

# Impactos da implantação e manutenção das emendas à compressão na confiabilidade de linhas aéreas de transmissão

Alberto L. Francato, André Toscano, Carlos D.F Barbosa, Carlos Severino N., Diogo Cecilio, Edson J.R. Luciano, Fabiano Farias, Gabriel M. Lima, Helio Horioka, Marcos Leone F., Paulo S. F. Barbosa, Rogério Lavandoscki, Tiago Forti

**Resumo:** Nas empresas de transmissão de energia há ocorrência de não conformidades nas emendas em cabos de linhas aéreas, causando aumento da taxa de falhas. A inexistência de normas e procedimentos específicos permitem emendas mal prensadas, empenadas serem utilizadas em linhas de transmissão provocando aquecimento, perdas por efeito Joule, aumento da resistência elétrica e queda da tensão mecânica residual provocando rompimento do cabo e diminuição da vida útil do sistema. A descentralização do cabo na luva, bem como o aumento da temperatura de operação também contribuem para a ocorrência de falhas na emenda. A simulação de elementos finitos comprova a necessidade de observância da especificação do fabricante em relação ao uso adequado da matriz de compressão. A Aplicação da metodologia de Engenharia de análise de Falhas associada ao desenvolvimento de Metodologia Multicritério usando Delphi permitirá aos decisores oportunidade de otimizar investimentos com novos conhecimentos e melhor mitigação das falhas.

**Palavras-chave:** Ativos, Confiabilidade, Emendas, Gestão Transmissão

## I. INTRODUÇÃO

A reestruturação no setor elétrico brasileiro na década de 90 aumentou a participação de capital privado principalmente nas empresas de distribuição e transmissão de energia elétrica, trazendo consigo a necessidade de resultados financeiros em mais curtos espaços de tempo.

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VII CITENEL), realizado na cidade do Rio de Janeiro/RJ, no período de 05 a 07 de agosto de 2013.

Alberto L. Francato e Paulo S. F. Barbosa trabalham na 'UNICAMP' (e-mails: xxxxxxxx@xxxxx.yyy.zz; xxxxxxxx@xxxxx.yyy.zz).

Carlos D.F Barbosa, Edson J.R. Luciano, Helio Horioka e Carlos Severino N. trabalham na 'Prinsis'. Marcos Leone F. trabalha na 'Venidera'. Gabriel M. Lima. trabalha na 'Aremas'. Tiago Forti, André Toscano e Diogo Cecilio trabalham na 'Simworxs'.

Rogério Lavandoscki e Fabiano Farias. trabalha na 'CTEEP' (e-mail: rlavandoscki@ctEEP.com.br, [ffaria@ctEEP.com.br](mailto:ffaria@ctEEP.com.br)).

Isso fez essas empresas investirem menos em inspeção e manutenção dos equipamentos e flexibilizarem os limites de operação diminuindo a confiabilidade do sistema.

Com isso, tem-se verificado nos últimos empreendimentos da construção de linhas de transmissão a não conformidade nas luvas de emendas nos processos de prensagem que podem reduzir a vida útil das emendas provocando aumento da resistência elétrica, perdas por efeito Joule e rompimento do cabo por queda na tensão residual entre o cabo e a luva, conforme as referências [1]–[3].

Essas condições sistêmicas têm provocado eventos de falhas que, podem se estender em efeito cascata e levar o sistema a um colapso de grande proporção, ou "black out". As falhas geram custos e prejuízo à imagem das empresas que deixam de fornecer a energia para os consumidores de diversos segmentos: industriais, residenciais, hospitais, fornecimento de água, entre outros. Segundo estudos da referência [4], as taxas de falhas em emendas e demais integrantes do sistema de transmissão estão mostrados na Figura 1.

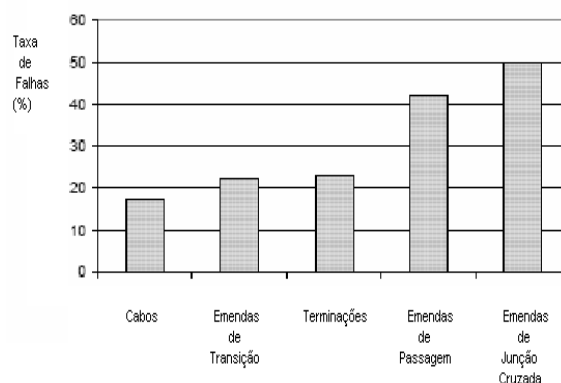


Figura 1 - Taxa de falhas em emendas e demais componente dos sistemas de L.T [Berjlin, Roefls]

## II. SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS, ENSAIOS DE RUPTURA, FEMEA, DELPHI, FMECA E OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO

### A. Simulação com elementos finitos do Empenamento em emendas de compressão

Com essa simulação observou-se concentração de tensão na região de transição do cabo com a luva e nas extremidades dos cabos de aço se encontrando. As figuras mostram diagramas de tensão máxima atuante na conexão e detalhes das regiões com concentração de tensão. A cor vermelha indica tensão próxima de zero e a azul indica a tensão máxima obtida. A transição vai das cores quentes (do vermelho) para as frias (até o azul).

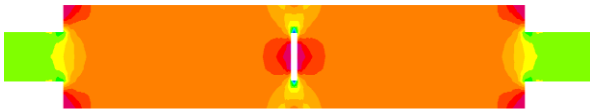


Fig. 2 - Estado de Tensão na Região da Luva de Aço (SAP2000)



Fig.3 – Detalhe da Tensão na Região extrema esquerda da Luva de Aço

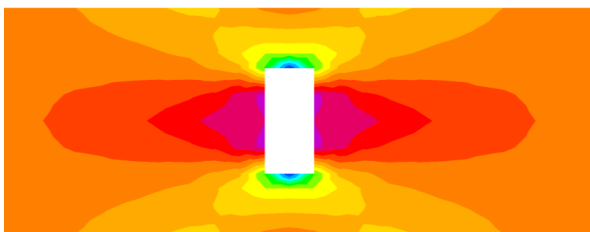


Fig.4 – Detalhes do Estado de Tensão na Região central do da Luva de Aço

O lado inferior (Figura 5) trabalha em tração, com aumento da probabilidade de ocorrência de ruptura devido ao aumento da tensão nos terminais da emenda; o aumento da densidade de material no lado comprimido (lado superior Figura 5) pode provocar diminuição da resistência elétrica e distribuição de corrente não homogênea na seção reta, provocando maior perda de potência nesta parte (efeito Joule) sem área para dissipação, aumento de temperatura e da probabilidade de ruptura.

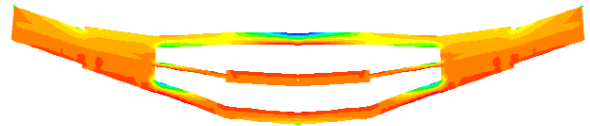


Fig. 5 - Tensões em emenda desalinhada com deslocamento e flecha (a parede da luva de alumínio apresenta gradiente de tensão com variação de cores do vermelho para o azul).

Além do empenamento, uma falha na prensagem pode formar vinco e tensões de plastificação localizados fragilizando a emenda.

O estudo revela necessidade de observância estrita aos procedimentos de execução, compatibilizando os padrões da prensa /matriz, ferramentas e luvas, preferencialmente de mesmo fabricante.

### B. Ensaio de Ruptura

A luva empenada pode causar carga de ruptura desigual na emenda. Isso se dá pela solicitação das forças atuantes não serem uniformes e a deformação nas seções simétricas da luva acabam sendo diferentes, acarretando a flexão no elemento e ao desalinhamento, comprometendo a qualidade e a confiabilidade da emenda.

Tabela 1- Ensaio de tensão de emendas empenadas ACSR DRAKE SADE(Obs. Média 14400kgf Desvio Padrão 424,26 kgf )

Emenda empenada	Flecha (%F/L)	Tensão de ruptura (kgf)
1	1	15.850
2	1	15.617
3	1	14700
4	3	13.450*
5	2,5	14350

Observa-se que a emenda 4 com flecha de 3% rompeu abaixo da especificação mínima do fabricante (não uniformidade de tensão na seção reta do cabo devido ao empenamento).

A emenda 5 ficou muito próxima da especificação mínima do fabricante (14288 kgf), conseqüentemente o valor máximo de tolerância de flecha seria 2%, o que concorda com o valor adotado na Republica da China, conforme as referências [1] e [3].

Comparando-se as emendas retilíneas com as empenadas verifica-se grande diferença, superior a 10% devido a ocorrência de empenamento.

\*Na emenda empenada 4 ocorreu ruptura com 13.450 kgf, o primeiro tento rompeu com 9750 kgf, o deslocamento - deformação foi de 29 mm, no rompimento havia tido mais 7 mm de deformação-deslocamento e a flecha era de 3%.

### C. Ensaio de Deformação Com extensômetros

Para analisar este efeito foram realizados ensaios com extensômetros na luva de alumínio e aço para avaliar a deformação causada na emenda em função do empenamento da luva de aço. A Figura 6 ilustra a emenda com a luva empenada e os extensômetros para coletar dados da deformação.

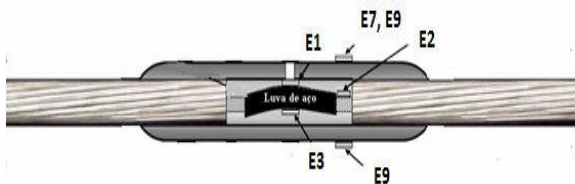


Figura 6 - Representação esquemática da colocação dos extensômetros nas luvas de aço e alumínio com a luva de aço empenada

A análise dos dados obtidos com o ensaio para a luva de alumínio comprova a deformação desigual na luva de alumínio, ou seja, a carga aplicada na luva não é centrada provocando a flexão no elemento devido, principalmente, ao desalinhamento da emenda com flecha.

Essa carga desigual sobre a luva provoca em sua tensão de pico a formação de fissuras que se intensifica com o aumento da deformação da emenda. Na face oposta a da fissura pode ocorrer a deformação de compressão devido ao excesso de carga nessa região.

As Figuras 7 e 8 mostram a deformação desigual na luva de alumínio. A partir de 400 segundos de ensaio a tensão começa a reduzir, pois a luva de alumínio começa a escorregar do cabo.

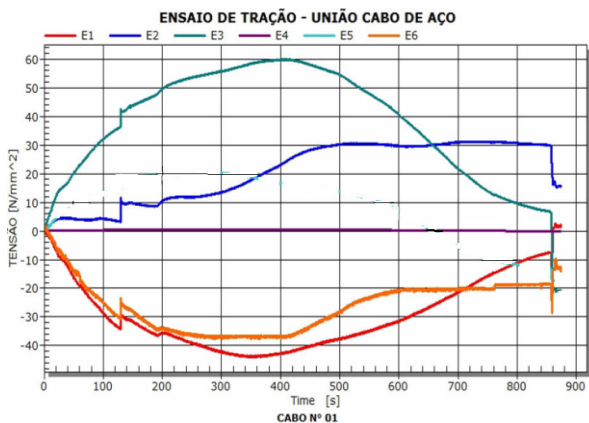


Figura 7 - Ensaio de tração extensômetros E1, E2, E3, E4, E5, E6, as curvas acima do zero de tração indicam um puxamento, enquanto as abaixo indicam compressão.

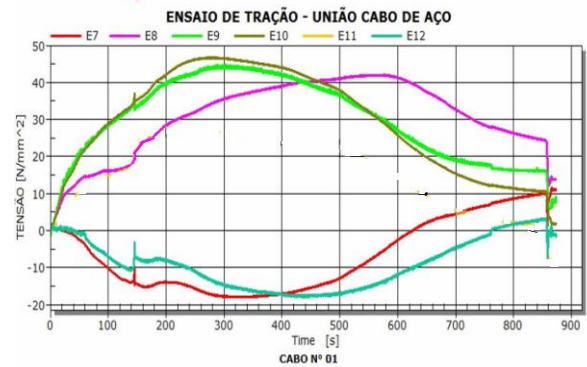


Figura 8 - Ensaio de tração extensômetros E7, E8, E9, E10, E11, E12, as curvas acima do zero de tração indicam um puxamento, enquanto as abaixo indicam compressão.

### D. Análise de emendas à compressão com descentralização

Nota-se na Figura 9 que visualmente não há nenhuma característica de não conformidade, a não ser a poeira acumulada na conexão e no cabo, que pode aumentar o efeito corona e consequente ruptura.



Figura 9 Cabo rompido em campo (emenda à compressão)



Figura 10 Detalhe da emenda e fios no lado que ocorreu a ruptura

Na Figura 10, pode-se observar tentos de aço rompidos até longe da interface cabo emenda (boca da emenda) indicando a alta temperatura estendendo-se até a vinte centímetros da transição cabo emenda.

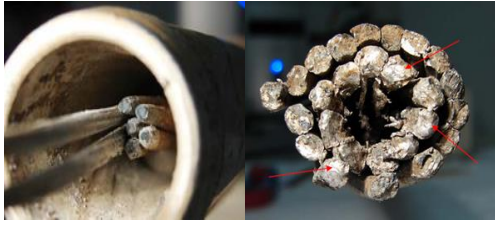


Figura 11 Detalhes dos a) fios de aço rompidos na luva de alumínio e b) tentos de alumínio rompidos (setas mostrando fusões por alta temperatura)

Na Figura 11, mostra-se ponto em que pode ter ocorrido a fusão do aço indicando a bastante elevada temperatura atingida na ocasião da ruptura.



Figura 12 Corte da luva de alumínio para visualização e análise da qualidade

A elevação demasiada da temperatura devido a sobrecarga onde ocorreu a ruptura e, principalmente, devido a descentralização do cabo dentro da luva de alumínio, não permitindo a regra de contato elétrico superior a cinco vezes o diâmetro do cabo, e a ruptura por falta de dissipação.

### E. Análise de Modos de Falha e Efeitos – FMEA

A Análise de Modos de Falhas e Efeitos - FMEA consiste em uma metodologia para avaliar as falhas e minimizar os riscos de reincidência além de implantar métodos para aumentar a confiabilidade do sistema. Por meio desta metodologia é possível identificar as causas, os efeitos e os impactos da falha e ainda permite elaborar um roteiro para localização e manutenção da falha.

Análise dos modos de falha (FMEA) a partir de pesquisas realizadas com empresas do setor de transmissão de energia, simulações em elementos finitos e ensaios mostraram as principais causas de falha no sistema de transmissão, conforme esquematizado na Figura 13.

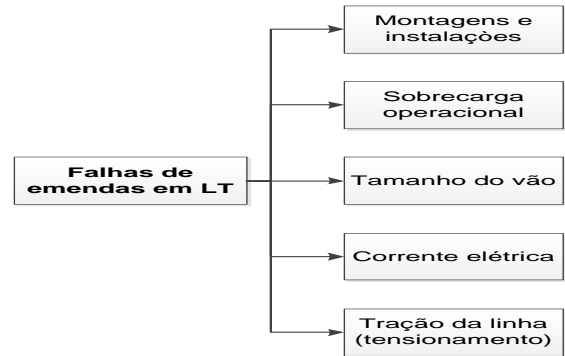


Figura 13 - Análise de modos de falha (FMEA), mostrando as causas mais importantes.

Neste trabalho de pesquisa foram constatados que procedimentos incorretos na montagem e instalação, sobrecarga operacional, tamanho do vão, corrente elétrica e tração da linha são as principais causas que influenciam na confiabilidade.

As vibrações eólicas na linha fazem com que os fios do cabo ACSR na transição fio/emenda se rompam e reduzem a vida útil da emenda.

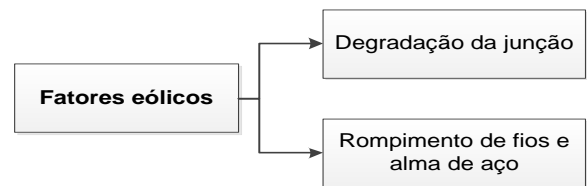


Figura 14 - FMEA com efeitos das vibrações eólicas em falhas de emenda

Além disso, neste estudo foi observado que a análise dos modos de falha sugere que o monitoramento da temperatura na junção da emenda, o aumento da resistência elétrica e o monitoramento eletromagnético do cabo por efeito Hall indicam a necessidade de manutenção preventiva que evite falhas no sistema.

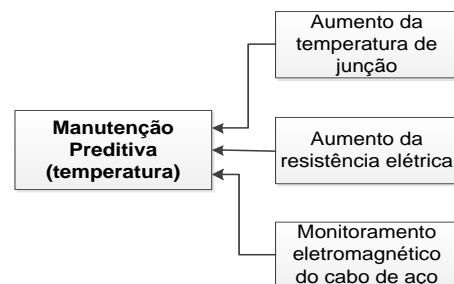


Figura 15 - Necessidade de monitoramento da temperatura e manutenção preventiva (preditiva) da emenda.

## F. Tensão residual

A modelagem em elementos finitos permitiu realizar simulações para diferentes configurações de prensagem da emenda com diversas matrizes a fim de avaliar a conformação mecânica. Também foi possível realizar simulações com diversos campos de temperatura sobre a emenda para avaliar a possibilidade de rompimento do cabo.

A modelagem para a simulação adotou um cabo Grosbeack com 26 fios de alumínio e 7 de aço e a matriz de compressão da Forjasul 55723/004, conforme Figura 16.

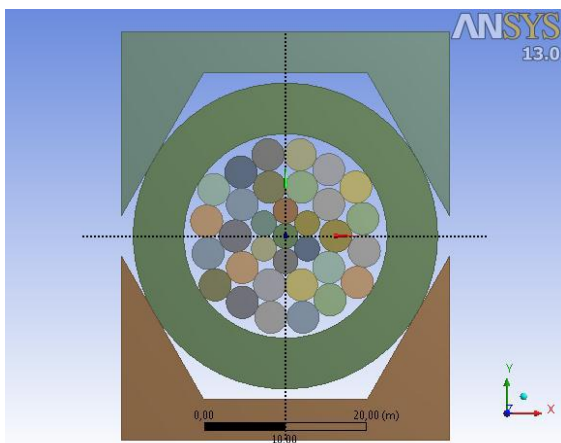


Figura 16 - Seção do cabo utilizada na simulação da conformação mecânica

## G. Simulação Mecânica para cabo e luva de aço

A simulação mecânica para a compressão entre o cabo e a luva de aço analisou cinco geometrias de matrizes de prensagem para visualizar o impacto na qualidade da prensagem quando esta for prensada por matriz especificada para a emenda. As geometrias foram 5% e 10% menores que a especificada, a matriz correta indicada pelo fabricante e até 10% maiores, mostradas na Figura 17.

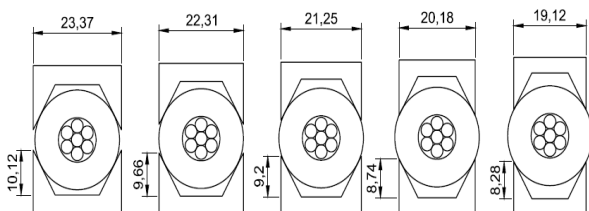


Figura 17 – Matrizes de compressão para a luva de aço

A compressão com a matriz correta apresentou, como esperado, uma deformação plástica bem acentuada na emenda, com tensões residuais atingindo picos de

360MPa. A Figura 18 mostra a pressão nos contatos entre o cabo e a luva de aço.

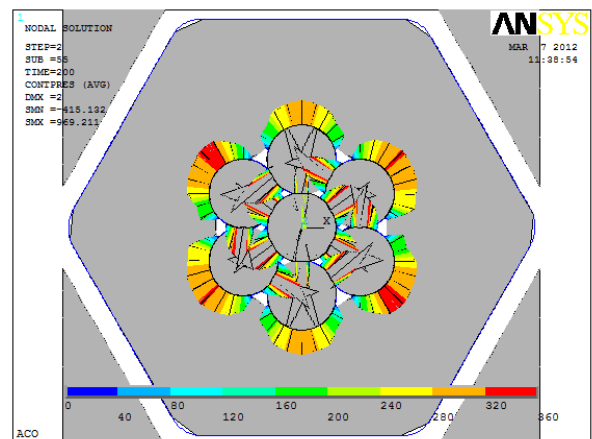


Figura 18 – Pressão nos contatos entre o cabo e a luva de aço (escala em MPa).

As simulações com as matrizes de tamanhos maiores do que a matriz correta mostram ser viável a prensagem dos cabos. Entretanto, observa-se uma redução significativa da tensão residual do contato cabo luva quanto maior for a matriz de compressão. O gráfico da Figura 19 mostra essa redução.

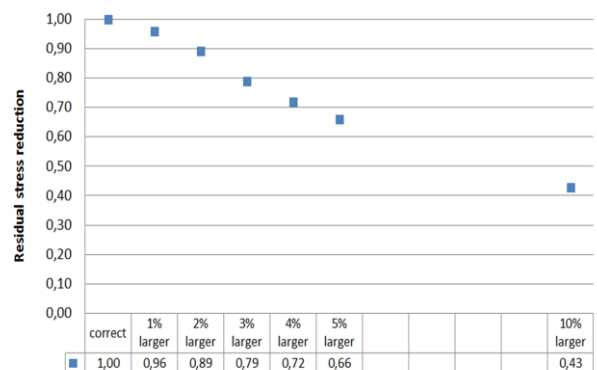


Figura 19 – Redução da pressão de contato entre o cabo e a luva de aço para vários tamanhos de matriz de compressão.

Pela simulação, as matrizes menores se mostraram inviável para executar a prensagem da emenda. A matriz 5% menor que a matriz correta provoca o escoamento da luva entre os vãos da matriz durante a prensagem ao invés de tomar a forma da matriz. Já a matriz 10% inferior danifica a luva como se estivesse rasgando-a. A Figura 20 mostra o resultado da simulação para os dois casos.

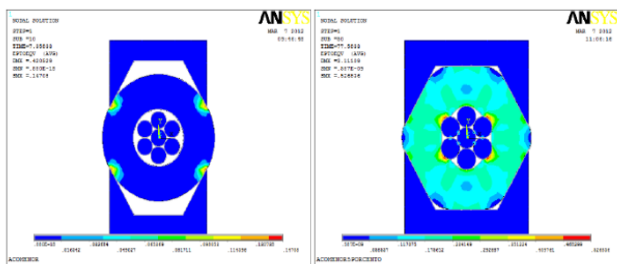


Figura 20 a) Resultado da simulação com matriz 10% menor (esquerda) e b) 5% menor Simulação para cabo e luva de alumínio (direita)

A simulação mecânica para a compressão entre o cabo e a luva de alumínio analisou 3 geometrias de matrizes de compressão para visualizar o impacto na qualidade da conformação mecânica quando esta for prensada por matriz fora da especificação para a emenda. As geometrias foram a matriz correta e 5% e 10% maiores, mostradas na Figura 21.

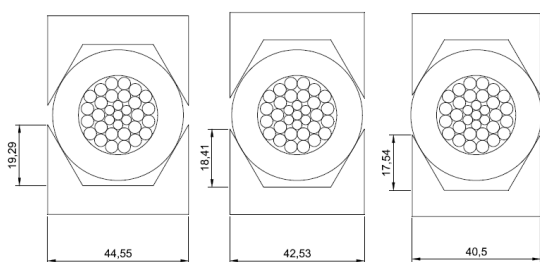


Figura 21 - Matrizes de compressão para a luva de alumínio.

Após o processo de extrusão feito pela matriz correta observou uma deformação plástica bem acentuada resultando em uma tensão residual entre o cabo e a luva de até 80MPa. A Figura 22 mostra a pressão residual nos contatos entre o cabo e a luva de alumínio.

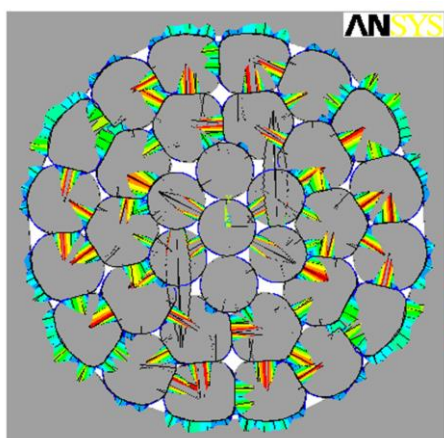


Figura 22 – Pressão residual entre o cabo e a luva de alumínio (escala em MPa).

Assim como no processo de compressão da luva de aço, observa-se uma redução significativa na pressão de

contato quando se utiliza uma matriz de compressão maior do que a recomendada. A Figura 23 mostra essa redução. Os resultados obtidos nas simulações preconizam que apenas as matrizes corretas e recomendadas pelo fabricante devem ser empregadas.

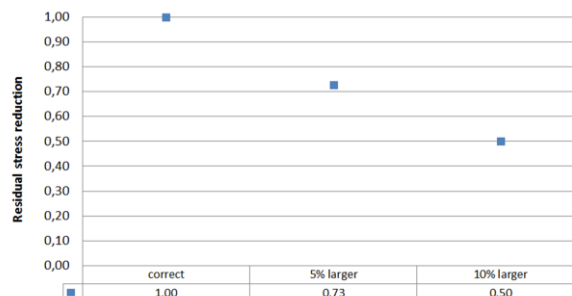


Figura 23 – Redução da pressão de contato entre o cabo e a luva de alumínio para vários tamanhos de matriz de compressão.

#### H. Simulação Térmica da emenda

A simulação térmica tem como finalidade verificar a influência do gradiente da temperatura na seção radial da emenda. O gradiente da temperatura na emenda ocorre principalmente em função das perdas de efeito Joule durante a passagem da corrente elétrica no conjunto aço e alumínio que possuem resistividades diferentes. Além disso, a parte interna de aço não possui contato com o ambiente o que impossibilita a troca de calor com o meio, já a luva de alumínio possui a influência do vento e da radiação solar que pode aquecer ou resfriar a emenda.

Para a simulação foi considerada uma emenda feita a temperatura de 20°C sem falhas. O cálculo das temperaturas em operação normal e de emergência nas partes de alumínio e aço do cabo e nas luvas de alumínio e aço foi feito com base no modelo Cigré e os valores são vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Campo de temperatura da emenda

Operação	Aço		Alumínio	
	cabo	luva	cabo	luva
<b>Normal</b>	53,79°C	53,79°C	52,19°C	52,19°C
<b>Emergência</b>	61,26°C	61,26°C	59,04°C	59,04°C

Após a simulação do aquecimento da emenda observou-se que houve uma pequena alteração na tensão residual que pode ser desconsiderada, tanto para situação normal como em emergência. A dilatação dos componentes da emenda foi considerável, porém uniforme, não comprometendo a tensão residual do cabo com a luva.

## I. Delphi, FMECA e Otimização Multicritério de ações e investimentos

Paralelamente a aplicação da metodologia de Engenharia de Análise de Falhas descrita anteriormente, também foi desenvolvida uma pesquisa Delphi com FMECA e Metodologia Multicritério para otimização de ações de planejamento de manutenção e investimentos na rede de transmissão. A lista de sugestões de mitigação de falhas nos processos de transmissão de energia elétrica da concessionária foi construída com interações com colaboradores da empresa, sendo em forma de lista hierarquizada das sugestões de melhorias que minimizariam as falhas nos elementos e teriam um menor custo de implantação. O diagrama de aplicação do método é apresentado na Figura 24.

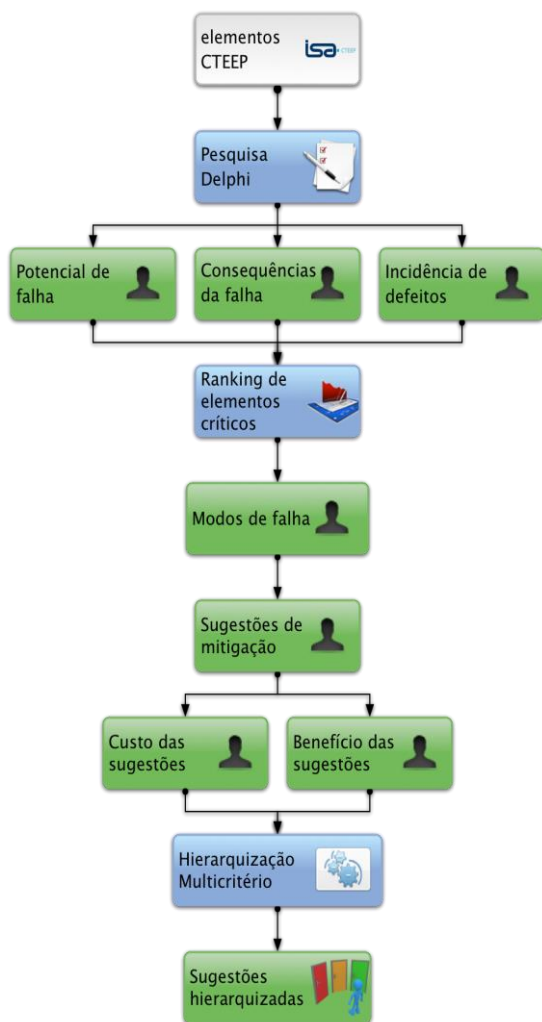


Figura 24 – Diagrama de aplicação do método.

A ferramenta Multicritério desenvolvida permite redução da subjetividade na análise de falhas, sendo que ficou evidente como os colaboradores da CTEEP puderam visualizar e analisar de forma mais precisa os modos de falha, suas causas, como eles impactam nos resultados corporativos da CTEEP e como as sugestões

levantadas podem contribuir para melhorar os processos que envolvem transmissão de energia elétrica no ambiente da CTEEP. O uso de pesquisa Delphi em ambiente Web fez o levantamento dos modos de falha e de sugestões de mitigação também foi muito ágil, o que fez com que a hierarquização através da utilização da metodologia multicritério também fosse muito ágil e direta.

## III. CONCLUSÕES

A desverticalização do setor elétrico brasileiro em que os ativos passaram do domínio público para o domínio privado provocou mudanças na estratégia de operação e manutenção das empresas dando maior peso na busca por lucratividade em menor horizonte de tempo.

Essa mudança se caracteriza principalmente pela redução de investimentos em manutenções que faz aumentar significativamente a taxa de falha dos equipamentos.

Foi constatado nas emendas de linhas de transmissão que a falta de capacitação e treinamento dos colaboradores e falta de fiscalização faz com que as emendas e luvas no processo de prensagem sejam aceitas mesmo deformadas. Pela análise feita nas cargas de ruptura para luvas deformadas, os resultados mostram que as solicitações nas luvas são desiguais e podem provocar fissuras e deformação de compressão na emenda.

A simulação em elementos finitos mostra que matriz inadequada às recomendações do fabricante prejudica a qualidade e a confiabilidade da emenda reduzindo fortemente a vida útil desta.

A FMEA evidencia a necessidade de monitoramento dos cabos e manutenção preventiva das linhas de transmissão, principalmente nas condições atuais onde os investimentos em manutenção são reduzidos em razão da competitividade de mercado.

A Ferramenta Multicritério permite uma análise rápida dos principais potenciais de falha e de como ter o melhor investimento para mitigação do risco de falha.

## IV. AGRADECIMENTOS

As Agencias Governamentais e empresas ANEEL, Burndy, CTEEP(principalmente ao grupo de P&D e de Linhas), Forjasul através de seus colaboradores pelo apoio, incentivo e ideias.

## V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Dissertações e Teses:

- [1] Barbosa, C.D. - Impactos do desempenho das emendas dos cabos de linhas de transmissão na confiabilidade de redes elétricas - Tese de doutoramento apresentada na Fac.Eng.Civil Unicamp 2010.

*Periódicos:*

- [2] Wang, J. J., et al., 2008. The Integrity of ACSR Full Tension Splice Connector at Higher Operation Temperature, Part II, IEEE Power.

*Livros:*

- [3] Barbosa, C.D, Francato, A. et al., 2011. Analysis of critical field procedures for power HV overhead transmission line splices installed after restructuring of Brazilian electrical sector. Vol. 18., Engineering Failure Analysis.

*Relatórios Técnicos:*

- [4] Berlijn, S. M.; et al. Type testing of cables and accessories– KEMA Nederland B.V., High Voltage Laboratory.