

SEÇÃO ARTIGO STRICTO SENSU

**ESTUDO DA SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA DE MATERIAIS
NA CRIMPAGEM DE TERMINAIS ELÉTRICOS¹****Ecio Naves Duarte²**

Doutor/UFU

Professor/IFSP Bragança Paulista

Luciano Guimarães Mendes³

Especialista/INATEL e Mestrando/IFSP

Professor/IFSP Bragança Paulista

RESUMO

Este trabalho propõe a análise de um produto industrial – um terminal elétrico conectado ao cabo/fio elétrico, ou seja, deste terminal crimpado – via ferramenta específica e normalmente do tipo manual. Para tanto, antes, há que se levantar os parâmetros mecânicos e elétricos que influenciarão na escolha da melhor opção dentre os materiais disponíveis e adequados para os propósitos exigidos pelo mercado e que atendam às normas técnicas que regulam este segmento para então, após a identificação da Função (equação) Geral de Predição que o represente, simular computacionalmente a fim de verificar os desempenhos ante as diferentes opções de materiais para composição deste terminal.

Palavras-chave: Crimpagem de terminais. Sensibilidade paramétrica de materiais. Elementos finitos

98

Introdução

A qualidade das peças produzidas em um processo de estampagem de chapas metálicas é muito dependente do controle do fluxo de material conformado para dentro da matriz de estampagem, segundo Nine (1978). Além disso, segundo Duarte (2007), o atrito entre as ferramentas, as propriedades mecânicas da chapa conformada, a força da punção e a geometria das ferramentas são outros parâmetros que também podem influenciar neste processo.

Em uma primeira etapa neste projeto, as investigações se dedicarão ao estudo da proeminência dos principais parâmetros influenciadores no ajuste ótimo dos equipamentos de fabricação de terminais elétricos crimpados em ligas metálicas, tais como: **ligas de alumínio e cobre**. Posteriormente, utilizando-se o modelo da Similaridade ou Similitude em Engenharia com uma geração de dados através das simulações

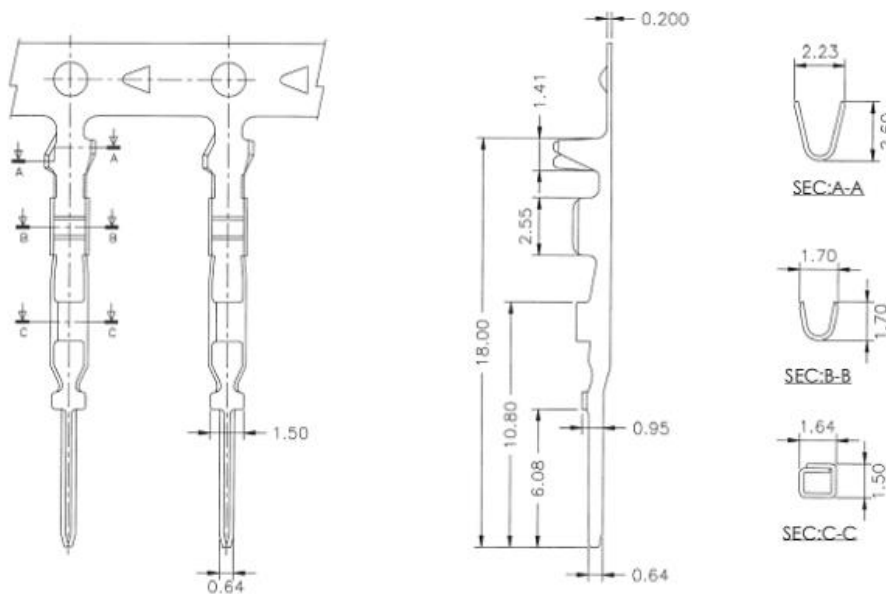
¹ O artigo apresenta a fase preliminar do projeto a ser executado, o qual conta com a parceria entre IFSP e a Sala CIMNE da Universidade da Catalunha, Barcelona, Espanha.

² E-mail: ecio@ifsp.edu.br

³ E-mail: tel-g-mendes@superig.com.br

numéricas do fenômeno em questão, passar-se-á à determinação de uma equação preditiva geral (EPG) para se estimar as condições ótimas de fabricação deste específico caso de conformação ou crimpagem de conectores, como por exemplo, o conector abaixo:

Figura 1-A – Em destaque, as regiões A-B-C deste conector, as quais deverão ser conformadas (crimpadas) em torno do cabo elétrico.



Fonte: Pololu (2001)

Figura 2-B – Em destaque, as regiões A-B-C deste conector, as quais deverão ser conformadas (crimpadas) em torno do cabo elétrico.



Fonte: Pololu (2001).

Figura 3-C – Em destaque, as regiões A-B-C deste conector, as quais foram conformadas (crimpadas) em torno do cabo elétrico.



Fonte: Pololu (2001).

Figura 1-D: Conector elétrico crimpado.



Fonte: Clube do Hardware (2013)

A determinação de uma equação que estime o valor ótimo de uma variável ou de um grupo de parâmetros visando a redução do número de tentativas (*try-outs*) pode ser de grande valia para as indústrias eletroeletrônicas aonde alguns equipamentos podem produzir até milhares de terminais/minuto, o que resultaria no enxugamento nos custos de produção devido à economia de tempo nos ajustes das prensas de crimpagem. Afora isto, a redução das perdas e a obtenção de peças com melhor qualidade de acabamento poderiam elevar os níveis de produção além da possibilidade de ocuparem um patamar mais próximo da excelência.

Objetivos

O trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de ferramenta computacional expressa através de Equação de Predição Geral (EPG) útil no estudo, análise e simulação da crimpagem de terminais elétricos modelados pelo MEF em 2D,

além de que a mesma tenha aplicabilidade para diferentes tipos de terminais e que seja amigável na relação com o usuário, permitindo-lhe fácil leitura, entendimento e edição.

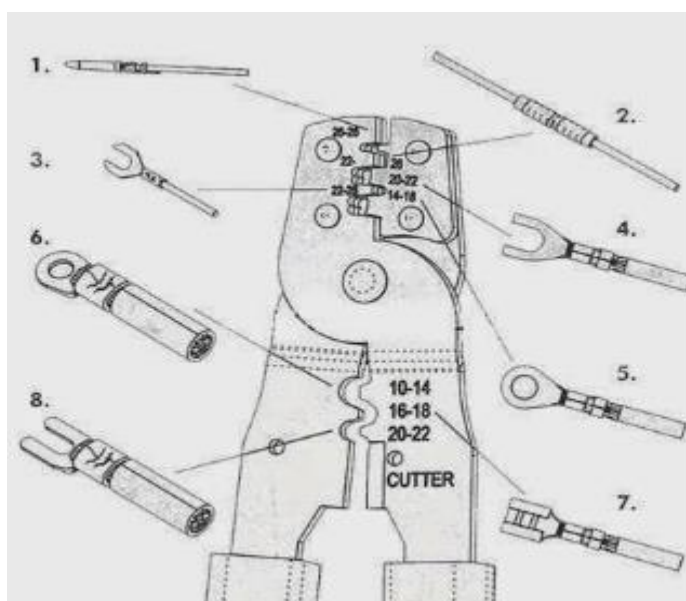
Revisão bibliográfica

Crimpagem

Denomina-se por crimpagem a união mecânica permanente entre o fio ou condutor elétrico com o seu respectivo terminal ou conector, sendo que tal conexão é realizada por ferramentas adequadas, específicas e de precisão tanto sob o aspecto mecânico como também elétrico.

A crimpagem é um complexo processo de conformação mecânica do terminal metálico em torno do cabo elétrico, pois envolve o conhecimento de diversos temas do saber: terminal, fio, ferramentas, métodos e procedimentos. Quando este processo é controlado e todos estes fatores são bem calibrados ter-se-á uma terminação com boa condutibilidade elétrica. A qualidade de controle é uma parte importante na crimpagem e resulta na poupança de tempo e dinheiro ao evitar “retrabalho ou refabricação”. (MOLEX, 2009).

Figura 2 – Ferramenta manual de crimpagem de terminais.



Fonte: Ensinando Elétrica (2014)

A utilização da crimpagem como um processo de fabricação de terminais eletromecânicos vem sendo aplicada na indústria, pois proporciona uma economia considerável no processo de fabricação, bem como no tempo gasto para se efetuar as conexões elétricas desejadas, sem a necessidade da soldagem.

Teoria da similitude ou similaridade

Nesta investigação será empregada a teoria da Similitude ou Similaridade que fundamentalmente considera dois sistemas físicos separados como se fossem similares e

onde as dimensões envolvidas no fenômeno físico em estudo são relevantes. A essência deste trabalho está no desenvolvimento de uma equação de predição geral (EPG) de um fenômeno físico como também o emprego compatibilizado entre duas teorias: a Similitude em engenharia mecânica – mais especificamente o teorema Pi de Buckingham para uma análise adimensional – e a simulação numérica pelo Método de Elementos Finitos (MEF) para análise do processo de crimpagem.

Comumente, apoia-se na Similitude para estabelecer-se uma equação que relaciona os parâmetros determinantes no comportamento físico de um fenômeno e assim, obter significativa redução de testes comprobatórios. Desta forma, neste trabalho tal teoria será empregada para a obtenção da relação entre a força de crimpagem e parâmetros como o atrito, os geométricos e as propriedades de materiais, enquanto que através da simulação numérica para diversos valores de cada parâmetro, objetivar-se-á no estabelecimento da contribuição de cada uma destas variáveis na força de crimpagem (FC) a ser estimada, independentemente das demais variáveis. Em suma, então, esta pesquisa estará ancorada na teoria da similitude e do teorema Pi de Buckingham – o que evitará a necessidade do dispêndio de recursos na parte experimental da investigação.

A teoria da similitude analisa a importância de um determinado parâmetro à variável dependente a ser estimada mantendo todas as demais variáveis envolvidas como constantes, aonde sete (07) pontos para cada parâmetro devem ser obtidos para chegar-se numa função/equação correlata, conforme exemplificam as figuras 3 e 4 abaixo, cuja análise é denominada por sensibilidade paramétrica do material. Estima-se em doze parâmetros – seis de propriedades de materiais e seis geométricos – estão combinados em nove Pi termos (ou grupos adimensionais) distintos. A combinação destas oito curvas que se relacionam com o nono Pi termo da Força de Crimpagem (FC) ‘adimensionalizada’ em relação à força de prensa-chapas deva resultar em uma equação de predição da FC, seguindo os conceitos estipulados pela teoria de similitude. No entanto, há a expectativa de que os efeitos de alguns parâmetros na crimpagem dos terminais elétricos possam ser desprezados ante os demais para que uma função mais simples e ajustada possa ser identificada sem comprometimento significativo da eficiência do citado processo.

Os dados de cada Pi termo serão obtidos para simulação tendo em vista teorias relativas aos comportamentos elástico e plástico dos materiais além dos ajustes paramétricos numéricos projetados no modelo em elementos finitos da simulação do experimento que tenha solução explícita para a equação dinâmica que governa o fenômeno físico e estudo.

Com esta análise dimensional e com razoável aproximação pretende-se determinar uma Equação de Predição Geral (EPG) da FC, a qual pode ser descrita genericamente como:

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_s)$$

- s é o número de grupos adimensionais do fenômeno em estudo, obtidos do Teorema π de Buckingham, de acordo com Murphy (1950).

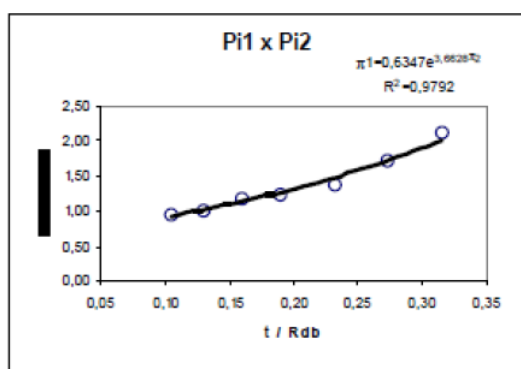
Como é desconhecida a função descritiva com os melhores ajustes de um fenômeno físico, então, tal função de calibração deverá ser testada suficientemente através de simulação para que a EPG possa ser formulada e validada ao final desta pesquisa. Com a criteriosa análise da base de dados gerados na simulação numérica em elementos finitos os grupos adimensionais devem ser arrançados de forma que todos eles se mantenham constantes com exceção do parâmetro investigado naquele instante para, em

seguida, encontrar-se uma equação componente para cada π -termo. Tal procedimento se deve ser repetido para os outros grupos adimensionais e as relações obtidas para cada “ π -termo” serão combinadas em uma equação geral (EPG) que governa o problema. Frequentemente, esta combinação não é muito simples e necessitará de ajustes.

Através das operações matemáticas de multiplicação ou adição dentre as componentes de cada π -termo será definida a EPG, sendo que a opção entre tais operações ocorre em função do processo de validação via dados experimentais em cada um destes termos citados. Tão logo os testes venham a se demonstrarem corretos em todos os termos, segundo Murphy (1950), então, a EPG estará definida através de uma sequência de equações componentes expressas por produto (ou soma) entre os π -termos.

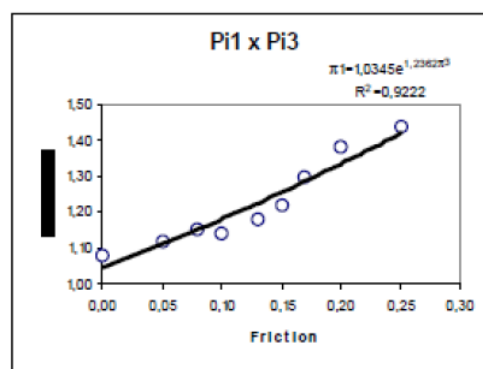
Seguem as figuras 3 e 4 com exemplos de calibração das equações componentes para um problema de natureza análoga, desenvolvidos em estudos preliminares por Duarte (2007).

Figura 3: Equação Componente da espessura



Fonte: Duarte (2007).

Figura 4: Equação componente do atrito da chapa



Fonte: Duarte (2007).

Os resultados satisfatórios desta pesquisa poderão ser aproveitados em outros segmentos industriais relativos à predição de condições ótimas de ajuste de equipamentos, otimização qualitativa na produção de peças com redução da necessidade de testes, de energia e com claros reflexos positivos ambientais.

Método dos elementos finitos (MEF)

O modelamento por equações diferenciais parciais tornou o Método de Elementos Finitos (MEF) o mais difundido na resolução de tais equações, o qual em conjunto da tecnologia computacional tem sido aplicado com sucesso na solução de problemas em regime transitório e permanente, em regiões lineares e não-lineares, para domínios em uma, duas ou três dimensões, podendo ainda, modelar formas geométricas complexas, bem como descontinuidades em um material sendo que a discretização em EF transforma equações diferenciais em equações algébricas (Serafim, 2009).

O MEF tem sido usado em diferentes linhas de pesquisas e desenvolveram-se uma gama variada de elementos, tais como: elementos curvilíneos e os isoparamétricos, além do método foi generalizado para solução de equações diferenciais parciais, resultando na aplicação do MEF em diversos problemas como mecânica dos sólidos, dos fluidos, termodinâmica, resultando nas soluções de problemas de engenharia antes inacessíveis. Com bibliografia crescente sobre o Método de Elementos Finitos (MEF) de autores como Zienkiewicz, Onâte e Morita, aqui citando apenas alguns, e de trabalhos apresentados em

periódicos redundaram no desenvolvimento de códigos computacionais de sucesso utilizando tal método. Segundo Onãte (2009), o MEF é um procedimento para resolver por soluções numéricas os problemas encontrados na natureza.

Atualmente, a tendência é pelo desenvolvimento de softwares com facilidades na geração de modelos, interação do programa com o usuário e capacidade de visualização gráfica (Serafim, 2009) e, segundo DUARTE (2007), através do emprego do MEF a estrutura pode ser analisada de duas maneiras distintas: a discreta – onde a análise é qualitativa e de menor rigor, e a contínua – onde os elementos finitos são dispostos de forma integrada permitindo que as tensões e os deslocamentos encontrem equilíbrio e que as condições de contorno sejam satisfeitas.

O primeiro passo do MEF é a escolha do tipo e de suas propriedades, mais adequado para representar corretamente o elemento e o segundo é dispor adequadamente os elementos para em seguida iniciar a análise do problema estrutural, seja no plano ou no volume, feita através de notação matricial. Dentre os tipos, para representações planares há o triangular ou o quadrilateral, enquanto que para o volumétrico dispõe-se do hexaedro.

Para a análise estrutural há três tipos de argumentos empregáveis às tensões e às cargas nas estruturas: equilíbrio, compatibilidade e equacionamentos constitutivos. No primeiro tipo, as tensões e as cargas se limitam à estrutura ou se relacionam tensões com outras. No segundo tipo, se relacionam geometricamente as deformações com deslocamentos, os quais, caso sejam pequenas redundarão em equações de compatibilidade lineares. Finalmente, no terceiro tipo, emprega-se o empirismo obtido através da Lei Tensão-Deformação e como tal, dependem de dados obtiveis em experimentos.

Conforme DUARTE (2007), a análise estrutural deve ser descrita em forma de malha e os melhores resultados do emprego do MEF advirão com as corretas escolhas do tipo do elemento e da malha associada já que o tipo do elemento associado é que minimizará os efeitos indesejáveis da aproximação entre os modelos desenhados e o real.

Após o exposto, há que se informar que o MEF possui caráter modular e que permite verificações durante o seu processamento computacional, mas que há razoável possibilidade na obtenção de resultados imprecisos mesmo após exaustivas revisões do modelo. Por isso, é recomendável considerar os resultados como incorretos até que os mesmos possam ser validados analítica e experimentalmente. Muitos problemas físicos, por sua complexidade, não permitem uma solução analítica fechada que abarque genericamente todas as soluções possíveis. E é neste hiato que se aplicam mais oportunamente as técnicas numéricas de solução aproximada utilizadas no MEF.

As ferramentas de simulação numérica admitem duas possíveis soluções numéricas diferentes: a implícita e a explícita. A primeira, principalmente face aos custos computacionais, é aquela que se apresenta como de solução mais rápida, enquanto que a explícita se apresenta como a de maior proximidade com a solução real. No entanto, há que se ressaltar, que não há uma solução que se possa denominar de exata quanto a sua semelhança com a realidade e que por isso, tornam-se importantes as escolhas dos modelos bem como as caracterizações dos materiais para que as simulações possam ser próximas do modelo real.

A equação espacial discretizada da estrutura em estudo pode ser:

$$M \cdot d^2d/dt + p(d, dd/dt) = f(d,t)$$

Aonde:

- f = forças externas.
- r = vetor força residual e de enésima-dimensão.
- p (d,d') = forças de resistências internas dependentes do deslocamento e velocidade.
- M = massa associada a cada ponto.
- d = vetor deslocamento de translação nodal.
- d' = vetor velocidade de translação nodal.
- d'' = vetor aceleração de translação nodal.
- t = tempo.

A SOLUÇÃO EXPLÍCITA

Em DUARTE, 2012, p. 61, a integração da equação anterior no tempo implica na discretização automática da mesma. Os métodos explícitos são condicionalmente estáveis. Isto significa que os cálculos são instáveis quando o intervalo de tempo não é suficientemente pequeno.

Sem dúvida, a estabilidade da integração pode ser garantida pela condição de que o incremento temporal NÃO exceda um certo valor crítico, o qual pode se estimado. Esta estimativa implica numa evolução das propriedades elásticas do material, tais como, a densidade e o tamanho mínimo do elemento da malha. Estas considerações de estabilidade levam a um passo de tempo de integração no domínio do tempo limitado pela expressão que calcula o tempo crítico a cada integração e o atualiza automaticamente, conforme:

$$\Delta t \leq \Delta t_{CR} = 2 / w_{max}$$

Δt_{CR} = tempo crítico.

w_{max} = é a frequência angular máxima do sistema.

Esta equação se obtém com amortecimento de vibrações igual a zero, já que este aumenta o tempo crítico. Em geral, se utiliza uma margem de incerteza para o tempo crítico de 25%, de acordo com o Stampack Theory Manual (2001), o qual é um programa de simulação em EF que tem solução explícita.

A integração explícita no domínio do tempo se faz valendo-se do algoritmo das diferenças finitas. Por isso, a equação anterior determina a configuração da estrutura no instante $t_{n+1} = t_n + \Delta t_{n+1}$, a partir de uma configuração conhecida no instante n.

Onde:

Δt_n é o intervalo de tempo empregado na integração das equações de movimento;
n é o número de passos utilizados na integração.

Ilustrando-se o caso da integração das equações da translação de um determinado ponto nodal, o seguinte algoritmo pode ser utilizado:

- Passo 1: $d''_n = 1/M [f(d,t)_n - p(d,t)_n - Cr_n]$
- Passo 2: $d'_{n+1/2} = d'_{n/2} + 1/2 d''_n (\Delta t_{n-1} + \Delta t_n)$
- Passo 3: $d_{n+1} = d_n + d'_{n+1/2} \cdot \Delta t_n$

A SOLUÇÃO IMPLÍCITA

Conforme DUARTE, 2012, p. 62, este método requer um escalonamento de matriz. Sem dúvida, é possível selecionar-se um algoritmo implícito incondicionalmente estável no qual o tamanho do passo de tempo de integração na equação de movimento está governado apenas por considerações de exatidão dos cálculos. Isto há que ser possível ajustar o esforço computacional para este método na precisão de resultados desejados. A equação de movimento semi-discretizada pode ser descrita na forma residual geral como:

$$r(d) = M.d^2d/dt + p(d, dd/dt) - f(d,t) = 0$$

Onde:

r = é o vetor força residual n-dimensional;
 $p(d, dd/dt)$ são as forças de resistências internas que podem depender dos deslocamentos e velocidades.

Quando não linearidades estão presentes, se utilizam os métodos numéricos de Newton-Raphson ou a solução de Newton modificada – ver Geradin (1983) – para resolver a equação de movimento semi-discretizada, que se escreve como a seguir:

$$r(d_{n+1}) = 0$$

Aspectos de plasticidade e modelos de materiais

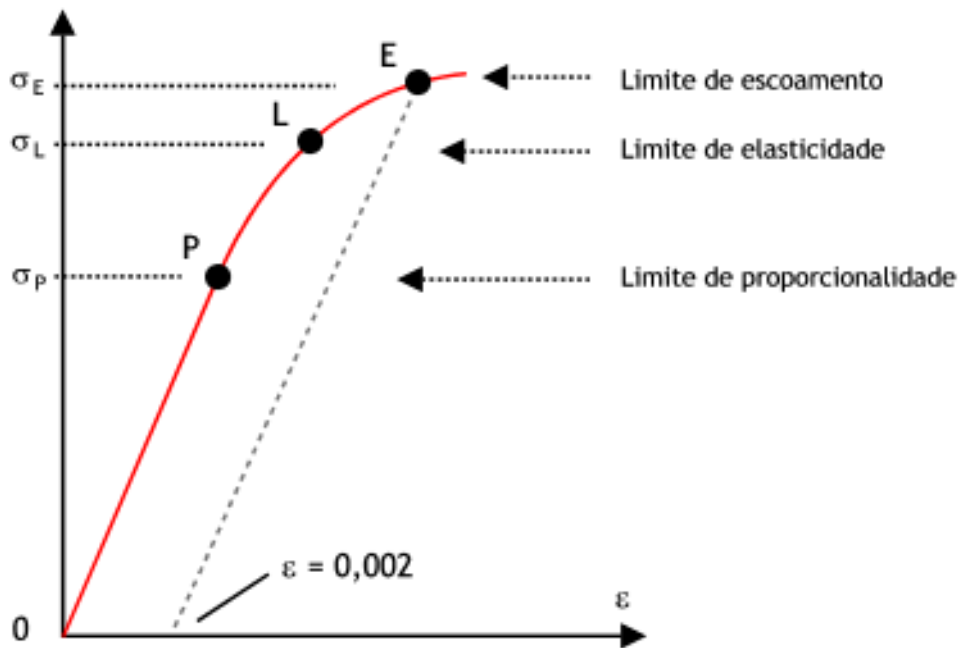
Os modelos numéricos podem estabelecer a função para análise do comportamento mecânico apresentado pelos materiais e suas complexas características, o que pode ser comprovado em seguida através do emprego de ferramenta de simulação em Elementos Finitos (EF), conforme, por exemplo, Stampack Basic Concepts Theory Manual (2003). De acordo com Belytschko et. al (2000), diferentes relações constitutivas permitem a distinção entre materiais tão diferentes com borracha, um fluido viscoso ou o concreto e para tanto, há extensa literatura sobre este tema e, com um enfoque nos aspectos computacionais de plasticidade pode-se encontrar em Simo et al. (1998).

As simulações numéricas trazem uma avaliação quantitativa do problema enquanto que os módulos de cálculos (*solvers*) dos programas em EF oferecem os resultados que permitirão relacionar a mecânica – cinemática e a dinâmica da investigação em curso.

A caracterização do material

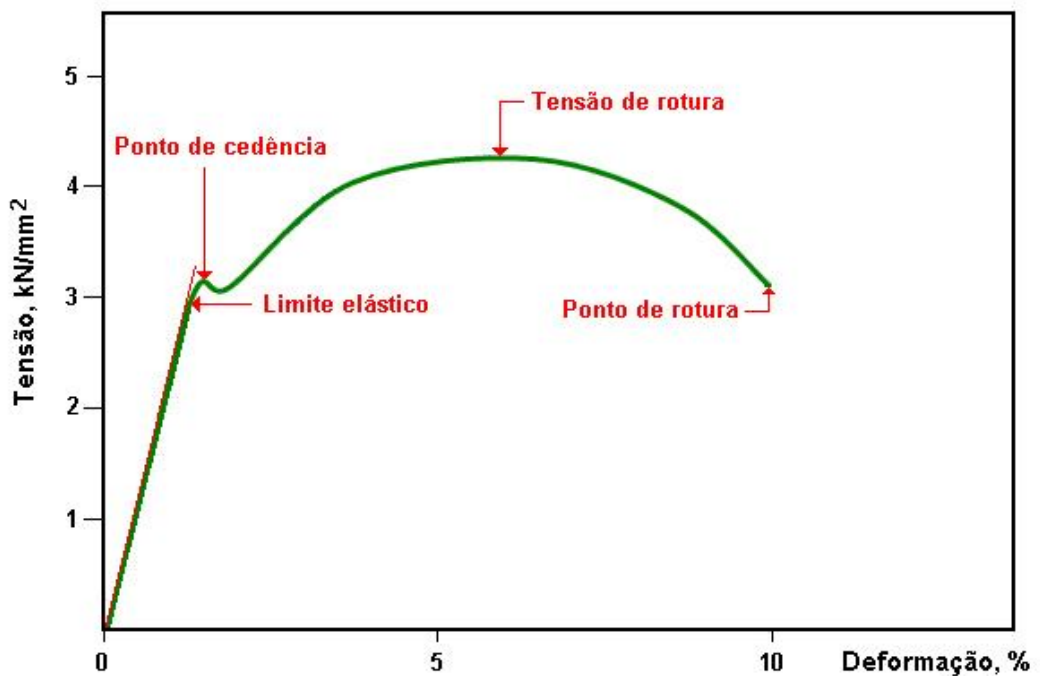
Segundo Duarte, frequentemente os materiais são testados em uma máquina de teste universal, onde há que se caracterizar a geometria do corpo sob teste. Para tanto, é imprescindível obter a função descritiva do comportamento mecânico do material com parâmetros envolvidos dependentes do material, sendo uma relação com tais preceitos é a curva “tensão-deformação”, ilustrada a seguir.

Figura 5: Curva da Tensão x Deformação mecânica sem indicação do seu ponto de cedência.



Fonte: MSPC (2009).

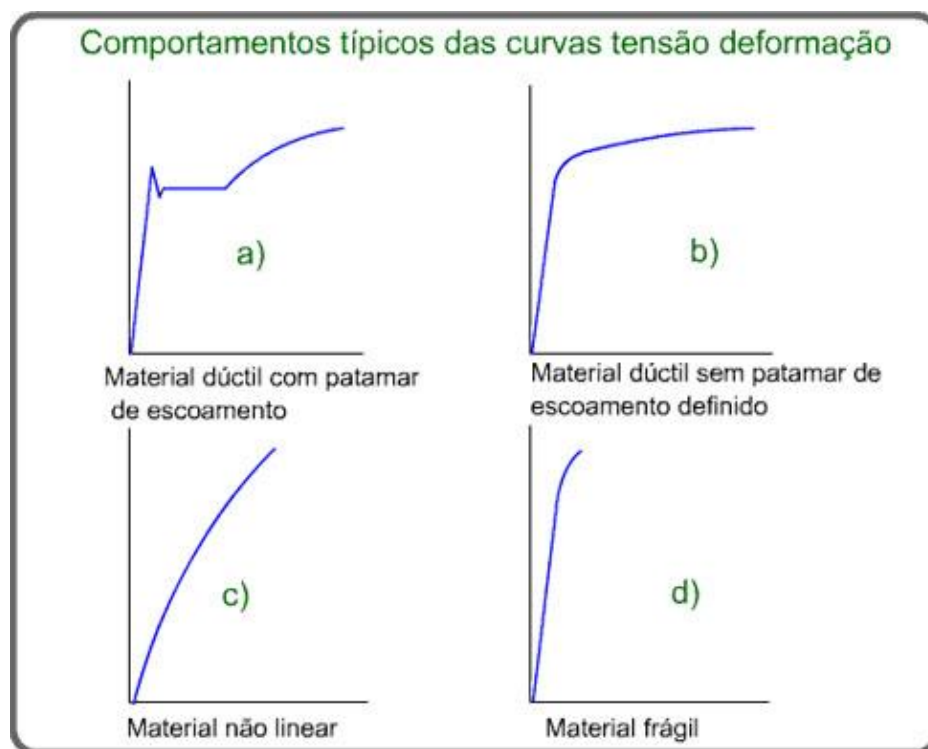
Figura 6: Curva da Tensão x Deformação mecânica com indicação do seu ponto de cedência



Fonte: MSPC (2009).

A seguir, nos gráficos da figura 7, são fornecidas quatro classificações para as propriedades de deformação dos materiais.

Figura 7: Gráficos com quatro comportamentos típicos das curvas Tensão-Deformação de materiais.



Em a) vê-se um material dúctil típico, como um aço de baixo carbono recozido. Entre os materiais dúcteis existem aqueles que não mostram claramente o patamar de escoamento, como em b). As figuras c) e d) mostram possíveis curvas de comportamento para materiais frágeis. No caso de c) aparece um comportamento não linear em baixos níveis de tensão, característica dos ferros fundidos. Já em d), o comportamento é elástico e linear até próximo da ruptura, característica de materiais cerâmicos e ligas fundidas de elevada

Fonte: CIMM (2010).

Propriedades mecânicas de materiais

As medidas e o entendimento dos significados da influência das propriedades mecânicas nas deformações como nas falhas se fazem necessários para o detalhamento do projeto estrutural de componentes haja visto que quando em serviço, os mesmos estarão submetidos a forças ou cargas inter-relacionadas entre si, de forma que deformações excessivas ou fraturas possam ser previstas e evitadas. Nos materiais há uma relação entre sua resposta a deformação ante a aplicação de uma força/carga.

Daí a importância dos experimentos laboratoriais com as propriedades mecânicas dos materiais e na forma mais realista quanto possível, considerando a intensidade – constante ou variável e natureza da carga aplicada – tração, compressão, ou de cisalhamento, além do tempo de permanência desta aplicação e as condições ambientais do entorno, com estudos e análises permanentes das propriedades dos componentes estruturais sejam através das técnicas experimentais de ensaio ou das análises matemáticas de tensão para a determinação das tensões e de como ocorrem suas distribuições dentro dos membros sujeitos às cargas.

Dentre tais propriedades mecânicas dos materiais estão a resistência à tração, elasticidade, ductilidade, fluência, fadiga, dureza, tenacidade, entre outras, sendo que numa 1ª etapa desta pesquisa, as investigações foram orientadas a se dedicar no estudo da relevância paramétrica do coeficiente de Poisson, Módulo de Elasticidade (E), coeficiente de encruamento (ν), limite de escoamento (S_y) e do coeficiente de elasticidade.

CONCEITOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

A curva tensão x deformação informa o comportamento de um membro quando submetido ao esforço de uma carga, seja a mesma na forma de tração, compressão ou de cisalhamento.

DISCORDÂNCIAS E SISTEMAS DE ESCORREGAMENTO

Imperfeições nos materiais cristalinos possibilitam o escorregamento de planos dentro do cristal tornando as mobilidades de discordâncias no principal fator da deformação plástica de metais e ligas, sendo que tais discordâncias podem ser alteradas pela composição e na manipulação das propriedades mecânicas do material. Vale dizer ainda, que tais discordâncias também afetam propriedades não-mecânicas do material como a condutividade elétrica dos semicondutores.

As discordâncias se movimentam com diferentes facilidades dentre os planos e também dentre as direções do cristal. Ela ocorre principalmente em planos e em determinadas direções destes, aonde haja a maior densidade atômica do cristal. Defini-se por sistema de escorregamento (*slip system*) a combinação de um plano e de uma direção favoráveis às discordâncias.

DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

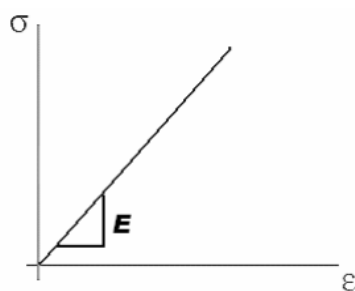
É o processo de deformação aonde há proporcionalidade linear entre a tensão (σ) e a deformação (ϵ), resultando numa reta no gráfico de σ x ϵ , conforme mostrado na Figura 8.

A intensidade da força de tensão imposta à estrutura é responsável pela deformação da mesma, sendo denominada por Lei de Hooke, que nos metais é dada por:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Aonde: constante de proporcionalidade E é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young.

Figura 8 – Lei de Hooke



Fonte: Unioeste (2005)

Vale dizer que a Lei de Hooke não é válida para quaisquer valores de deformação pois ela é uma aproximação para quando a tensão é relativamente baixa e que a deformação elástica não é permanente posto que quando a carga deixar de ser aplicada a estrutura, então, esta retornará a sua forma original.

Tabela 1 – Módulos de Elasticidade, de cisalhamento e coeficiente de Poisson para algumas ligas metálicas.

Módulos de elasticidade e de cisalhamento e coeficiente de Poisson					
Liga Metálica	Módulo de Elasticidade		Módulo de Cisalhamento		Coeficiente de Poisson
	GPa	10 ⁶ psi	GPa	10 ⁶ psi	
Alumínio	69	10	25	3,6	0,33
Latão	97	14	37	5,4	0,34
Cobre	110	16	46	6,7	0,34
Magnésio	45	6,5	19	2,5	0,29
Níquel	207	30	76	11	0,31
Aço	207	30	93	12	0,30
Titânio	107	15,5	45	6,5	0,34
Tungstênio	407	59	160	23,2	0,28

Fonte: Unioeste (2005)

Observa-se que os módulos de elasticidade são menores materiais metálicos e maiores nos cerâmicos, causadas pelas suas respectivas e diferentes ligações atômicas.

Há um comportamento elástico do material sempre que sobre ele houver a presença de tensões compressivas, de cisalhamento ou torcionais, sendo que a tensão e a deformação de cisalhamento são proporcionais conforme:

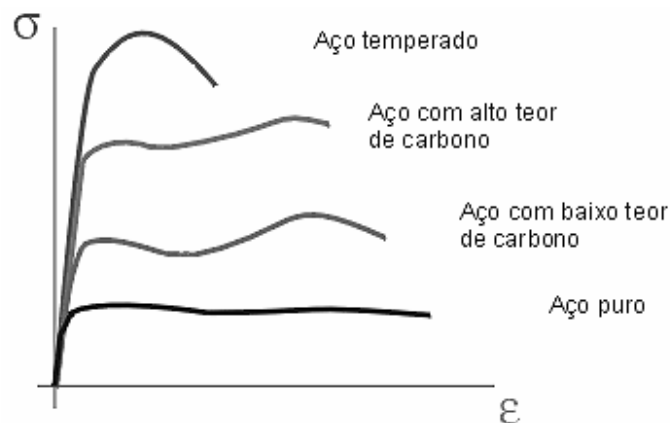
$$\tau = - \gamma$$

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

O regime elástico permanece apto para deformações mecânicas de até 0,0005 sendo que após esse ponto a linearidade entre tensão x deformação deixa de existir e a deformação passa a ser irreversível ou chamada por deformação plástica. Neste caso, a Lei de Hooke não mais regula esta relação.

Abaixo alguns gráficos de tensão x deformação para certos aços em que se nota uma linearidade para baixas tensões, logo seguida de uma região não-linear a qual é denominada por região de deformação plástica.

Figura 9 – Gráfico Tensão x Deformação Plástica



Fonte: Unioeste (2005)

TENSÃO NOMINAL E DEFORMAÇÃO NOMINAL

Em um ensaio de tração as medições são da força/carga aplicada e da deformação/alongamento obtido na peça, sendo que para a determinação da tensão considera-se a área do corpo de prova, que, no entanto, durante estes procedimentos laboratoriais, o objeto de análise apresenta diminuição de sua seção reta pois o mesmo se alonga, o que em última análise reflete na medição desta tensão. Daí a utilidade da chamada tensão nominal e deformação nominal, ambas calculados tomando como base a sua área inicial, ou seja, considera-se que o objeto mantenha constante sua área original durante toda essa medição.

TENSÃO NOMINAL

A tensão de engenharia ou tensão nominal (σ em MPa) é definida pela relação:

$$\sigma = F / A_0$$

Sendo: F = força aplicada e A_0 = área inicial aonde a carga é aplicada.

DEFORMAÇÃO NOMINAL

Ou deformação de engenharia (ϵ) é definida por:

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Aonde:

l_0 = comprimento original do objeto antes da carga lhe ser aplicada;

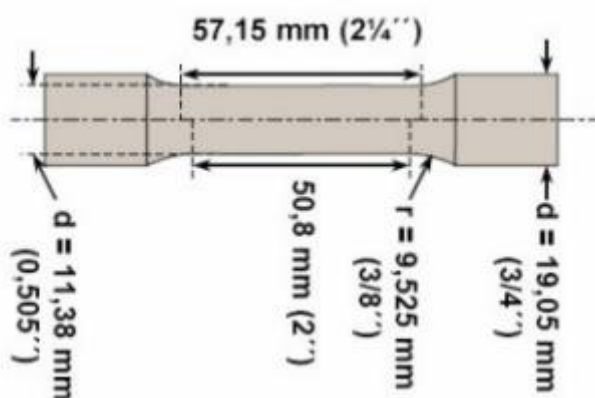
l_i = comprimento instantâneo antes da carga lhe ser aplicada.

$(l_i - l_0)$ ou Δl = deformação ou variação no comprimento referido ao comprimento original.

ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é o mais usual dentre os ensaios mecânicos de tensão-deformação, todos avaliadores de diversas propriedades mecânicas dos materiais tão importantes em projetos. Neste, uma crescente carga de tração e que aplicada ao longo do eixo mais longo de um corpo de prova, produz uma deformação também gradativa até que ocorra a fratura do corpo sob teste, sendo que o mais comum nestes ensaios é que a deformação se concentre na sua região mais central.

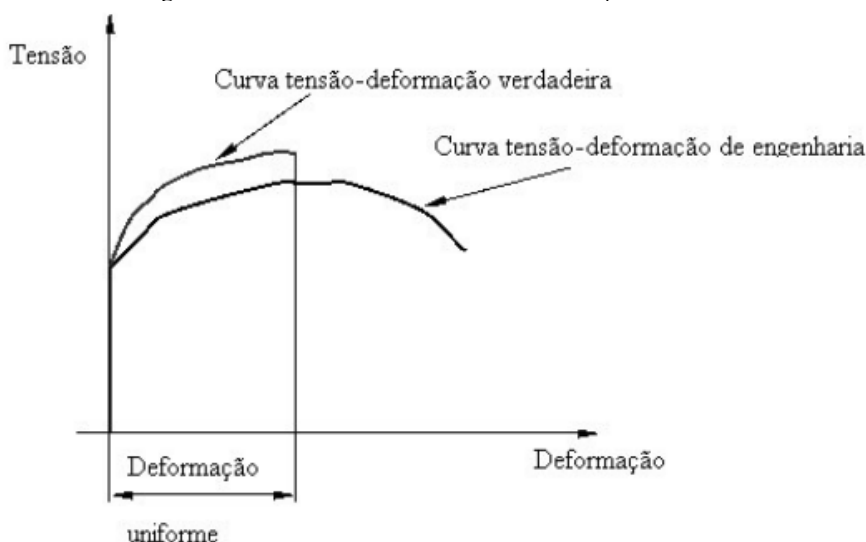
Figura 10 – Corpo de prova padrão para ensaio de tração



Fonte: Unioeste (2005)

Os resultados de um ensaio de tração são anotados em um gráfico de tensão x deformação (Figura 11).

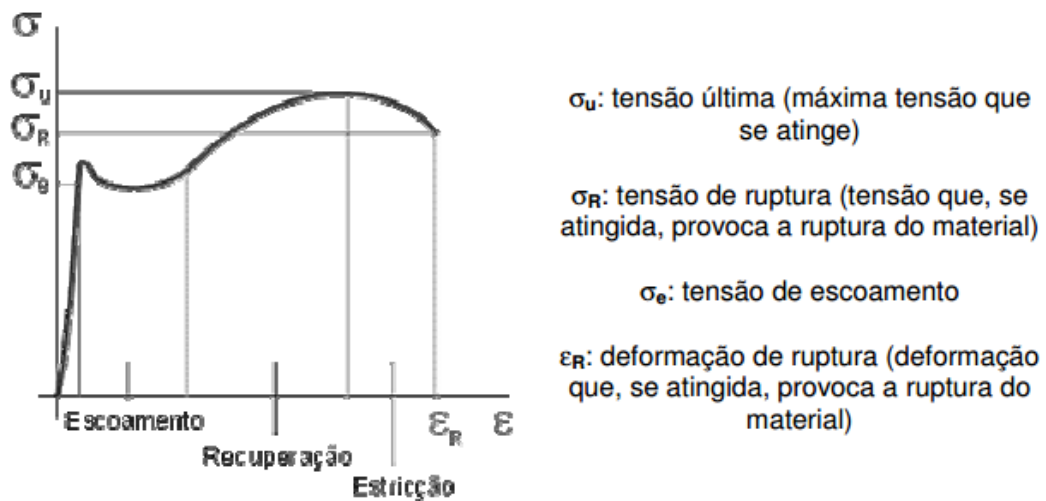
Figura 11 – Gráfico Tensão nominal x Deformação Nominal



Fonte: Unioeste (2005)

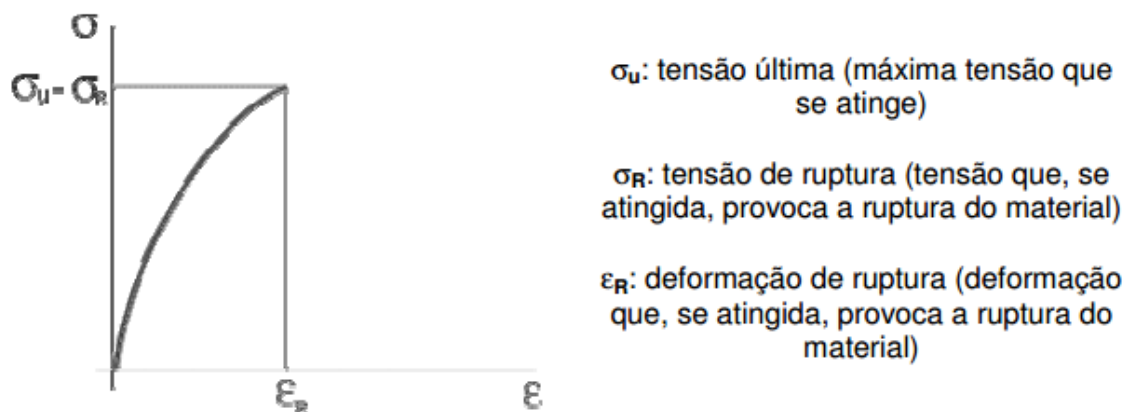
Outras informações sobre várias propriedades do material sob teste são possíveis a partir do teste tensão x deformação, conforme figuras 12 e 13, onde há dois grupos de materiais: os dúcteis e os frágeis, sendo que os dúcteis, se sob ação de uma força, eles podem se esticar até se transformarem em fio; enquanto que com os frágeis isso não é possível e haveria o rompimento o material sob tração.

Figura 12 – Diagrama σ x ϵ para material dúctil (aço estrutural)



Fonte: Unioeste (2005)

Figura 13 – Diagrama σ x ϵ para material frágil (ferro fundido ou vidro)



Fonte: Unioeste (2005)

Procedimentos metodológicos

Modo de coleta de dados

Como já informado, nesta 1ª etapa, as investigações se dedicarão a estudar a relevância paramétrica (como: coeficiente de Poisson, Módulo de Elasticidade, coeficiente de encruamento, limite de escoamento e coeficiente de elasticidade) no ajuste ótimo dos equipamentos de fabricação de terminais elétricos crimpados em ligas metálicas.

Modo de análise dos dados coletados

Posteriormente, com uso da ferramenta computacional de Elementos Finitos (EF), que possui solução explícita para a equação dinâmica que governa o fenômeno físico estudado, identificar a relevância importância de cada parâmetro no comportamento elástico e plástico de materiais até a escolha do melhor ajuste possível de cada parâmetro numérico para o modelo em EF projetado para se simular o experimento.

Baseando-se nesta análise dimensional, pretende-se determinar, com uma boa precisão, uma EPG da FC. Genericamente, ela pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_s)$$

Sendo que: s é o nº de grupos adimensionais do fenômeno em estudo, obtidos do Teorema π de Buckingham, segundo Murphy (1950).

Conclusão

Este trabalho é uma terça parte dentro de uma pesquisa mais abrangente e que vem contribuir para o esperado resultado final – a obtenção de Equação Preditiva Geral (EPG), sendo que os demais pesquisadores envolvidos corroboram com os resultados para os quais esta pesquisa ora se encaminha e que também conta com a parceria de âmbito internacional com a Sala CIMNE Universidade da Catalunha de Barcelona, da Espanha. Os resultados aguardados são promissores haja visto que, a priori, trata-se de objeto sem desenvolvimentos similares anteriores.

Referências Bibliográficas

CIMM. **Tensão-deformação e o Comportamento dos Materiais**. Disponível em: http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7103-tensao-deformacao-e-o-comportamento-dos-materiais. Acessado em 02 junho 2017 e 28 junho 2017.

CLUBE DO HARDWARE. Disponível em: <http://www.clubedohardware.com.br/forums/topic/1019473-resolvido-onde-encontrar-este-licate/>. Acessado em 05 julho de 2017.

DUARTE, E.N. **Elementos Finitos y similitude aplicados a la conformación mecánica** - Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica – Ed. EAE - 2012.

MOLEX. **Quality Crimp Handbook**. Lisle, Molex S.A, 2009 Disponível em: http://www.molex.com/pdm_docs/ats/TM-638000029.pdf. Acessado em: 18 junho 2017.

MSPC. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/ciemat/ensaio110.shtml>. Acessado em: 01 junho 2017 e 28 de junho 2017.

MURPHY, G. **Similitude in Engineering**. The Ronald Press Company, Iowa State University - N.Y., 1950.

NINE, H. D. **Drawbead forces in sheet metal forming**. In: D. P. Koistinen, N. M. Wang (Eds.), *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Plenum Press, New York, 1978. p. 179-211.

POLOLU. **Terminals Crimped**. Disponível em: <https://www.pololu.com/product/1930>>. Acessado em: 05 julho de 2017.

Ensinando Elétrica. **Crimpar Terminais Eletromecânicos**. Disponível em: <https://ensinandoeletrica.blogspot.com.br/2014/09/crimpar-terminais-eletromecanicos.html>]. Acessado em: 03 maio 2017.

SERAFIM, E. S. **Implementação de uma Biblioteca Informática para Diversos Tipos de Elementos Finitos em 2D e 3D**, - UFSC – 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/77748/262782.pdf?sequence=1>
>

Bibliografia

BELYSTSCHKO, Ted. *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, 1 ed. Michigan University, Ed. Wiley, 2000. 2014.

MORITA, T. et al. *Numerical Model of Crimping by Finite Element Method*. IEEE. 1996.

OÑATE, E. *Structural Analysis with the finite elements method*. Linear Statistics, Springer, Barcelona, 2009.

STAMPACK® *Basic Concepts Theory Manual*, Quantech ATZ S.A., Barcelona, Spain, 2001 e 2003.

ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L. *El método de los elementos finitos*. Mecánica de sólidos, Vol. 2. 5. Ed., CIMNE, Barcelona, España, 2004.

STUDY OF SENSITIVITY PARAMETRIC OF MATERIALS IN CRIMPAGE OF ELECTRICAL TERMINALS.

ABSTRACT

This work proposes the analysis of an industrial product - an electrical terminal connected to the cable / electrical wire, that is, this terminal crimped by a specific tool and usually of the manual type. In order to do this, the mechanical and electrical parameters must be determined, which will influence the choice of the best option among the materials available and suitable for the purposes demanded by the market and that meet the technical norms that regulate this segment for then, after the identification of the (Equation) to represent it to simulate computationally in order to verify the performances before the different options of materials for the composition of this terminal.

Key words: *Electric terminals crimped. Parametric sensitivity of materials. Finite elements.*

Enviado em 07/2017.

Aceito em 01/2018.