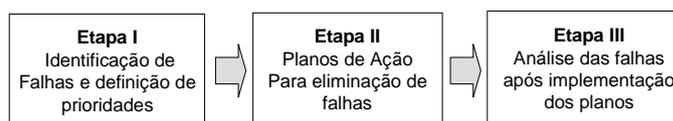


Figura 6.2 – Etapas do método FMEA.

A aplicação de FMEA a um produto ou a componentes desse produto normalmente leva à aplicação do FMEA também aos processos de fabricação desse

produto, pois normalmente existe uma interligação entre o FMEA de um produto/componente e de seus processos. Portanto, a aplicação do FMEA deve ser feita considerando a árvore do produto e o fluxograma de processos de fabricação do produto.

O desenvolvimento e a documentação do FMEA é feita por meio de tabelas padronizadas, conforme ilustrado na figura 6.3. O preenchimento dessa tabela é explicado na próxima seção.

FUNÇÃO DO PRODUTO OU REQUISITOS DO PROCESSO	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO POTENCIAL DE FALHA	S / G	CAUSA / MECANISMO POTENCIAL DA FALHA	O	CONTROLES ATUAIS DO PROCESSO	D	R / NPR	AÇÕES RECOMENDADAS	RESPONSÁVEL E PRAZO	RESULTADO DAS AÇÕES								
											AÇÕES TOMADAS	ÍNDICES REVISTOS							
												S / G	O	D	NPR				
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Etapa I</div> → <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-left: 20px;">Etapa II</div> → <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-left: 20px;">Etapa III</div>																			

Figura 6.3 – Tabela do FMEA.

6.2 Tabela FMEA

O campo superior da tabela é um cabeçalho, que deve ser preenchido com informações sobre o item ou processo sendo analisado, responsável e equipe do FMEA, data e outras informações descritivas sobre o produto ou processo sendo analisado. Os outros campos são detalhados a seguir.

Campos Item e Função/Requisito

No FMEA do produto, a primeira coluna à esquerda indica qual o item sendo analisado. Por exemplo, sendo o produto uma bicicleta, o item sendo analisado pode ser por exemplo o quadro ou a roda. A segunda coluna, função, tem por objetivo caracterizar qual é a função do item, incluindo especificação técnica. Por exemplo no caso do quadro de bicicleta sustentar peso de até 1500 kgf.

No caso de FMEA de processo, o campo seria a etapa do processo de fabricação, por exemplo, soldar peça A com peça B. O campo função é substituído por requisito e o objetivo é especificar o processo da forma mais completa possível. No caso da solda, deve-se incluir informações sobre o tipo de solda e especificações do cordão de solda.

Campo Modo de Falha

Nesse campo, deve-se listar os modos de falha. Entende-se por modo de falha os eventos que causam uma diminuição parcial ou total da função do produto ou processo e de suas metas de desempenho. Ou seja, no caso de produto, o modo de falha é o defeito, o problema que o produto apresenta. No caso do processo, o modo de falha corresponde às não conformidades que o processo gera. Ou seja, resultados fora do especificado. A figura 6.4 apresenta exemplos de falha de produto e processo. O detalhamento das falhas pode ser auxiliado pela construção de uma árvore de falhas.

FMEA Produto				FMEA Processo			
ITEM	FUNÇÃO E REQUISITOS DO PROCESSO	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO POTENCIAL DE FALHA	ITEM	FUNÇÃO E REQUISITOS DO PROCESSO	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO POTENCIAL DE FALHA
Quadro	Sustentar carga até 1500 kgf	Quebra		Processo	Soldar peças A e B	cordão fora da especificação	
		corrosão				eletrodo fora da especificação	
						equipamento desajustado	

Figura 6.4 – Exemplos de modos de falha de FMEA de produto e processo.

Campo Efeito Potencial da Falha

Nesse campo, descreve-se os efeitos dos modos de falha no desempenho do produto ou resultado do processo. É o que o cliente, consumidor final ou cliente intermediário, observa Pergunte-se: o que acontecerá se ocorrer o tipo de falha descrito? Quais conseqüências poderão sofrer o cliente? No caso de processo, o cliente pode ser o próximo processo ou o cliente final. E a descrição deve incluir o efeito nos próximos processos e no consumidor final. No exemplo da figura 6.4, a quebra do quadro é um efeito que normalmente aparece sem aviso prévio. Em uma situação como essa o efeito mais grave da quebra do quadro pode ser um acidente com vítima fatal. Já o efeito da corrosão dificilmente levaria a um acidente; a corrosão é um processo progressivo que primeiro compromete a estética, em seguida a funcionalidade e a segurança. Portanto, o efeito mais grave mais provável seria a redução da vida útil da bicicleta.

Campo Severidade

Após a caracterização do modo e efeito da falha, deve-se avaliar a severidade, ou seja a gravidade para o cliente do efeito dessa falha. A severidade ou gravidade da falha deve ser traduzida numa escala de 1 a 10. No exemplo da figura 6.4, o efeito da quebra do quadro apresenta altíssima gravidade; além disso, é um tipo de falha que não dá sinal antecipado que a falha vai ocorrer. Portanto seria um efeito de gravidade máxima, nota

10. Já o efeito da corrosão tem uma severidade menor, pois dificilmente colocaria em risco a vida do cliente. Nesse caso, a nota de severidade deve ser alta mas menor que 10. No caso de FMEA de processo, a nota de severidade está relacionada à gravidade para o cliente do efeito dessa falha ou a gravidade da falha no processo de fabricação. No exemplo do processo de soldagem, da figura 6.4, a falha “cordão fora da especificação” pode gerar como efeito o retrabalho dessa não conformidade, caso ela seja detectada, ou pode causar a falha no produto, causando acidente e colocando em risco a saúde do cliente. Em situações como essa, a maior gravidade (efeito sobre o cliente) deve ser considerada.

A tabela 6.1 apresenta uma orientação sugerida no manual APQP¹ para pontuação da severidade de produto ou processo, adotada pela indústria automobilística.

Campo Causa Potencial da Falha

Nesse campo são enumeradas todas as possíveis causas para ocorrência da falha. Essas causas podem ser definidas com o auxílio de diagramas de causa e efeito vistos no capítulo 4. No caso de FMEA de produto, as causas de falha relacionadas à projeto podem ser relacionadas à engenharia do produto ou do processo. Além disso, parte das causas de falha de produto pode ser decorrente de falhas no processo. Ou seja, a causa de uma falha de produto pode ser justamente um modo de falha de um processo. Por exemplo, a falha do quadro de bicicleta pode ser quebrar na solda. Essa falha pode ser causada por uma falha de projeto ou por uma falha no processo de soldagem, por exemplo, cordão de solda fora da especificação, menor que o necessário. Essa inter-relação é ilustrada na figura 6.5.

Tabela 6.1 – Critério para pontuação da severidade da falha do produto.

¹ APQP – Advanced Product Quality Planning – Manual da QS9000:1994.

Severidade:			
Efeito	Critério: Severidade do Efeito Esta classificação é o resultado de quando um modo de falha potencial resulta em um defeito no cliente final e/ou na planta de manufatura/montagem. O cliente final deveria ser sempre considerado primeiro. Se ambos ocorrerem,	Índice de Severidade	
	(Efeito no Cliente)	(Efeito na Manufatura/ Montagem)	
Perigoso sem aviso prévio	Severidade muito alta quando a falha afeta a segurança na operação do produto e/ou envolve não conformidade com a legislação governamental sem aviso prévio	Ou pode pôr em perigo o operador (máquina ou montagem) sem aviso prévio.	10
Perigoso com aviso prévio	Severidade muito alta quando a falha afeta a segurança na operação do produto e/ou envolve não conformidade com a legislação governamental com aviso prévio	Ou pode pôr em perigo o operador (máquina ou montagem) com aviso prévio.	9
Muito Alto	Produto/Item sem operação (perda das funções primárias).	Ou 100% dos produtos podem ter que ser sucateados, ou o veículo/ item reparado no departamento de reparo com um tempo de reparo maior que uma hora.	8
Alto	Produto/Item em operação, mas com níveis de desempenho reduzido. Cliente muito insatisfeito.	Ou os produtos podem ter que ser selecionados e uma parte (menor que 100%) sucata, ou o veículo/item reparado no departamento de reparo com um tempo de reparo entre 0,5 hora a 1 hora.	7
Moderado	Produto/Item em operação, mas item(s) de Conforto/Conveniência inoperável (is). Cliente insatisfeito.	Ou uma parte (menor que 100%) dos produtos podem ter que ser sucateados sem seleção, ou o veículo/item reparado no departamento de reparo com um tempo de reparo menor que 0,5 hora.	6
Baixo	Veículo/Item em operação, mas item(s) de Conforto/Conveniência operável (is) com níveis de desempenho reduzidos.	Ou 100% dos produtos podem ter que ser retrabalhados, ou o veículo/ item reparado fora da linha, mas não vai para o departamento de reparo.	5
Muito Baixo	Ítems de ajuste, Acabamento/Chiado e Barulho não conformes. Defeito notado pela maioria dos clientes (mais que 75%).	Ou os produtos podem ter que ser selecionados, sem sucateamento, e uma parte (menor que 100%) ser retrabalhada.	4
Menor	Ítems de ajuste, Acabamento/Chiado e Barulho não conformes. Defeito evidenciado por 50% dos clientes.	Ou uma parte (menor que 100%) dos produtos podem ter que ser retrabalhados, sem sucateamento, na linha mas fora da estação.	3
Muito Menor	Ítems de ajuste, Acabamento/Chiado e Barulho não conformes. Defeito evidenciado por clientes acurados (menos que 25%) .	Ou uma parte (menor que 100%) dos produtos podem ter que ser retrabalhados, sem sucateamento, na linha e dentro da estação.	2
Nenhum	Sem efeito identificado.	Ou pequena inconveniência no operador ou na operação, ou sem efeito.	1

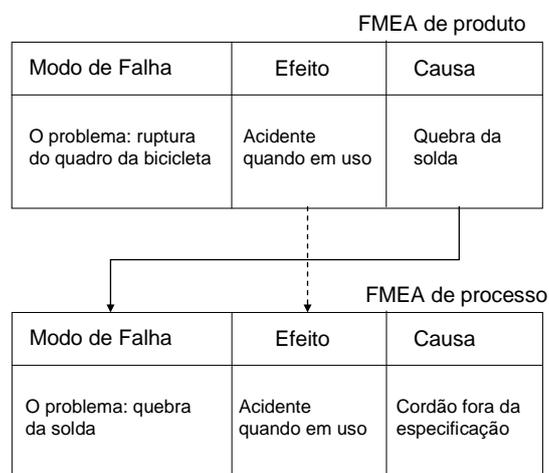


Figura 6.5 – Relação entre causa da falha de produto e modo da falha de processo.

Campo Ocorrência

Após a identificação das possíveis causas das falhas, deve-se avaliar qual a chance dessas causas levarem à ocorrência de falha. A ocorrência também é uma nota numa escala de 1 a 10. Para FMEA de produto ou processo, a nota de ocorrência pode tomar como referência a porcentagem de produtos defeituosos, ou taxa de falhas. A tabela 6.2 apresenta o critério sugerido pelo APQP para pontuação da probabilidade de ocorrência da causa da falha. Em se tratando de causas relacionadas ao projeto do produto, por exemplo, especificação incorreta do cordão de solda, deve-se estimar a chance desse evento em desenvolvimento de produto.

Tabela 6.2 - Critério para pontuação da probabilidade da ocorrência da falha do produto.

Ocorrência		
Probabilidade de falha	Taxas de Falhas	Índice de Ocorrência
Muito Alta: Falhas Persistentes	≥ 100 por mil peças	10
	50 por mil peças	9
Alta: Falhas Frequentes	20 por mil peças	8
	10 por mil peças	7
Moderada: Falhas ocasionais	5 por mil peças	6
	2 por mil peças	5
	1 por mil peças	4
Baixa: Relativamente poucas falhas	0.5 por mil peças	3
	0.1 por mil peças	2
Remota: Falha é improvável	≤ 0.010 por milpeças	1

Campo Controles Atuais

Nesse campo, são listados os mecanismos de controle atuais que tem potencial para detectar as falhas decorrentes das causas ou possíveis causas identificadas. São os controles que podem evitar ou diminuir a chance de a falha ocorrer ou detectar a falha caso ela venha a ocorrer. Os mecanismos de controle podem ser dos seguintes tipos:

- Prevenir que a causa e consequentemente o efeito da falha ocorra ou minimizar a ocorrência. Em FMEA de produto, esse controle pode ser feito por meio de procedimentos de verificação na fase de projeto de produto. Em FMEA de processo, esse controle pode ser feito por um dispositivo à prova de erro. Por exemplo, um gabarito para a execução do cordão de solda que garanta a conformidade dimensional do cordão;

- Detectar a causa da falha e iniciar ação corretiva. Em FMEA de produto, esse tipo de controle corresponde aos testes de produto, seja testes em simulação computacional ou testes de laboratório em protótipos, antes de liberação do produto para produção. Por exemplo, no caso de quebra do quadro, o controle usado pode ser teste de protótipo em laboratório e produção piloto. No caso de FMEA de processo, esse controle seria feito por meio de monitoramento de parâmetros do processo. Por exemplo, no caso do processo de soldagem, poderia ser o controle da amperagem da máquina de solda.
- Detectar a falha. Em FMEA de produto, esse último tipo de controle também é feito por meio de testes no desenvolvimento do produto. Já em FMEA de processos, esse controle corresponde aos procedimento de inspeção, após produção e antes de o produto ser consumido ou usado no próximo processo.

Campo Detecção

Após a identificação do tipo de controle em uso, deve-se atribuir uma nota que expresse a chance desse controle detectar a falha antes que ela ocorra. Esse parâmetro também varia numa escala de 1 a 10. Entretanto, quanto maior a chance de detecção, menor será a nota atribuída. A tabela 6.3 apresenta uma sugestão de critério para atribuição da nota de detecção.

Tabela 6.3 – Critério para atribuição da nota detecção

DETECÇÃO		
Índice	Detecção	Critério
1 2	Muito grande	Certamente será detectado
3 4	Grande	Grande probabilidade de ser detectado
5 6	Moderada	Provavelmente será detectado
7 8	Pequena	Provavelmente não será detectado
9 10	Muito pequena	Certamente não será detectado

Campo RPN

Após atribuição das notas de severidade, ocorrência e detecção, calcula-se o “Número de prioridade de risco” pelo produto entre esses três parâmetros, ou seja:

$$RPN = S \times O \times D$$

A figura 6.6 apresenta a tabela FMEA para o exemplo da Figura 6.4. O preenchimento dessa coluna corresponde à última atividade da primeira etapa do processo de FMEA. A partir da análise desse número, a equipe de FMEA deverá propor e implementar mudanças em produto e processo que possam levar à redução ou eliminação da causa da falha e/ou controles que permitam evitar ou minimizar a chance de ocorrência da causa da falha. Para a implementação e acompanhamento de ações de melhoria, é comum se utilizar da ferramenta chamada 5W2H. Essa ferramenta nada mais é do que uma tabela constando das seguintes informações (figura 6.7):

- O que (What): breve descrição da ação a ser implementada;
- Porque (Why): justificativa para implementação da ação;
- Aonde (Where): em que unidade, processo ou área a ação será implementada;
- Quem (Who): quem será responsável pela implementação da ação;
- Quando (When): quais são as datas de início e fim da ação;
- Como (How): breve descrição sobre como a ação será implementada;
- Custo (How much): indicação dos custos envolvidos.

ITEM	FUNÇÃO E REQUISITOS DO PROCESSO	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO POTENCIAL DE FALHA	S / G	CAUSA / MECANISMO POTENCIAL DA FALHA	O	CONTROLES ATUAIS DO PROCESSO	D	RPN
Quadro	Sustentar Carga até 1500 Kgf	Quebra	acidente	10	sub-dimensionamento do cordão de solda	2	norma de solda e teste do protótipo	2	40
					tipo de solda inadequado	6	Instrução de trabalho padrão	2	120
					processo de solda fora da especificação	7	inspeção visual	8	560
		Corrosão	redução vida útil	6	processo de tratamento anti-corrosão	6	instrução de trabalho	7	252
		pintura descascada	estética insatisfatória	4	processo de pintura	6	inspeção final	2	48

Figura 6.6 – Tabela FMEA de produto: exemplo do quadro de bicicleta.

A última etapa do FMEA tem por objetivo re-avaliar se houve uma diminuição da ocorrência da causa da falha, ou se houve um aumento da detecção da falha, ou ambos. Essas notas de ocorrência e detecção são novamente atribuídas e uma nova avaliação do número de prioridade de risco é feita, dando início a um novo ciclo de ações de melhoria em função das novas prioridades.

O QUE (What)	QUEM (Who)	QUANDO (When)	ONDE (Where)	POR QUE (Why)	COMO (How)	QUANTO CUSTA (How much)

Figura 6.7 – Tabela 5W2H.

6.3 Benefícios e Dificuldades da Aplicação do FMEA

O FMEA, como todos os métodos de gestão da qualidade, propõe um ciclo de melhoria, para redução de falhas, como ilustrado na figura 6.3. Nesse sentido, o principal benefício da adoção do FMEA é o estabelecimento de uma sistemática de análise de falhas reais e potenciais, das causas e dos meios empregados para evitar ou detectar essas falhas. Além disso, o FMEA estabelece um critério objetivo de priorização, o RPN, a partir do qual as ações de melhoria futuras serão priorizadas.

Também da mesma forma que outros métodos de gestão da qualidade, o desenvolvimento do FMEA deve ser feito por equipes multifuncionais e com conhecimentos multidisciplinares. Portanto, a eficácia do FMEA depende muito da qualidade do trabalho da equipe, na correta identificação de falhas de produto e processo, suas causas e meios de empregados para a detecção.

Outro benefício que é ao mesmo tempo uma dificuldade é a necessidade de documentação das análises efetuadas. Como visto na seção anterior, o FMEA é construído a partir de informações registradas em tabelas. Esse é um grande benefício para as empresas, já que o registro dessas análises das falhas e ações tomadas estabelece um histórico de ações, cria memória e torna o conhecimento mais explícito. No entanto, mesmo para uma empresa com produtos com baixo grau de agregação e complexidade tecnológica, o número de tabelas é normalmente grande, o que implica em um grande esforço de registro dessas informações. Some-se a isso a pressão do tempo e a tendência de equipes técnicas em fugir da burocracia, o resultado disso é dificuldade e resistência na utilização do FMEA, tornando o preenchimento das tabelas em um ato puramente burocrático, para atendimento de exigências contratuais ou requisitos de sistemas da qualidade. E a falta de cuidado no preenchimento das informações nas tabelas, como uma correta descrição das causas das falhas e meios de detecção das falhas pode

Carpinetti, L. C. R. (2016) Gestão da qualidade (Cap. 6), GEN-Atlas.

comprometer o potencial de re-utilização das informações registradas e com isso comprometer o principal benefício desse esforço de documentação.

Outra crítica comum ao FMEA é a subjetividade das notas de severidade, ocorrência e detecção e as distorções que essa subjetividade pode causar na definição de prioridades. De fato, por mais que se definam critérios padronizados para atribuição dessas notas, distorções são inevitáveis. No entanto, essas distorções de forma alguma comprometem os avanços e benefícios que podem ser obtidos com a sistemática de identificação das falhas, análise de causas e meios de detecção. No máximo, irão inverter a ordem de prioridades entre duas ou mais ações de melhorias cuja avaliação de prioridade, com base nos critérios definidos pelo FMEA, sejam próximas.

6.4 Outras Técnicas de Análise de Falhas

Além do FMEA, outras técnicas foram desenvolvidas para a análise de falhas, como a Árvore de Falhas (*FTA – Fault Tree Analysis*), baseada no diagrama de processo decisório, apresentado na seção 4.2.6 e, mais recentemente, uma técnica para revisão de projeto, chamada DRBFM – *Design Review Based on Failure Mode*, Revisão de Projeto Baseada nos Modos de Falhas.

Essa técnica foi desenvolvida por Tatsuhiko Yoshimura (2004), engenheiro da Toyota, e sua aplicação ainda é bastante restrita a algumas empresas da cadeia automotiva. Também é ainda muito pouco difundida na literatura acadêmica. Uma exceção é o artigo publicado por Otsuka, Shimizu e Noguchi (2009).

Essa técnica se baseia na aplicação da filosofia chamada *Mizen Boushi* em modificações de projeto. O princípio básico do *Mizen Boushi* é prevenir problemas decorrentes de falhas ou falta de confiabilidade (para o inglês foi traduzido como *Reliability Problem Prevention*). Ou seja, o objetivo é desenvolver soluções que minimizem falhas de produto decorrentes modificações de projeto.

A aplicação desse princípio é feita por meio de um método, desenvolvido por Tatsuhiko Yoshimura, identificado na língua inglesa por GD³, e baseado em três etapas: *Good Design*; *Good Discussion* e *Good Design Review*. Cada uma dessas etapas é desdobrada em um conjunto de planilhas cujo preenchimento induz a equipe de projeto a discutir as modificações de projeto, os possíveis impactos dessas mudanças e as soluções adotadas.

Carpinetti, L. C. R. (2016) Gestão da qualidade (Cap. 6), GEN-Atlas.

Leitura Complementar

Stamatis, D. H. (1995) Failure mode and effect analysis: Fmea from theory. ASQC Quality Press.

Otsuka, Y.; Shimizu, H.; Noguchi, H. *Efficacious design review process including on-the-job training in finding misunderstand errors*. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, v. 16 (3), pp. 281-302, 2009.

Yoshimra, T.; Shimizu, H. *Reliability problem prevention method of stimulating creativity needed to notice problems*. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C 70 (1), pp. 243-250, 2004.