

# AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DO CRAVAMENTO EM COLUNAS DE DIREÇÃO

*Alexandre Santos Francisco<sup>1</sup>*  
*Ivan Napoleão Bastos<sup>2</sup>*

**Resumo:** Diversas partes das colunas de direção de automóveis são fixadas por interferência de diâmetros e, adicionalmente, por ação de cravamento mecânico. Para determinar o efeito destes procedimentos na fixação dos rolamentos nas juntas de colunas de direção foram realizados ensaios de remoção dos rolamentos. Foram testadas populações amostrais das juntas com e sem cravamento. A influência dos procedimentos de cravamento e da interferência dimensional na integridade das colunas de direção foi determinada experimentalmente com curvas força *versus* deslocamento. Os resultados indicaram que o cravamento mais que dobra a força de remoção e aumenta em 24% a energia absorvida na remoção total. Testes estatísticos de aderência mostraram que a força de remoção obedece a uma distribuição log-normal. A partir destes dados pôde-se determinar a confiabilidade estrutural das juntas de colunas de direção, cujo resultado indica que com o cravamento a taxa esperada de falha é próxima de zero para uma carga mínima de 2000 N. Este trabalho permitiu conhecer a importância do cravamento no procedimento de sujeição de juntas automotivas, e estabelecer novos padrões na montagem das colunas de direção, usando argumentos mecânicos e estatísticos.

**Palavras-chave:** integridade estrutural, colunas de direção.

**Abstract:** Several parts of automotive steering columns are fixed by both dimensional interference and mechanical-plastic sticking of one part to another. To determine the effect of these fixing procedures on the joints of steering columns, pull-out tests were performed. Samples with and without sticking were tested. The influence of the sticking and interference procedures on the integrity of the steering columns was experimentally determined by force-distance curves. The results suggested that the sticking increases more than twice the pull-out force and augments about 24% the absorbed energy in the whole pull-out process. Statistical fitting tests show that pull-out forces obey a log-normal distribution. From these data were possible to estimate the structural reliability of joints of steering columns, which results indicate that the fail probability is close to zero for a minimum pull-out force of 2000 N. This work allows for knowing the importance of the sticking procedure in the fixation of automotive pieces, and establishing new standards for the assembly of steering columns in mechanical and statistical basis.

**Key-words:** structural integrity, steering columns.

---

<sup>1</sup>EEIMVR/UFF, e-mail: francisco@metal.eeimvr.uff.br

<sup>2</sup>IPRJ/UERJ, e-mail: inbastos@iprj.uerj.br

## 1. INTRODUÇÃO

O controle de processos é uma etapa fundamental no desenvolvimento das técnicas de controle estatístico de qualidade. Ao estruturar as etapas que compõem a realização de um produto, é possível obter muitas informações sistematizadas e perceber os pontos críticos, oportunidades de melhoria e, principalmente, as variações do processo.

No desenvolvimento deste trabalho foi estudado o processo de fabricação de uma coluna de direção automotiva. Como ponto crítico identificou-se o rolamento cravado das juntas (figura 1), que é classificado como item de segurança, pois sua falha implica na falta da dirigibilidade, podendo levar a graves acidentes (Acierno et al, 2004). Para garantia da integridade do rolamento nas juntas é especificada uma força mínima de remoção empregada em ensaios mecânicos.

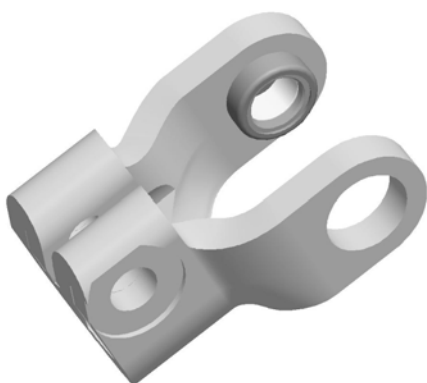


Figura 1- Junta da coluna de direção.

Na montagem do rolamento utiliza-se uma prensa com um pino que guia e monta o rolamento em seu alojamento, seguido de um punção que faz o cravamento na peça. Para o controle da qualidade da montagem do rolamento na junta, todas as peças são cravadas, seguindo-se uma inspeção visual de 100% para verificar se o cravamento foi realizado. Uma questão relevante é conhecer a influência do cravamento na integridade estrutural da junta. Se a remoção do rolamento sem cravamento estiver dentro do

especificado, poderiam ser eliminados a manutenção dos punções utilizados para fazer o cravamento, e a inspeção visual, reduzindo o custo de produção.

Neste trabalho foram aplicados os conhecimentos da Teoria da Confiabilidade (Elms, 1999; Thoft-Christenses *et al*, 1982). Com esta teoria pode-se avaliar quantitativamente a importância relativa do processo de cravamento na integridade estrutural das peças. Nela, a confiabilidade é definida como uma grandeza numérica que caracteriza a aptidão de um produto de funcionar sem falha, empregando metodologias científicas em atividades tecnológicas para prever, estimar, controlar, melhorar, otimizar processos em geral. A confiabilidade da junta da coluna de direção é determinada a partir dos dados experimentais, obtidos na realização de ensaios mecânicos padronizados para a peça. No estudo estatístico foram selecionadas juntas com e sem cravamento, conforme Figura 2.



Figura 2 – Juntas com (A) e sem cravamento (B).

## 2. ENSAIO DE REMOÇÃO DOS ROLAMENTOS

Para estudar duas populações de peças, foram empregadas 60 juntas e rolamentos, sendo 30 montadas com cravamento e 30 sem. A seguir foi realizado o ensaio de remoção total dos rolamentos. A velocidade de deslocamento do travessão foi de 95 mm/min. Neste ensaio, um pino avança axialmente sobre o rolamento e a junta deve suportar uma força mínima pré-definida. Avalia-se então a resistência à

remoção devido ao volume de interferência e ao cravamento. Neste trabalho a força mínima a ser suportada foi especificada em 2000 N.

Os dados apresentados na Tabela 1 mostram as forças máximas de resistência nos ensaios de remoção dos rolamentos nas juntas com e sem cravamento.

Tabela 1 – Força (N) encontrada nos ensaios de remoção dos rolamentos				
<i>com cravamento</i>				
3885	3475	3784	4235	3915
3868	3877	3708	4273	4175
3606	4121	3640	4155	4130
3608	3653	3488	4227	4354
3572	3720	4062	4151	4164
3306	3767	4932	4759	4649
<i>sem cravamento</i>				
1942	1879	1660	1841	1706
1866	1837	1938	1774	2048
1947	1600	1896	1828	1904
2057	2044	2014	1731	1769
1609	1499	2010	1833	2023
<b>2031</b>	2162	1896	1904	2095

### 3. ANÁLISE MECÂNICA DA CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO

A partir das 60 curvas força-deslocamento ( $F - \delta$ ) aplicadas axialmente para retirada da barra de direção é possível retirar a parte elástica total para obter somente a componente plástica que expressa a energia absorvida. Sabendo que a rigidez do conjunto barra de direção-máquina de tração ( $K_{total}$ ) é essencialmente constituída pela rigidez da barra de direção ( $K_{total} \cong K_{junta}$ ), conforme Dieter (1981), pode-se extrair o deslocamento plástico  $\delta_{plástico}$  ao corrigir as curvas força-deslocamento pela expressão

$$\delta_{plástico} \cong \delta_{total} - \frac{F}{K_{total}}$$

Assim obtém-se a curva cuja área representa a energia absorvida para a completa remoção do rolamento, e

ressalta-se que é possível observar o efeito dos parâmetros cravamento e interferência dos diâmetros internos e externo. As curvas apresentadas são típicas dos 30 ensaios de cada condição. Observa-se que o efeito do cravamento está em aumentar a força média de remoção em aproximadamente 112% (de 1878 N para 3975 N) e aumentar a energia absorvida em 24% (de 9,53 J para 11,8 J). Nota-se que o aumento promovido pelo cravamento não é linear para a força de remoção e a energia absorvida. Mais ainda, pela análise da curva apresentada na Figura 3, ressalta-se que o efeito do cravamento é restrito a cerca de 2 mm de deslocamento, que corresponde a aproximadamente à dimensão do próprio cravamento. Além desta distância, toda resistência é fornecida pelo volume de interferência entre os diâmetros ( $I$ ), que numa primeira aproximação pode ser expressa como

$$I = \frac{\sigma_{circ} \phi_{ext}^2}{E \phi_{int}}$$

onde  $\sigma_{circ}$  é a tensão circunferencial,  $\phi$  corresponde aos diâmetros internos e externos, e  $E$  é o módulo de elasticidade do aço. Após cerca de 2 mm de deslocamento no regime plástico do rolamento, toda resistência se deve à interferência, e não mais ao cravamento. Logo, percebe-se que o cravamento é importante pois dificulta o início da remoção. Entretanto, pouco aumenta a energia total necessária para a completa remoção, tal como mostrado na superposição das curvas força-deslocamento após esta distância. Isto posto, conclui-se que a análise da integridade estrutural pode ser bem representada pela força máxima de resistência à remoção dos rolamentos. Após este estudo, procedeu-se à análise estatística da força de remoção e ao estudo de confiabilidade estrutural.

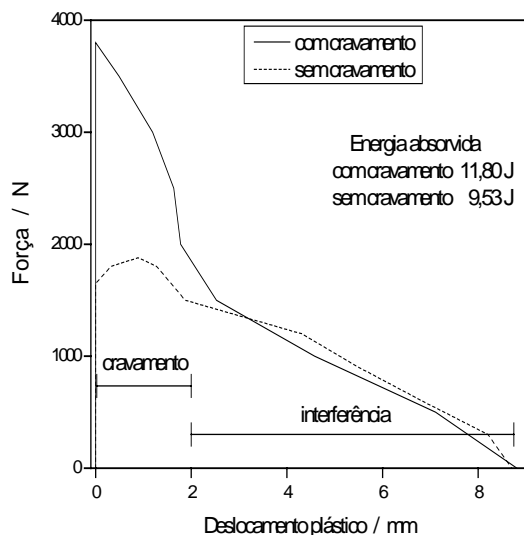


Figura 3 – Curva força *versus* deslocamento plástico do ensaio de remoção.

#### 4. DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

O estudo estatístico inicia-se com a construção do histograma de frequência das forças de resistência de remoção dos rolamentos (Augusti *et al*, 1984). Este histograma indica como a distribuição de dados se apresenta por intervalos de classe. Na Figura 4 são apresentados os histogramas para as duas populações amostrais.

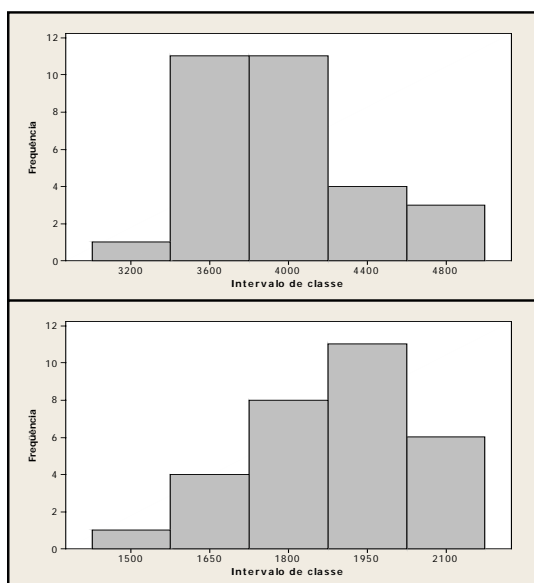


Figura 4 – Histogramas das forças de resistência, com (acima) e sem (abaixo) cravamento.

Neste trabalho foram testados quatro distribuições probabilísticas para verificar o melhor modelo das forças de resistência à remoção dos rolamentos: exponencial, log-normal, normal e Weibull. As funções de distribuição desses modelos são estabelecidas a partir de uma análise quantitativa dos dados experimentais, onde parâmetros como média e variância são fundamentais nesta análise. A seguir são apresentados os valores estatísticos: A média  $\mu$  é o somatório de valores das forças dividido pelo número de amostras ( $n = 30$ ). Os resultados são: (a) com cravamento tem-se  $\mu = 3.975$  N e (b) sem cravamento  $\mu = 1.878$  N. A variância  $\sigma^2$  é a medida do grau de dispersão dos valores em relação ao valor médio. Os resultados são: (a) com cravamento tem-se  $\sigma^2 = 149.646$  N<sup>2</sup> e (b) sem cravamento  $\sigma^2 = 20.576$  N<sup>2</sup>.

Pela análise visual dos histogramas, pode-se afirmar que a distribuição normal não é um modelo adequado, pois o histograma com os dados experimentais das forças de resistência apresenta uma assimetria em relação aos valores médios, conforme pode ser visto na Figura 5.

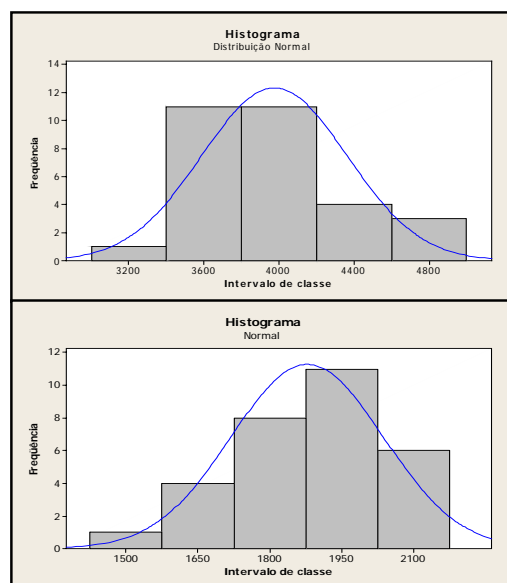


Figura 5 – Distribuição normal das forças de resistência, com (acima) e sem (abaixo) cravamento.

Pode-se, também visualmente, rejeitar a hipótese de distribuição exponencial para os dados experimentais devido à grande discrepância de forma entre as curvas do modelo exponencial e os histogramas, conforme pode ser visto na Figura 6.

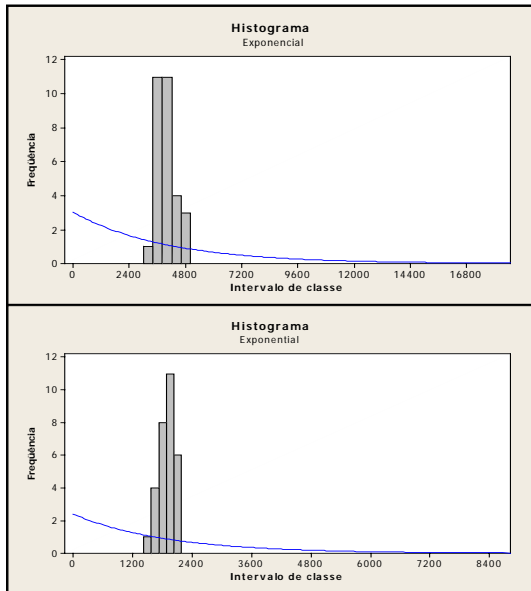


Figura 6 – Distribuição exponencial das forças de resistência, com (acima) e sem (abaixo) cravamento.

Também foi verificada a adequação dos modelos de distribuição log-normal e Weibull para amostras com cravamento. As Figuras 7 e 8 apresentam suas respectivas probabilidades acumuladas por intervalos de classe das forças de resistência com cravamento.

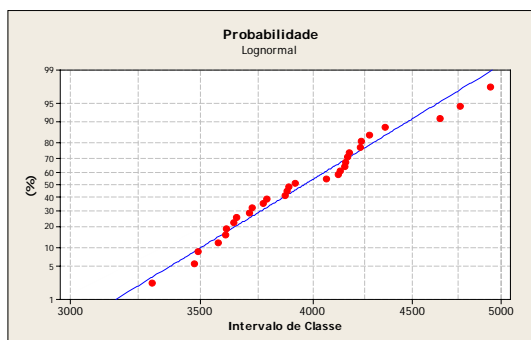


Figura 7 – Probabilidade acumulada log-normal das forças de resistência, com cravamento.

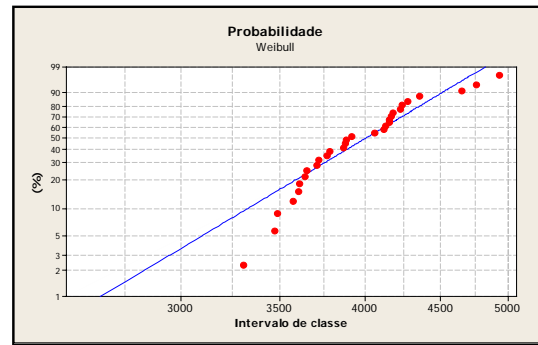


Figura 8 – Probabilidade acumulada Weibull das forças de resistência, com cravamento.

O modelo de distribuição será tão mais adequado quanto menos os dados experimentais estiverem dispersos em torno dos valores teóricos de probabilidade. Assim, conforme pode-se notar nas Figuras 7 e 8, a distribuição log-normal apresenta menor dispersão de dados experimentais que a Weibull. Portanto, este modelo é o mais adequado para representar a distribuição das forças de resistência à remoção dos rolamentos com cravamento.

Para as amostras sem cravamento, as curvas da função de distribuição acumulada dos modelos log-normal e Weibull tiveram um resultado ligeiramente diferente das amostras com cravamento (ver Figuras 9 e 10).

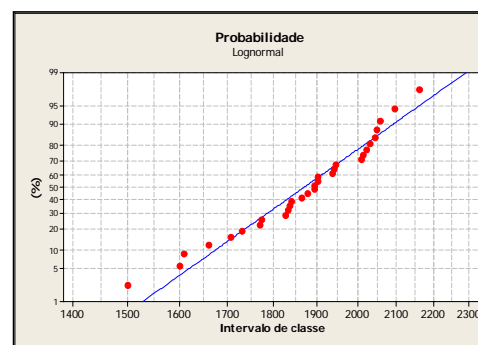


Figura 9 – Probabilidade acumulada log-normal das forças de resistência, sem cravamento.

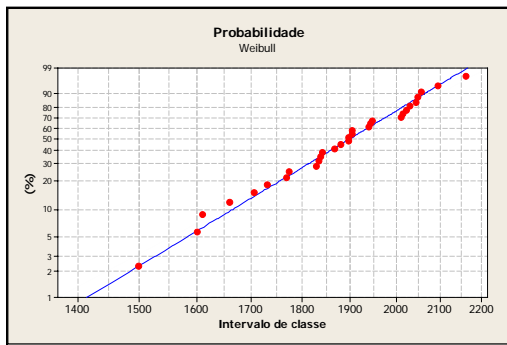


Figura 10 – Probabilidade acumulada Weibull das forças de resistência, sem cravamento.

Tanto a distribuição log-normal quanto a Weibull apresentam boa concordância com as curvas teóricas com uma avaliação visual das curvas. Como o modelo de distribuição log-normal é geralmente o adotado em análise de confiabilidade, então aplicou-se o teste da aderência para verificar estatisticamente sua adequação para representar as forças de resistência.

### 5. TESTE DE ADERÊNCIA

Com a construção dos histogramas e escolha do modelo de distribuição, pode-se aceitar ou não o modelo de acordo com o resultado do teste de aderência. O teste aplicado foi o de aderência qui-quadrado.

A distribuição log-normal é geralmente empregada em problemas envolvendo fadiga de materiais, vida de componente mecânicos, e outros. Para esta distribuição, dois parâmetros são importantes para derivar sua função de densidade de probabilidade da variável aleatória força de resistência à remoção dos rolamentos:  $s$  e  $r_0$ . As relações que permitem determinar estes parâmetros podem ser encontradas em Montgomery (1996).

A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros da distribuição log-normal das forças de resistência nas amostras com e sem cravamento.

No teste qui-quadrado, as frequências de ocorrência das forças de resistência observadas  $O_i$  em cada intervalo de classe  $i$  são relacionadas com as frequências esperadas  $E_i$ , as

quais são determinadas a partir da função de distribuição do modelo log-normal. Um parâmetro de teste é definido pela relação (Montgomery, 1996):

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^{30} \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Tabela 2 – Parâmetros da distribuição log-normal

Parâmetro	Com cravamento	Sem cravamento
$s$	0,097	0,076
$r_0$	3957	1873

Na Tabela 3 são apresentados as frequências observadas e esperadas nas amostras com cravamento e sem cravamento, respectivamente.

Tabela 3 – Frequências das amostras com cravamento

Classe de intervalo F(N)	Frequência observada	Probabilidade de ocorrência	Frequência esperada
0 – 3000	0	0,00219	0,0656
3000 – 3400	1	0,0527	1,72
3400 – 3800	11	0,272	8,34
3800 – 4200	11	0,395	11,9
4200 - 4600	4	0,21	6,3
4600 - 5000	3	0,0526	1,58

Classe de intervalo F(N)	Frequência observada	Probabilidade de ocorrência	Frequência esperada
0 - 1425	0	0,000165	0,0049
1425 - 1575	1	0,0111	0,333
1575 - 1725	4	0,13	3,9
1725 - 1875	8	0,37	11,1
1875 - 2025	11	0,34	10,2
2025 - 2175	6	0,13	3,9

Se as forças de resistência experimental seguem a distribuição log-normal, pode-se mostrar que o parâmetro de teste  $\chi_0^2$  seguirá uma distribuição qui-quadrado  $\chi_{\alpha, k-p-1}^2$  com  $k-p-1$  graus de liberdade, onde  $\alpha$  é a probabilidade de se rejeitar a hipótese, dado que a hipótese é verdadeira,  $k$  é o número de intervalos de classe empregado no histograma, e  $p$  é o

número de parâmetros da distribuição log-normal. A hipótese de que as forças de resistência seguem a distribuição log-normal pode ser rejeitada se o valor calculado do parâmetro de teste for maior que o da variável qui-quadrado. Ou seja, observa-se que em ambas amostras com e sem cravamento o número de intervalos de classe é 6 e o número de parâmetros da distribuição é 2. Considerando  $\alpha$  igual a 0,05, tem-se portanto como valor da variável qui-quadrado teórica  $\chi_{0,05,3}^2 = 7,81$ .

A partir dos dados da Tabelas 3, tem-se como resultados do parâmetro de teste  $\chi_0^2$  das amostras com e sem cravamento os seguintes valores: 3,39 e 3,4, respectivamente. Como os valores do parâmetro de teste da distribuição log-normal são inferiores ao da variável qui-quadrado para ambas amostras, tais resultados satisfazem o critério do teste de aderência qui-quadrado. Assim, conclui-se que não há forte evidência de que a distribuição das forças de resistência, nas condições com e sem cravamento, não seja a log-normal; e esta distribuição pode então ser escolhida para modelar as forças de resistência à remoção dos rolamentos.

## 6. INTEGRIDADE ESTRUTURAL DA PEÇA

A integridade estrutural da coluna de direção pode ser avaliada pela probabilidade de falha do rolamento na junta. Um estado limite de falha fica estabelecido pela relação entre variáveis aleatórias de forças de resistência  $R$  e de sollicitação  $S$  que governam a remoção do rolamento. Assim, uma função de estado limite pode ser expressa como (Lewis, 1987):

$$G(R, S) = R - S$$

As possíveis realizações de  $R$  e  $S$  podem ser separadas em duas regiões: segura e falha. Logo, a função de estado limite fica definida na região falha se  $G(R, S) \leq 0$ . No caso em que  $R$  e  $S$  sejam variáveis normalmente distribuídas e a função de estado limite

é linear, e podemos usar o método *FORM* simplificado (Thoft-Christensen *et al*, 1996). A variável  $G$  é chamada de margem de segurança. Então, a média e a variância de  $G$  são respectivamente:

$$\begin{aligned} \mu_G &= \mu_R - \mu_S \\ \sigma_G^2 &= \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \end{aligned}$$

Logo, o valor da probabilidade de falha fica determinado da seguinte forma:

$$P_f = P(G \leq 0) = F\left(\frac{0 - m_G}{s_G}\right) = \Phi\left(\frac{\ln m_s - \ln r_0}{s}\right)$$

onde  $\Phi$  é função de distribuição normal-padrão.

Podemos considerar que para garantir a adequação da coluna de direção uma força mínima de 2000 N deva ser suportada pelo rolamento no ensaio de remoção. Ou seja, o valor da força de sollicitação é constante. Graficamente, pode-se determinar a probabilidade de falha pelo cálculo da área hachurada da Figura 11.

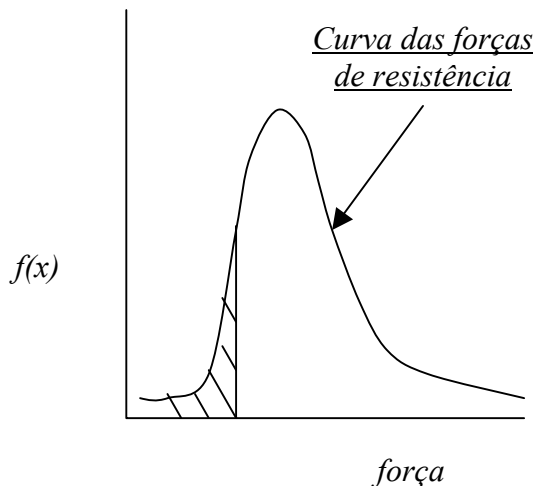


Figura 11 – Densidade de probabilidade versus força de resistência.

Assim, a probabilidade de falha das colunas de direção em juntas com cravamento é dada por

$$P_f = \Phi\left(\frac{\ln 2000 - \ln 3956}{0,1}\right) \cong 0,0$$

E em juntas sem cravamento,

$$P_f = \Phi\left(\frac{\ln 2000 - \ln 1871}{0,08}\right) \cong 0,8$$

Observa-se que a probabilidade de falha em juntas com cravamento é praticamente nula, e para juntas sem cravamento é de cerca de 80%. Em outras palavras, tem-se uma confiabilidade próxima de 100% em ensaios de remoção dos rolamentos quando se realiza o processo de cravamento na peça e de apenas 20%, caso contrário. Este ganho de confiabilidade com relação ao processo sem cravamento é bastante expressivo, levando-se em conta ainda que o cravamento é um processo mecânico relativamente fácil e de baixo custo para ser implementado numa linha de produção.

## 7. CONCLUSÕES

O processo de sujeição dos rolamentos em juntas de colunas de direção é constituído pelo cravamento e pela interferência de diâmetros. O cravamento é responsável por aproximadamente metade da força necessária para o início da remoção dos rolamentos, e a interferência por praticamente toda energia absorvida até a completa remoção dos rolamentos nos ensaios realizados com controle da taxa de deslocamento em 95 mm/min. Nestas condições, os valores típicos da força máxima de remoção e da energia plástica absorvida são, respectivamente, em amostras sem cravamento 1878 N e 9,53 J; e com cravamento 3975 N e 11,80 J. O cravamento atua num deslocamento do rolamento de até 2 mm, e após esta distância a resistência depende apenas do volume de interferência. Por estes resultados, nota-se que a força de remoção é um parâmetro de mérito válido na avaliação de integridade dos componentes. As distribuições estatísticas das forças máximas de remoção avaliadas no teste de qui-quadrado foram log-normal. Conclui-se que somente os rolamentos

fixados com cravamento apresentam uma confiabilidade próxima de 100% em relação à força mínima estipulada de remoção de 2000 N.

## BIBLIOGRAFIA

Acierno, E.; Kaufman, R.; Rivara, P. F.; Grossman, D. C.; Mock, C. (2004) "Vehicle mismatch: injury patterns and severity" *Accident Analysis and Prevention*, v. 36, p. 761-772.

Augusti, G., Baratta, A.; Casciati, F., (1984) *Probabilistic Methods in Structural Engineering*. Chapman and Hall: London, England.

Elms, D. G., (1999) "Achieving structural safety: theoretical considerations", *Structural Safety*, v.21, p. 311-333.

Dieter, G. E. (1981) *Metalurgia Mecânica*. Guanabara Koogan Ltda, Segunda edição: Rio de Janeiro, Brasil.

Lewis, E. E. (1987) *Introduction to Reliability Engineering*. John Wiley & Sons, Inc: New York, USA.

Montgomery, D. C., (1996) *Introduction to statistical quality control*. Willey, Third edition: New York, USA.

Thoft-Christensen, P.; Baker, M. J., (1982) *Structural Reliability Theory and Its Application*. Springer Verlag: Berlin, Germany.