

CONTRIBUIÇÃO CAD/CAE EM ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

Jose Ricardo Menezes Oliveira (UNIT)

ricardokhronos@gmail.com

Glaucia Regina de Oliveira Almeida (UNIT)

glaucia.roalmeida@gmail.com

Eliabe Vitoria Nascimento (UNIT)

eliabenascimento@gmail.com

Kleber Andrade Souza (UNIT)

kasouza_66@hotmail.com

Aislan Silva Primo (UNIT)

asprimo@ig.com.br



Este estudo apresenta a utilização de recursos CAD e CAE como ferramentas de desenvolvimento de novos produtos com proposição ao aumento dos índices de confiabilidade. Para atingir esta meta buscou-se a implementação de um componente do sistema de conformação mecânica por injeção em uma indústria fabricante de chuveiros elétricos. A aplicação de ferramentas qualitativas detectou as falhas críticas do referido sistema e delimitou uma especificação de projeto para concepção de alternativa de solução. A análise por elementos finitos (FEA), permitiu a construção de um novo modelo de agulha para o molde de injeção em consonância às premissas estabelecidas. Decorrido o período da implantação e ajustes pertinentes coletou-se

novas amostras da aplicação prática, cujo objetivo foi comparar aos resultados do sistema convencional. Os resultados consolidados corroboram para um aumento significativo dos critérios de desempenho observados, sobretudo no que concerne às funções taxa de falhas, MTTF, e confiabilidade, permitindo-se inferir que os recursos computacionais, constituem-se como alternativa insofismável para resolução dos problemas projetuais desta natureza.

Palavras-chave: Confiabilidade, FEA, Desenvolvimento de Produto

1. Introdução

Inerente ao atendimento às necessidades dos consumidores somam-se atributos que relacionam aspectos como a incorporação de inovação, reciclagem, e desenvolvimento sustentável, defronte aos paradigmas tradicionais de eficiência e lucratividade. Nesse ínterim a evolução tecnológica possibilitou a inserção de novas ferramentas ao sistema produtivo, como meio de atender as novas demandas, e consequente expansão da dimensão da qualidade, que abrange hoje como um dos fatores primordiais de competitividade, o controle de desgastes, para que se obtenha o pleno funcionamento dos sistemas (SAUNDERS, 2007).

O escopo do processo de desenvolvimento de produto expandiu-se nas últimas décadas incorporando o processo de produção (ROZENFELD, 2006). Inserida no contexto das atividades da fase de desenvolvimento, a engenharia da confiabilidade atua como fator determinante na fase de preparação para a produção, pois as características de projeto de um determinado produto somente serão atendidas na medida em que matrizes, moldes, ferramentas e demais instrumentos de execução, traduzam as metas estabelecidas para o produto final (RICHTER, LOPES, 2004).

Diversos têm sido os esforços para incorporar a avaliação de confiabilidade durante o desenvolvimento do produto a exemplo disso, apresenta-se na literatura um método Bayesiano que permite a utilização de diversas fontes de informação comumente encontradas nas etapas de desenvolvimento do produto (DROGUETT, MOSLEH, 2006). Uma avaliação da confiabilidade de produtos em desenvolvimento através de testes acelerados de vida na indústria petrolífera é citada na literatura (MOURA, FERREIRA, DROGUETT, 2006). O software ReDCAS, Reability Data Collection and Analysis System, que engloba uma coleção de dados de confiabilidade para a metodologia de confiabilidade na avaliação de produtos em desenvolvimento com técnicas Bayesianas (GROEN, DROGUETT, JIANG, MOSLEH, 2004). Além disso, uma abordagem baseada em lógica fuzzy para capturar uma vasta quantidade de conhecimento e informação gerada durante o processo de desenvolvimento do produto pode ser usada para obter uma maior confiabilidade (YADAV, SINGH, CHINNAM, GOEL, 2003).

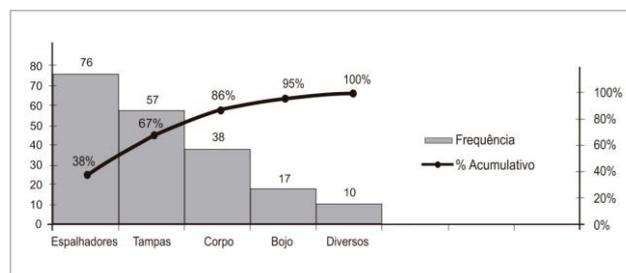
Assim como, um modelo de confiabilidade dinâmica modificado, em que é proposta uma relação entre a função taxa de falha e o sistema de confiabilidade, os parâmetros são estimados através da operação do conjunto fuzzy sobre dimensionamento da tecnologia adotada no novo desenvolvimento do produto (WANG, WAN, YANG, 1993).

Busca-se no estudo de caso desta pesquisa, através de uma metodologia de análise da confiabilidade, estimar a vida em um sistema cujos índices críticos de falhas concentram-se em um componente do molde de injeção do processo de fabricação em uma indústria fabricante de chuveiros elétricos, para em seguida, com o suporte de tecnologia CAD, e CAE, obter uma alternativa que produza um incremento na confiabilidade do processo. Comparar-se-á os dados pré e pós-intervenção através de modelagem e simulação computacional com o objetivo de comprovar cientificamente a plausibilidade de utilização do recurso proposto, verificando-se ao final o impacto das modificações sobre os custos operacionais.

2. Problemas ocorridos no setor de injeção plástica

Para a classificação dos problemas ocorridos no setor de injeção plástica utilizou-se do gráfico de Pareto com base nas ordens de serviço solicitadas. De acordo com (Palady, 1997), esse gráfico é utilizado para demonstrar as causas básicas que conduzem a ocorrência de falha. Através da sua utilização é possível ordenar as ocorrências, da maior para a menor, possibilitando a hierarquia das prioridades para posterior solução. Detectando-se assim os maiores quantitativos de incidência de parada da máquina injetora. Com os dados obtidos verificou-se o índice de frequência das não conformidades dos moldes, demonstrada na Figura 1.

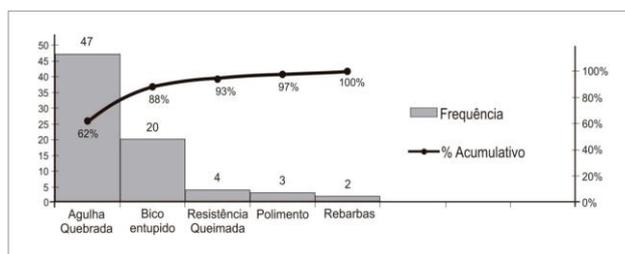
Figura 1 - Ocorrências nos moldes



Fonte: Autores da pesquisa

Pode-se verificar que no período de trinta dias o conjunto de moldes que mais ocasionou parada de produção foram os moldes dos espalhadores. Através desses dados formulou-se um novo gráfico, especificando as causas de parada do molde.

Figura 2: Quantitativos de ocorrências no molde espalhador



Fonte: Autores da pesquisa

Conforme os dados da Figura 2, a ocorrência que mais ocasionou a parada do molde espalhador foi a quebra de agulha. A partir dos dados obtidos no Gráfico de Pareto construiu-se a tabela de Failure Mode and Effects Analysis – FMEA, a fim de avaliar as condições qualitativas em que ocorre a quebra da agulha para definição de uma estratégia que possa ser implementada visando o aumento de produtividade e redução nos custos de manutenção, implementando melhorias ao processo. No período de coleta de dados foram obtidas as seguintes informações referentes aos custos de manutenção, constantes nas Tabelas 01 e 02.

Tabela 1 - Custos de manutenção

Item	Custo (em R\$)
Valor unitário da agulha	37,00
Valor da mão de obra/hora trabalhada	35,00
Valor unitário da resistência	300,00

Fonte: Autores da pesquisa

Tabela 2 - Tempo médio de reparo

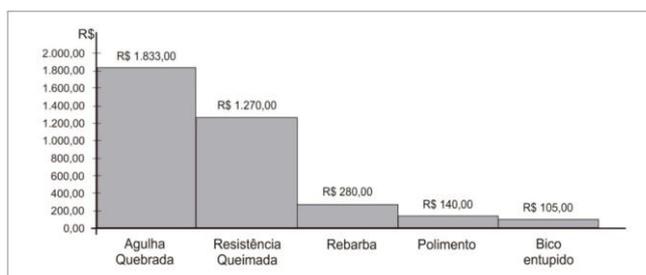
Operação	Tempo (horas)
----------	---------------

Troca de resistência	2
Troca de agulha quebrada	2
Serviço de polimento	4
Limpeza de bico entupido	3
Eliminação de rebarbas	8

Fonte: Autores da pesquisa

Com os dados coletados determinou-se a relação de custos para a manutenção das ocorrências no molde de injeção, pode-se confirmar desse modo que a falha na agulha corresponde aos maiores custos de manutenção, demonstrados na Figura 3.

Figura 3: Custos referentes à manutenção do molde



Fonte: Autores da pesquisa

3. Dados operacionais de tempos até ocorrência de falha para agulha convencional

Com o propósito de se obter os dados de confiabilidade do sistema fez-se um levantamento do Tempo até Falhar (TTF) do componente agulha de injeção, possibilitando quantificar a Taxa de Falha (h), e o Tempo Médio até Falhar (MTTF). Esses resultados serviram como referência para efeitos comparativos, e processo de validação do novo componente, após a sua implementação. A coleta dos dados ocorreu num período de três meses, período no qual uma máquina injetora foi notadamente escolhida por apresentar maior número de paradas para manutenção, dado obtido no histórico fornecido pela empresa. A agulha caracteriza-se como um componente não reparável, e para cada ocorrência tem-se que $t=0$, e para o cômputo da

falha seguinte adicionou-se o período referente à manutenção, dado que esta é a condição *sine qua non* para retorno da atividade.

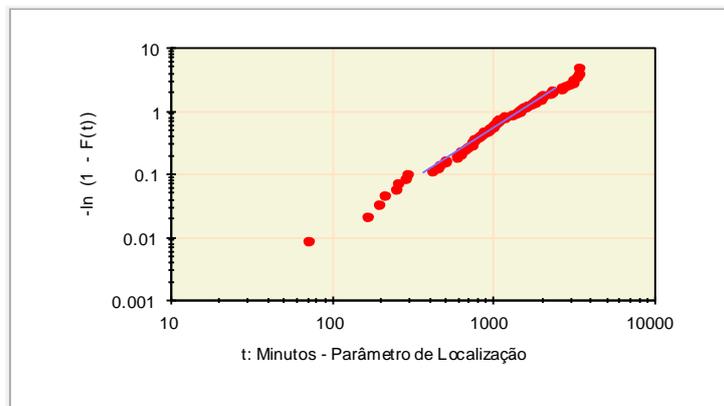
4. Ajustes de Distribuição de Probabilidade ao Modelo de Agulha Convencional

Para o ajuste em consonância aos dados apresentados em três meses obteve-se os parâmetros de distribuição, e as informações pertinentes à construção dos gráficos baseados nos TTF. A verificação do ajuste realizou-se através dos testes de aderência de χ^2 e do modelo analítico de Kolmogorov-Smirnov, sendo que para que a hipótese não seja rejeitada o resultado deve ser aprovado para ambos os testes. Por fim, estabeleceu-se um nível de intervalo de confiança de 95% para todos os casos.

Após os ajustes a modelagem da distribuição Weibull apresentou para o parâmetro de localização o valor de 185,81, o parâmetro de forma β de 1,62, o que significa que há deterioração do componente com $h(t)$ crescente e com tendência a linearidade. Como parâmetro de escala tem-se que α é de 1454,74, e MTTF de 1482,35 minutos. Nos testes de aderência obtiveram-se os seguintes resultados: para o teste de χ^2 o Nível de Significância de 0,35, e para o modelo analítico de Kolmogorov-Smirnov o Nível de Significância de 0,20.

A partir dos ajustes de dados pode-se verificar que os modelos Weibull e Lognormal não tiveram a hipótese rejeitada, porém este último apresentou melhor desempenho nos índices dos testes de aderência, tornando-se o modelo de referência para a amostra. Neste modelo para uma confiabilidade de 95% obteve-se um MTTF de 1503,3 minutos. A plotagem em papel de probabilidade Weibull apresenta-se na figura 4.

Figura 4: Papel de probabilidade Weibull para operação do sistema de injeção



Fonte: Autores da pesquisa

5. Modelagem e simulação de novo produto

De acordo com as diretrizes estipuladas na FMEA, com a utilização do ambiente CAD fez-se uma modelagem da agulha, e com um aplicativo CAE introduziram-se as especificações técnicas para realização de um estudo estático (FEA), com o objetivo de verificar o comportamento do componente no ambiente operacional virtual. Aplicou-se ao modelo convencional as propriedades mecânicas referentes ao material aço trefilado de referência AISI 1045.

Para a realização da análise estática aplicou-se os acessórios de fixação, responsáveis pelas restrições dos graus de liberdade referentes à rotação e translação e recursos de geometria fixa. Não se aplicou recursos avançados de geometria de referência para o corpo, o excesso de restrições aplicadas ao modelo tem como consequência uma estrutura rígida em demasia, e este estado por sua vez distorceria as relações de deformação e tensão.

Com a aplicação efetuada garantiu-se que o deslocamento ocorresse em direção à carga nas superfícies cilíndricas, uma vez que os esforços longitudinais correspondem ao movimento de solda do polímero solidificado, e à força de tração axial que causa a deformação com o consequente alongamento do corpo. Para delimitação destas definições considera-se que o componente integra a parte fixa do molde, havendo grau de liberdade somente no sentido de rotação axial.

Na etapa seguinte deu-se a aplicação das cargas solicitantes. De acordo com o manual de especificações técnicas do fabricante da injetora o sistema hidráulico encarregado pela abertura e extração do produto exerce uma pressão de 50000N/mm². Para determinar o direcionamento da carga de pressão utilizou-se como referência o esforço solicitante no sentido longitudinal, normal à face interna da cabeça da agulha.

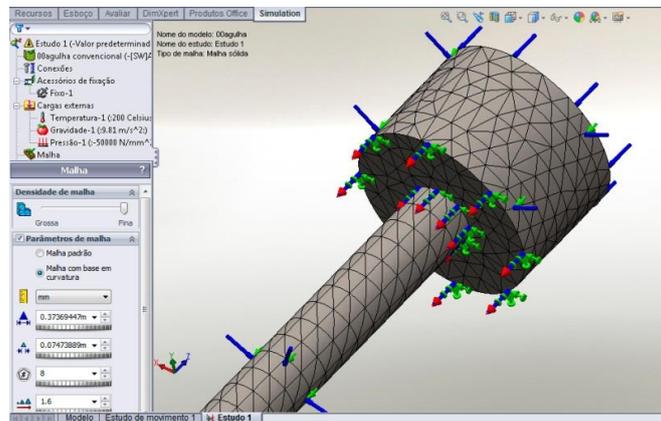
A temperatura de operação durante o processo de injeção pode atingir até 200°C, relativo a este parâmetro a temperatura do componente será uniformemente elevada / reduzida à temperatura de referência à deformação de 28° C (temperatura ambiente). A carga foi aplicada em todas as faces da agulha.

Na última fase de pré-processamento fez-se a geração da malha da geometria, o processo de divisão do modelo matemático em elementos finitos através de discretização, sendo, portanto, as cargas aplicadas aos nós, como demonstra a figura 5.

Concluída a análise através do aplicativo solver do *Simulation* tem-se então a fase de pós-processamento com a plotagem dos resultados de tensão, deslocamentos e deformação.

O valor máximo da tensão de Von Mises de 651 Mpa. Resultado que excede o limite de escoamento do material, 530Mpa. O valor mínimo de tensão distribuída foi de 475 Mpa, localizado na cabeça da agulha, e não há registro de qualquer ocorrência de falhas nesta parte do componente. A utilização de plotagem ISO permitiu verificar que as partes do componente onde a tensão de Von Mises está entre 530 Mpa e 651 Mpa são exatamente a cabeça e o entorno da aresta da terminação do corpo, o que pode contribuir significativamente para a ocorrência de falha.

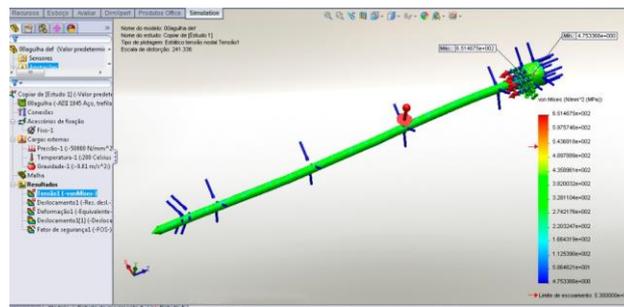
Figura 5: Aplicação de malha sólida



Fonte: Autores da pesquisa

Na Figura 6, demonstra-se a plotagem dos resultados para o deslocamento. O valor resultante máximo, concentrado na terminação do corpo é de 0,0218699 mm. O resultado para a distribuição é consistente com o esperado uma vez que poder-se-ia inferir empiricamente que a falha da agulha se relacionava ao deslocamento excessivo da extremidade.

Figura 6: Plotagem da tensão de nós dos elementos



Fonte: Autores da pesquisa

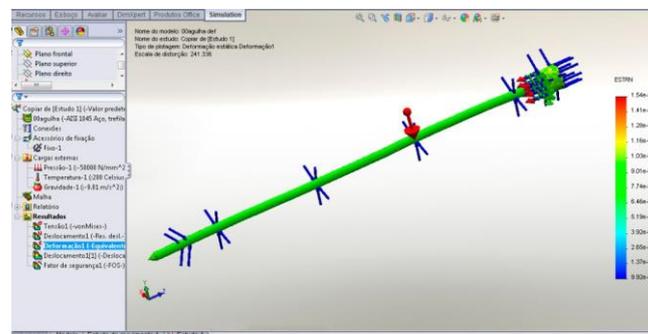
Nestes casos a mudança para um novo tipo de material é uma oportunidade de melhoria, utilizando-se um material com módulo elástico de menor valor, propiciando uma redução na rigidez. Outra oportunidade verificada é a adição de filetes nos cantos vivos.

De acordo com as plotagens pode-se evidenciar que a extremidade da agulha, parte significativa para execução de um produto compatível com as especificações de qualidade, sofre tensões acima do limite de escoamento, desta forma ainda que as forças iniciais sejam removidas quando cessa o movimento de extração pelo sistema hidráulico da injetora, a

agulha não retorna à sua forma original. A cada espalhador que é produzido tem-se deslocamentos que são potencializados ainda pela ação da carga de temperatura, mesmo sem a ação da pressão de extração, submetendo o componente a um pré-tensionamento. A deformação gradativa com diminuição da seção circular transversal devido aos esforços reduz a capacidade de absorção da carga, e após a estricção, a agulha sofre ruptura. A figura 7, mostra a plotagem de deformação do componente.

Com os resultados da FMEA e da FEA elaborou-se uma especificação de projeto para modelagem de um novo componente com os seguintes requisitos: Comprimento máximo da agulha – 51mm; Comprimento máximo da cabeça – 2mm; Diâmetro do local de acoplamento da mavica – 2mm; Diâmetro da agulha – 1mm; Tolerância Dimensional - +0,02; Material – Aço VND - (Equivalência DIN 1.2510 / ANSI e ABNT O1).

Figura 7: Plotagem de deformação



Fonte: Autores da pesquisa

A simulação deve apresentar resultados positivos referentes à exposição ao calor, pressão de extração e a ação da força de gravidade.

A indicação para o tipo material deu-se após discussão focal com o pessoal envolvido na manutenção do sistema. Componentes que utilizam o VND são utilizados nesta indústria, e são comumente empregados na fabricação de ferramentas, principalmente quando estas serão submetidas ao trabalho a quente, e contínuas solicitações mecânicas.

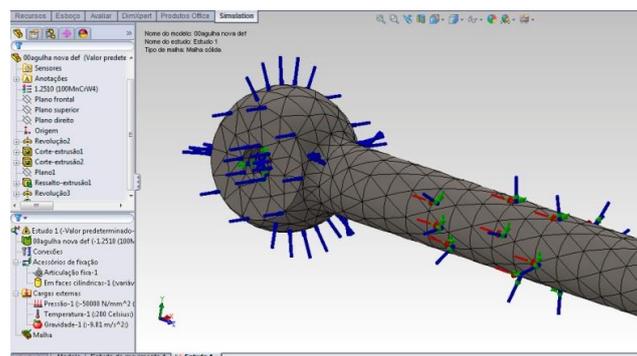
Com os parâmetros das condições de uso apresentados deu-se a concepção de alternativas para solução do problema. Após a modelagem, e simulação CAE foi selecionada a alternativa

que apresentou os melhores resultados. Porquanto o novo componente foi submetido à FEA, adotando-se os procedimentos análogos aos executados para a agulha convencional. O novo estudo permitirá a análise comparativa de performance operacional virtual. Na biblioteca do software consta o material requerido, o qual foi aplicando anexado às suas propriedades mecânicas (ainda que seja possível adicionar novos materiais personalizados, inclusive alterando a composição química).

Para o novo componente utilizou-se recursos avançados de acessório de articulação fixa na cabeça, e de faces cilíndricas com restrições de translação nos sentidos radial, circunferencial, e axial, no corpo da agulha.

As cargas de temperatura, pressão e gravidade seguem estritamente as definições pré-determinadas no modelo convencional. Para as definições de malha optou-se por uma densidade fina com base em curvatura, cujos parâmetros estipulados são o Tamanho Máximo de Elemento - 0.34373186mm, Tamanho de Elemento Mínimo - 0.06874637mm, Número mínimo de elementos em um círculo - 8, e taxa de crescimento de elemento 1.6, demonstrado na Figura 8.

Figura 8: Geração de malha do novo componente



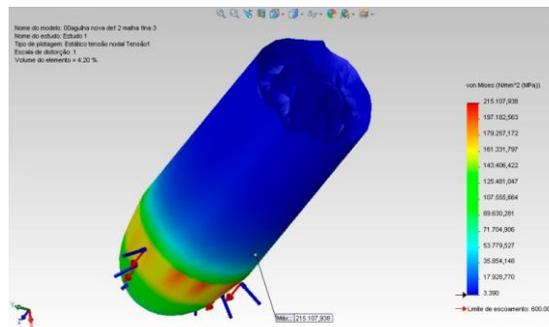
Fonte: Autores da pesquisa

Para os resultados referentes à tensão, deslocamentos, e deformação, obteve-se uma representação de 97.368 nós, 63.746 elementos, e 226.860 graus de liberdade (DOF). A figura 4.40, mostra o resultado de valor máximo da tensão de Von Mises no componente de 215

Mpa, índice muito aquém do limite de escoamento do material que é de 600 MPa. O valor mínimo de tensão foi de 3,3 Mpa localizado à cabeça da agulha.

Com o recurso de plotagem ISO é possível visualizar em detalhe as tensões na terminação do corpo do componente. A modificação do material e da forma, agora em configuração de domo, permitiu uma melhor distribuição de tensão, como mostra a Figura 9.

Figura 9: Recorte ISO da plotagem de tensão na terminação do corpo da agulha



Fonte: Autores da pesquisa

Na Figura 10, tem-se a plotagem para os resultados do deslocamento. O valor resultante máximo, concentrado na terminação do corpo é de 0,301791mm.

Ainda que haja um valor superior à agulha convencional as propriedades mecânicas do material conferem estabilidade ao novo componente, sujeitando-o a suportar maiores valores de deformação sem que haja ruptura.

6. Ajustes de distribuição de probabilidade ao novo modelo de agulha

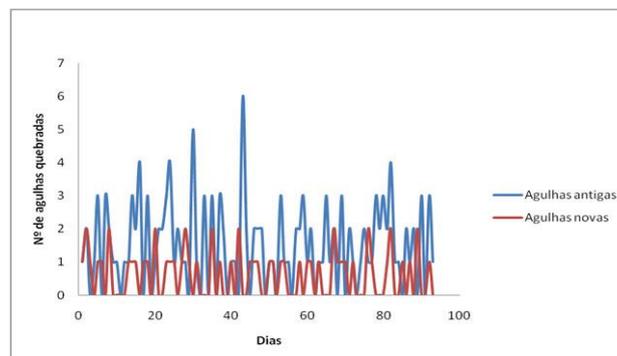
Uma vez implementado o sistema a partir da intervenção com a proposta do novo modelo de agulha realizou-se um novo estudo de ajuste de distribuição com o intuito de determinar a confiabilidade. Submeteu-se a nova amostra aos mesmos procedimentos utilizados para os testes da agulha convencional.

A análise de distribuição Weibull resultante do parâmetro de localização de 446,544 minutos teve como parâmetro de forma β o valor de 1,34, o que significa que $h(t)$ continua crescente,

porém praticamente constante. Para o parâmetro de escala α obteve-se 2307,35, e o MTTF 2565,567 minutos. Com os ajustes de dados para o novo componente pode-se verificar que não obtiveram a hipótese rejeitada os modelos Weibull e Lognormal. Após análises dos resultados dos *p-value* dos testes de aderência constata-se que o modelo Weibull agora é o que melhor descreve o comportamento da amostra.

Os resultados das melhorias implementadas no novo componente demonstram um aumento significativo na performance do sistema. A princípio, sobrepondo os dados coletados nas tabelas de ocorrências, é notável o decréscimo no número de falhas, como mostra a figura 10.

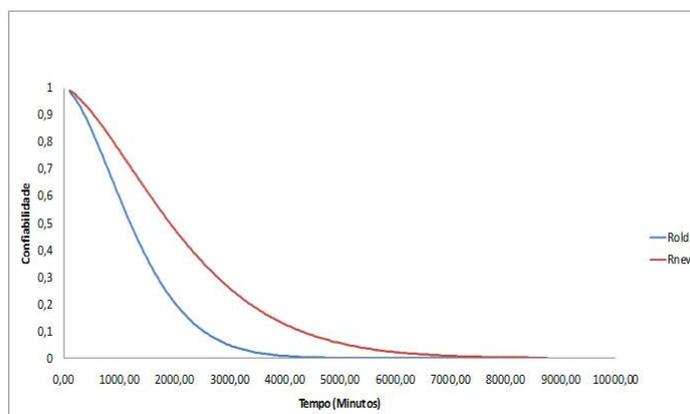
Figura 10: Agulhas quebradas - Modelo Convencional x Modelo Novo



Fonte: Autores da pesquisa

Após as análises comprova-se que em detrimento aos resultados do modelo de agulha convencional em que uma confiabilidade de 95% obteve o tempo de 480,5 minutos, para o novo modelo obteve-se o tempo de 682,5 minutos, o que significa um aumento de 21,2%. A Figura 11, mostra a sobreposição da performance da função confiabilidade para os dois modelos, e denota-se que o tempo de vida do modelo de agulha convencional é inferior ao do modelo de agulha novo em maior parte do tempo.

Figura 11: Funções de Confiabilidade - Modelo Convencional x Modelo Novo



Fonte: Autores da pesquisa

Considerando-se o MTTF de 1503,3 minutos para o modelo convencional e o resultado de modelagem Weibull para o novo componente de 2565,5 minutos. A autonomia em média do sistema passa, portanto, de 25 horas para mais de 44 horas.

Foram registradas para o primeiro período de coleta de dados, referentes ao modelo convencional 82 paradas para manutenção da injetora somente em relação à substituição de agulhas quebradas. Com as ações de implementação do novo modelo durante mesmo período de três meses registraram-se 48 paradas para reposição do componente, uma redução de paradas da ordem de 58,5%. O custo para produção do protótipo experimental foi de R\$ 0,75.

5. Conclusão

O estudo buscou demonstrar que a utilização de recursos tecnológicos de simulação computacional em plataforma CAD e CAE podem contribuir de maneira expressiva para o aumento da confiabilidade no desenvolvimento de novos produtos.

A análise por elementos finitos, em consonância à informatização acelerada dos processos industriais diminuiu significativamente as discrepâncias entre o virtual e o real, ainda que no processo de discretização haja limitações para representação fidedigna do ambiente operacional. As soluções por aproximação evitam demasiado emprego de recursos no desenvolvimento de protótipos.

Nos critérios de desempenho, como o valor de MTTF pode-se constatar a melhoria em todos os índices observados, substancialmente neste em que houve o acréscimo de 70,64%, impactando na redução dos custos de manutenção e oportunidade para deflagração de um plano mais consistente de operacionalização durante os dias críticos para ocorrências de falha. Houve um incremento na confiabilidade do sistema de 42,12%, a um nível de confiança de 95%, para o modelo convencional obteve-se um tempo de 8 horas ao passo que o modelo novo aumentou para 11,37 horas.

O produto concebido no estudo com emprego destes recursos resultou na construção de um componente que utiliza-se de menor quantidade de material, e de menor custo para sua construção do que a alternativa convencional, implicando diretamente na redução dos custos com matéria prima. Porém os melhores resultados residem no incremento da produtividade haja vista que houve queda na taxa de falhas. O novo formato para a cabeça da agulha propiciou ainda um melhor posicionamento para inserção e extração do componente na mavnica, este fato deve redundar na diminuição do tempo de reparo.

REFERÊNCIAS

DROGUETT, E. L. & MOSLEH, A. Análise Bayesiana da Confiabilidade de produtos em desenvolvimento. **Revista Gestão & Produção**. v.13, 2006.

GROEN, F. J.; DROGUETT, E. L.; JIANG, S.; MOSLEH, A. A reliability data collection and analysis system for products under development. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 1, n. 1, 2004.

MOURA, M. J. C; FERREIRA, R. J; DROGUETT, E. L. Assessment of the reliability of products under development via accelerated life testing. In: 3th **International Conference on Production Research – Americas’ Region 2006**, Curitiba, Brazil.

ROZENFELD, H. et al. Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo. 1ª ed. São Paulo. **Saraiva**, 2006.

SAUNDERS, S.C. Reliability, life testing and the prediction of service lives: For Engineers and Scientists. **Springer**. New York. USA, 2007.

YADAV, O. P.; SINGH, N; CHINNAM, R. B; GOEL, P. S. A fuzzy logic based approach to reliability improvement estimation during product development. Reliability Engineering and System Safety, vol. 40, 63 - 74, 2003.

WANG, K.; WAN, E.; YANG, W. A preliminary investigation of new mechanical product development based on reliability theory. Reliability Engineering and System Safety, vol. 40, 187 - 194, 1993.