

CLAUDIR JOSÉ NODARI

AVALIAÇÃO DE COLAPSO EM PINOS EXTRATORES APLICADOS A
MOLDES DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Ignácio Iturrioz

Porto Alegre
2010



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

**AVALIAÇÃO DE COLAPSO EM PINOS EXTRATORES APLICADOS A MOLDES DE
FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO**

CLAUDIR JOSÉ NODARI

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica**

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. HERBERT MARTINS GOMES
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. JUN SÉRGIO ONO FONSECA
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. JUAN PABLO RAGGIO QUINTAS
UFRGS / DEMEC**

**Porto Alegre
2010**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador, *Prof. Dr. Ignácio Iturrioz* que soube me aconselhar de forma única no desenvolvimento deste trabalho, a sua paciência e dedicação nos momentos que mais precisei.

Aos meus pais Antônio e Liane, tanto pelo apoio moral quanto financeiro ao longo do curso.

À Stihl Ferramentas Motorizadas Ltda., por permitir que eu desenvolvesse o tema deste trabalho, em particular, ao funcionário Claiton Beck pela cooperação no esclarecimento de dúvidas pertinentes ao sistema de extração de moldes de fundição sob pressão.

NODARI, C. J. Avaliação de colapso em pinos extratores aplicados a moldes de fundição sob pressão. 2010. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

O processo de fabricação por fundição é um método amplamente utilizado na indústria para a obtenção de componentes mecânicos diversos. Uma das modalidades de fundição que se pode destacar é a fundição sob pressão. Para esse tipo específico de processo, é imprescindível a utilização de pinos extratores para expulsar o produto para fora do molde. O mau dimensionamento do sistema de extração pode causar sérios problemas no funcionamento do molde e conseqüentemente trazer prejuízos indesejáveis. O foco deste trabalho está na avaliação da força de colapso dos pinos que estão sujeitos a um carregamento de compressão. Para tanto se fez necessário o dimensionamento da estrutura segundo a norma NBR 8800 que abrange esse assunto, e paralelamente a isso se efetuaram simulações numéricas por elementos finitos para assim confrontar os resultados encontrados com o ocorrido em campo. O valor de carga de colapso calculada pela norma teve uma diferença de aproximadamente 3% em relação ao encontrado nas simulações e foram de 3970N e 3850 N, respectivamente. Como o valor da força crítica de colapso evidenciada em campo está em torno de 3490 N, cabe salientar que neste estudo não foram levadas em consideração as forças de inércia nem a sensibilidade das propriedades mecânicas à velocidade de deformação aplicada.

PALAVRAS-CHAVES: Colunas extratoras, Colapso, Flambagem, Elementos finitos.

NODARI, C. J. Evaluation of collapse in extraction columns applied to die casting molds. 2010. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

The manufacturing process for casting is a method widely used in industry to obtain various mechanical components. One of the methods of casting that can highlight is the die casting. For this particular type of process is essential to use a pin extractor to expel the product out of the mold. The poor design of the extraction system can cause serious problems in the functioning of the mold and therefore harming undesirable. The focus of this study is to evaluate the critical force of the collapse of pins that are subject to a compression loading. For that made necessary the design of the structure according to NBR - 8800 which covers this subject, and in parallel this would be effected by the finite element numerical simulations to compare the results thus found with what happened on the field. The value of critical load calculated by the standard had a difference of about 3% compared to that found in the simulations and were 3970N and 3850 N, respectively. As the value of critical force of collapse seen in the field is around 3490 N, it is noted that this study were not taken into account the forces of inertia nor the sensitivity of mechanical properties at strain rate applied.

KEYWORDS: Extraction columns, Collapse, Buckling, finite elements.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1 Equações de Euler para flambagem.....	1
2.2 Índices de esbeltez	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	5
4.1 Modelo Teórico do Problema Estudado	6
5 METODOLOGIA.....	6
5.1 Solução analítica NBR – 8800.....	6
5.2 Simulação numérica do pino extrator comprimido (ANSYS®).....	8
5.3 Força de colapso encontrada em campo	13
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	14
7. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

O processo de fabricação por fundição é um método amplamente utilizado na indústria para a obtenção de componentes mecânicos. Uma das modalidades que se pode destacar é a fundição sob pressão. Tal processo pode gerar componentes com elevado acabamento superficial e uma tolerância dimensional apreciável, sem mencionar a alta produtividade envolvida e a facilidade de se agregar a automação no processo de fabricação.

Para a utilização desse processo de fundição é necessário um molde metálico, também denominado matriz, no qual o metal líquido é introduzido utilizando-se altas pressões. Depois de injetado o material líquido, e sua posterior solidificação, o molde, que é bipartido se separa e é nesse momento que atuam pinos para efetuar a extração das peças. Eles podem ser das mais variadas formas, sendo mais usual os de formato cilíndrico de seção uniforme.

O mau dimensionamento do sistema de extração pode causar sérios problemas no funcionamento do molde e conseqüentemente trazer prejuízos indesejáveis. A Stihl Ferramentas Motorizadas Ltda. possui um elevado número de moldes de fundição sob pressão que são utilizados na fabricação de cilindros de alumínio, sendo que em alguns desses ocorre com frequência a quebra de pinos extratores. Levando-se em consideração essas premissas, faz-se necessário um estudo mais detalhado a respeito da quebra desses componentes.

O objetivo desse trabalho é avaliar a causa do colapso de pinos que são utilizados na extração de peças fundidas, fazendo-se uso de cálculos analíticos segundo a norma brasileira correspondente (NBR 8800), bem como simulações computacionais com suas devidas simplificações como método complementar de análise.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem vários tipos de elementos que trabalham em compressão, dos quais a coluna é o mais conhecido. As colunas são membros verticais retos cujos comprimentos são consideravelmente maiores que suas larguras. (McCORMAC, 1991).

Uma coluna sujeita a compressão axial se encurtará na direção da carga. Se a carga se incrementa até que a coluna flambe, então o encurtamento cessará e a coluna se flexionará lateralmente, podendo ao mesmo tempo torcer-se em uma direção perpendicular ao seu eixo longitudinal.

2.1 Equações de Euler para flambagem

Segundo McCORMAC, 1991, o primeiro modelo teórico de flambagem foi desenvolvido pelo matemático suíço Leonhard Euler, considerando-se uma coluna carregada axialmente com as duas extremidades articuladas, como mostra a figura 2.1-b. A análise desse caso deu origem a equação 1, denominada equação de Euler para flambagem.

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (1)$$

Onde P_{cr} representa a carga crítica para ocorrência da flambagem elástica, E é o módulo de elasticidade do material, I o momento de inércia mínimo da seção da barra, e L o comprimento total da barra.

A variável n , que só admite valores inteiros, representa os infinitos modos que pode ocorrer a forma flambada de uma coluna. Segundo POPOV, 1978, como o interesse central é o menor valor no qual uma forma flambada pode ocorrer, o valor de n deve ser considerado

igual a unidade. Segundo o mesmo autor, este caso de coluna articulada em ambas as extremidades é com frequência chamado de caso fundamental.

A resistência de uma coluna e a maneira como ela falha dependem em grande parte de seu comprimento efetivo de flambagem. Segundo McCORMAC, 1991 tal parâmetro é definido como a distância entre pontos de momento nulo de uma coluna, ou seja, a distância entre os pontos de inflexão.

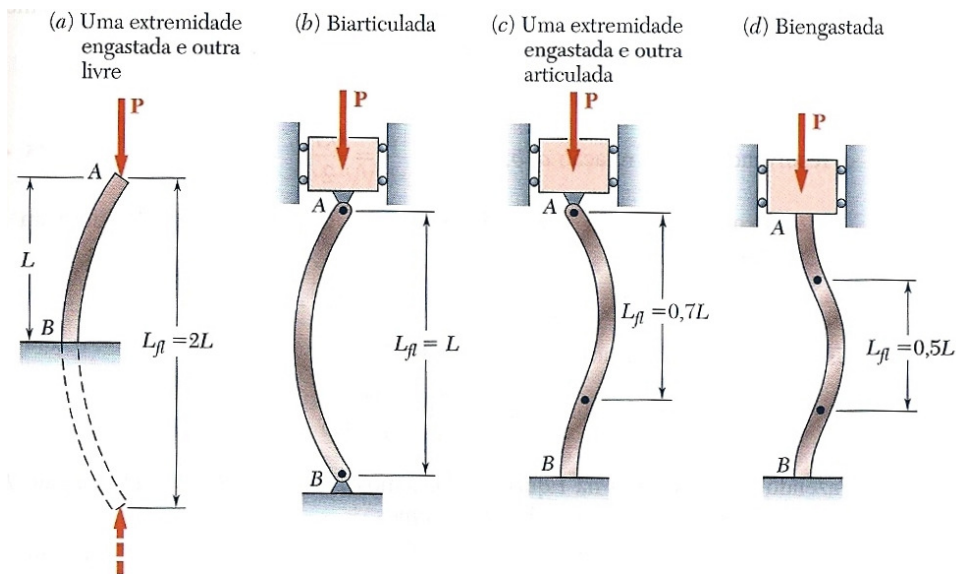


Figura 2.1 – Colunas com diferentes condições de contorno
(Fonte: BEER, JOHNSTON, DEWOLF, 2010)

Para o caso de uma coluna biarticulada (Figura 2.1-b) o comprimento efetivo de flambagem equivale ao próprio comprimento total da coluna. Como na prática existem outras condições de contorno além da biarticulada, o que se faz é uma equivalência matemática com esse caso fundamental. Isso se dá através do emprego de um fator de comprimento efetivo K , que multiplicado pelo comprimento total da coluna L , dá origem ao comprimento efetivo de flambagem, L_{fl} , como apresentado na figura 2.1.

Os valores do comprimento efetivo de flambagem para os diferentes casos de vinculações apresentados na referida figura são valores teóricos. Na prática, para o correto dimensionamento de uma coluna, devem-se seguir valores recomendados por normas regulamentadoras, como a NBR 8800 e a correspondente americana, AISC 360.

O aumento do comprimento efetivo de uma coluna diminui seu esforço de flambagem. Se o comprimento efetivo exceder certo valor, o esforço de flambagem será menor que o limite de proporcionalidade do aço. Pode-se dizer então que as colunas neste intervalo falham elasticamente.

A carga crítica de flambagem (P_{cr}) exposta na equação 1 acima, pode ser reescrita de forma a se obter a tensão crítica de flambagem (σ_{cr}). Para tanto, deve-se considerar $I = A \cdot r^2$ sendo que r é o raio de giração da seção. Com essa consideração chega-se a equação 2.

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E}{(L_{fl}/r)^2} \quad (2)$$

Onde σ_{cr} é a tensão crítica de flambagem de Euler, A a área da seção transversal da coluna e a relação L_{fl}/r é chamada de relação de esbeltez ou mesmo, índice de esbeltez.

2.2 Índices de esbeltez

O índice de esbeltez é uma propriedade que expressa a relação entre o comprimento efetivo de flambagem e o raio de giração de uma coluna submetida a uma força axial de compressão. Segundo Beer; Johnston e DeWolf, durante os últimos anos inúmeros testes foram elaborados submetendo-se colunas de aço a carregamentos axiais de compressão até a ocorrência da falha. O resultado desses inúmeros testes deu origem ao gráfico da figura 2.2, que relaciona a tensão normal σ_{cr} na falha, com o índice de esbeltez, L_{fl}/r correspondente.

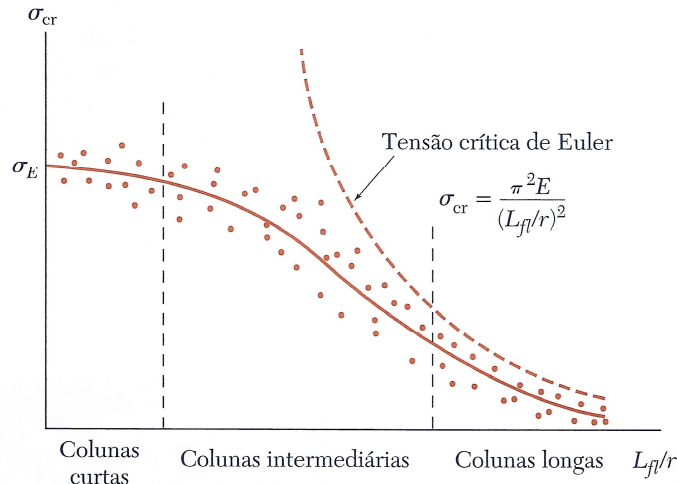


Figura 2.2 – Falha de colunas submetidas a carregamento axial de compressão (Fonte: BEER, JOHNSTON, DEWOLF, 2010)

Embora os resultados dos testes sejam bastante dispersos, podem ser observadas as regiões correspondentes a três tipos de falhas: colunas longas, curtas e colunas intermediárias.

Para colunas longas onde L_{fl}/r é grande a falha é prevista com boa aproximação pela fórmula de Euler, e observa-se o valor de σ_{cr} depende do módulo de elasticidade E do aço utilizado, mas não de sua tensão de escoamento σ_E .

Para colunas muito curtas, e blocos de compressão, a falha ocorre essencialmente como resultado do escoamento, e temos $\sigma_{cr} \approx \sigma_E$.

Colunas de comprimento intermediário compreendem aqueles casos em que a falha depende tanto de σ_E quanto de E . Nessa região, a falha da coluna é um fenômeno extremamente complexo, e foram usados extensivamente dados de ensaios para orientar o desenvolvimento de especificações e fórmulas de projeto (Beer; Johnston e DeWolf, 2010)

Segundo Popov, 1978, a fórmula de flambagem elástica de Euler, que representa o comportamento elástico de colunas esbeltas, pode ser usada para o cálculo de colunas intermediárias, desde que se leve em consideração o comportamento inelástico inerente dessa configuração. A forma de se avaliar esse comportamento inelástico de colunas ditas intermediárias e curtas, é através de incorporação do módulo de elasticidade tangencial (E_t), dando origem a uma nova equação, expressa logo abaixo.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(L_{fl}/r)^2} \quad (3)$$

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo NBR 8800 (2007), a força axial de flambagem elástica, N_e , de uma barra com seção transversal duplamente simétrica ou simétrica em relação a um ponto é dada pela equação 1.

$$N_e = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (4)$$

Onde:

N_e é a força axial de flambagem elástica de Euler

E é o módulo de elasticidade do material











I é o momento de inércia da seção transversal

K é o comprimento de flambagem por flexão

L é o comprimento total da coluna solicitada

A referida norma expõe através da Tabela 3.1 os respectivos valores teóricos para os coeficientes de flambagem por flexão (K) que são comumente utilizados no dimensionamento de estruturas submetidas ao carregamento axial de compressão.

Tabela 3.1 – Coeficiente de flambagem por flexão (Fonte: NBR 8800, REVISÃO 2007)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	   	Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres				

São apresentados seis casos ideais de condições de contorno de elementos isolados, nos quais a rotação e a translação das extremidades são totalmente livres ou totalmente impedidas. Nos casos onde não se pode assegurar a perfeição do engaste, devem ser usados os valores recomendados que são apresentados.

A sistemática de cálculo empregada pela norma na solução de problemas, como o que está apresentado na seqüência deste trabalho envolve a interação entre flambagem e plasticidade inerente da configuração do caso em estudo. Tal sistemática de cálculo está apresentada e detalhada da seção 5.1.

No presente trabalho se estudará os pinos utilizando um modelo de elementos finitos que considera não linearidade física e geométrica e a incorporação de imperfeições geométricas. Particularidades deste modelo e da forma como as imperfeições geométricas são incorpo-

radas estão detalhadas em GRIGOLETTI, 2009. Neste trabalho se explica que a implementação do citado modelo consiste basicamente de duas etapas:

1- Análise de flambagem elástica (“buckling”) por autovalores: é feita para se obter os modos de flambagem e a força crítica (N_e) correspondente. Isto indica os possíveis modos de flambagem da estrutura. Estes modos serão utilizados para incorporar as imperfeições geométricas iniciais empregadas na análise não-linear física e geométrica.

2- Análise não-linear física e geométrica utilizando-se o método do comprimento de arco. Imperfeições geométricas obtidas na etapa anterior e deformações plásticas são incluídas nesta análise para se obter a força de colapso e modos de colapso da estrutura submetidos à compressão.

4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Como já mencionado, o processo de fabricação por fundição sob pressão envolve a necessidade do emprego de um sistema de extração para se efetuar a retirada das peças logo após a solidificação do material. Para a melhor compreensão do processo de fabricação, apresenta-se através da figura 4.1 um esquema de como ocorre a fabricação de peças injetadas sob pressão.

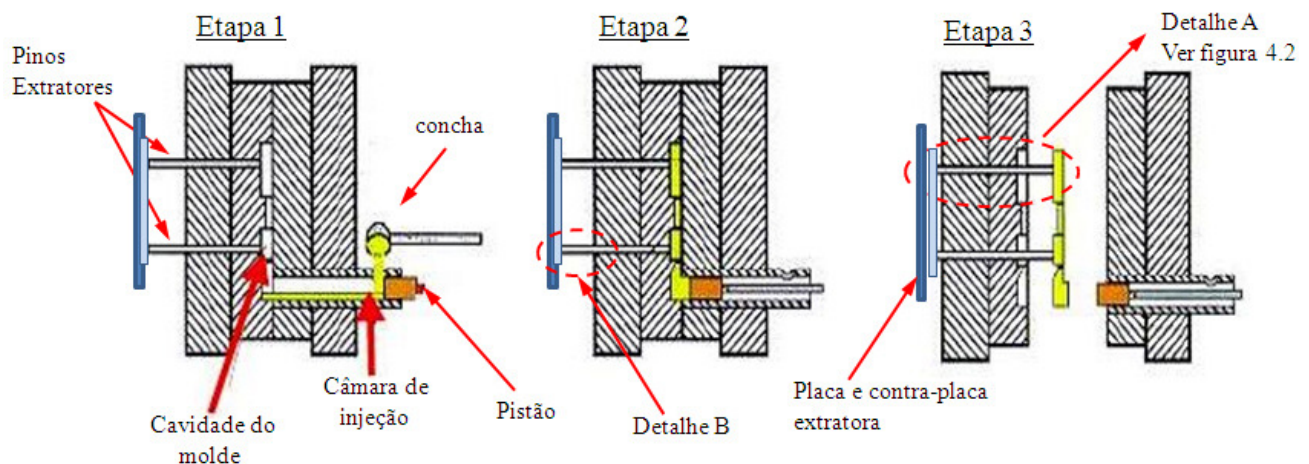


Figura 4.1 – Sistema de fabricação de peças fundidas sob pressão
(Fonte: STIHL FERRAMENTAS MOTORIZADAS Ltda., 2010)

Como pode ser observado na figura 4.1, o processo de fabricação envolve basicamente os três seguintes passos. Primeiramente, na etapa 1, as duas partes do molde se fecham para que o metal líquido seja depositado na câmara de injeção. Na etapa 2, com o auxílio do cilindro de ação hidráulica, o material é pressionado fortemente por um êmbolo, que faz com que o metal líquido percorra o canal de injeção e preencha as cavidades que formarão o produto final.

A última etapa do processo de fabricação sob pressão (etapa 3), frequentemente é denominada etapa de extração, ocorre logo após a solidificação e esfriamento do material. Nessa fase o cilindro recua e o molde se abre para que o sistema de extração expulse a peça sólida. É também nesse momento que ocorre a maior sollicitação nos pinos extratores. O “detalhe A” da figura 4.1 representa o momento no qual a sollicitação de compressão ocorre. A força aplicada para extrair o produto causa com grande freqüência a quebra dos pinos extratores. O local onde ocorre a quebra está sinalizado na figura 4.1, detalhe B.

4.1 Modelo Teórico do Problema Estudado

Pela configuração encontrada no problema, que pode ser visualizada no “detalhe A” da figura 4.1, pode-se considerar que a melhor forma de representar fisicamente o que acontece com cada coluna, é o que se demonstra logo abaixo na figura 4.2.

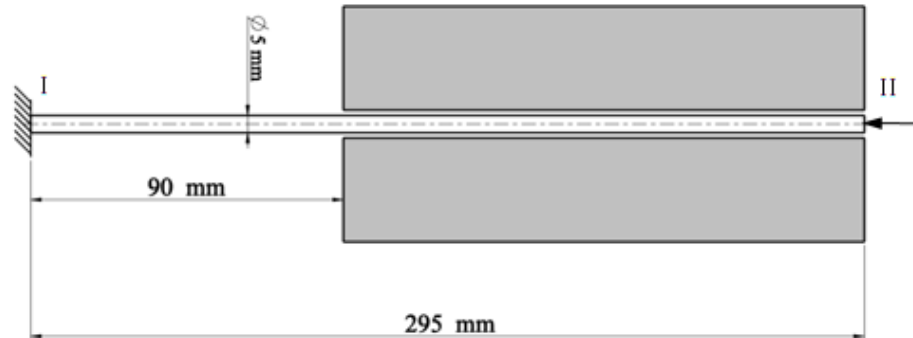


Figura 4.2 – Modelo Teórico do problema estudado

Pela figura acima se pode notar que a parte inferior encontra-se engastada. Essa condição é prevista devido à presença da placa e contra-placa extratora que podem ser visualizadas na figura 4.1. Os pinos extratores são por grande parte guiados por uma estrutura lateral apresentando uma pequena folga radial de 0,5 mm. O diâmetro do pino é de 5 mm e seu comprimento total é de 295 mm.

5 METODOLOGIA

Para o problema apresentado neste trabalho, serão elaborados 2 tipos distintos de análise. Primeiramente será calculada analiticamente a resistência da coluna (força de colapso) de acordo com a norma NBR 8800. Num segundo momento realizar-se-á a análise não linear do problema por elementos finitos, aplicando-se uma imperfeição geométrica para se chegar à configuração da estrutura colapsada.

5.1 Solução analítica NBR – 8800

Segundo a norma brasileira para projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto (NBR 8800), o dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão deve respeitar a condição de dimensionamento expressa pela equação 5.

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (5)$$

Onde:

$N_{c,Sd}$ é a força axial de compressão solicitante de cálculo

$N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, de uma barra, associada aos estados limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, pode ser determinada pela equação 6.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (6)$$

Onde:

χ é o fator de redução associado à resistência à compressão

Q é o fator de redução total associado a flambagem local

A_g é a área bruta da seção transversal da barra

f_y é a resistência ao escoamento do aço

γ_{al} é o coeficiente de ponderação da resistência

O fator de redução associado à resistência a compressão, χ , depende da curva de dimensionamento à compressão (a, b, c ou d), a qual é função do tipo de seção transversal, do modo de instabilidade e do eixo em relação ao qual a instabilidade ocorre. Os valores de χ são obtidos da equação 7 e 8.

$$\chi = \frac{1}{\beta + \sqrt{(\beta^2 - \lambda_0^2)}} \leq 1,0 \quad (7)$$

$$\beta = 0,5 \left[1 + \alpha(\lambda_0 - 0,2) + \lambda_0^2 \right] \quad (8)$$

Onde α é um coeficiente relacionado à curva de dimensionamento à compressão e λ_0 é o índice de esbeltez reduzido.

O coeficiente α , nos casos de instabilidade por flexão, é igual a 0,21, 0,34, 0,49 e 0,76, respectivamente para as curvas a, b, c, e d de dimensionamento à compressão - (Anexo A e B)

O índice de esbeltez reduzido, λ_0 , para barras comprimidas é dado pela equação 9.

$$\lambda_0 = \sqrt{\left(\frac{QA_g f_Y}{N_e} \right)} \quad (9)$$

Onde N_e é a força axial de flambagem elástica, obtida através da equação 1 (fórmula de Euler)

5.1.1 Determinação da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$)

Uma das formas de se evitar a quebra prematura das colunas em questão está relacionada ao correto dimensionamento das mesmas para a correspondente solicitação que ocorre em campo. Na seqüência apresentar-se-á o cálculo para o dimensionamento da estrutura supracitada, com base na norma brasileira correspondente que rege esse assunto (NBR 8800)

Com base na equação 5, para o correto dimensionamento da coluna em questão, deve-se atender a condição $N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$. Para se verificar essa condição, uma série de cálculos deve ser elaborada, como apresentado na seqüência.

- Força axial de flambagem elástica (N_e)

$$N_e = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = 28744 \text{ N}$$

Onde:

$$I = \frac{\pi D^4}{64} = 30,68 \text{ mm}^4 \text{ – para uma seção circular de diâmetro 5mm}$$

$$K = 0,5 \text{ – valor extraído da tabela 2.1}$$

$$L = 90 \text{ mm}$$

$$E = 200.000 \text{ N/mm}^2 \text{ (ver anexo C)}$$

- Índice de esbeltez reduzido (λ_0)

$$\lambda_0 = \sqrt{\left(\frac{QA_g f_Y}{N_e}\right)} = 0,94$$

$$Q = 1,0 \text{ – valor extraído da norma}$$

$$A_g = I = \frac{\pi D^2}{4} = 19,63 \text{ mm}^2$$

$$f_Y = 1280 \text{ N/mm}^2 \text{ (Ver anexo C)}$$

$$N_e = \mathbf{28744 \text{ N}}$$

- Fator de redução associado à resistência à compressão (χ)

$$\chi = \frac{1}{\beta + \sqrt{(\beta^2 - \lambda_0^2)}} \leq 1,0; \chi = 0,58$$

$$\beta = 0,5[1 + \alpha(\lambda_0 - 0,2) + \lambda_0^2] = 1,12$$

$$\alpha = 0,49 \text{ – valor extraído da norma (Ver anexo A e B)}$$

$$\lambda_0 = 0,94$$

Com base nos cálculos acima se chega ao valor da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$), como demonstrado abaixo.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \mathbf{13216 \text{ N}}$$

5.2 Simulação numérica do pino extrator comprimido (ANSYS®)

Com o objetivo de confrontar com valores analiticamente encontrados, foi efetuada uma análise numérica via método de elementos finitos do pino extrator, para o carregamento encontrado em campo. O software utilizado para esse fim foi o ANSYS® versão 10.0 (ANSYS, inc., 2007), visto que havia uma licença disponível para uso na empresa onde se desenvolveu este trabalho.

Com base no índice de esbeltez, que nesse caso classifica a estrutura estudada como uma coluna intermediária faz-se necessário uma análise não linear de flambagem conforme equação 3. A simples análise linear, expressa na equação 2 superestimaria a carga crítica que a estrutura pode suportar.

Para a geração da malha foi selecionado o elemento SOLID45 (ANYS, inc., 2007) que está representado na figura 5.1

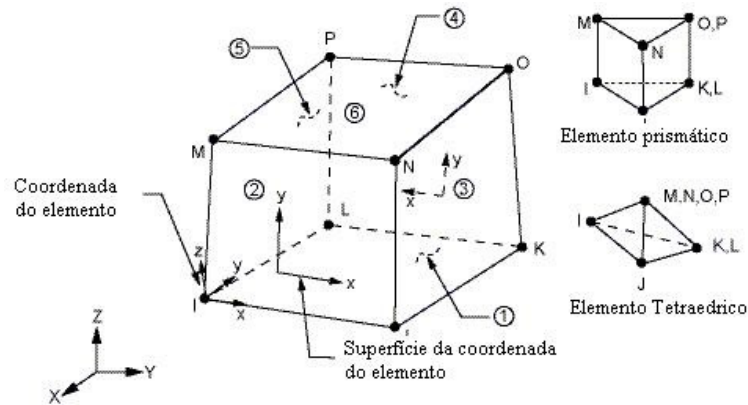


Figura 5.1 – Representação do elemento SOLID45 (Fonte: ANSYS, inc., 2007)

Esse elemento apresenta as características necessárias para a solução do problema. É um elemento recomendado para análises não-lineares e para grandes deformações em estruturas sólidas (3D), caso que é necessário avaliar neste problema.

Para apresentar a forma como ficou representado o pino com o elemento selecionado, mostra-se logo abaixo na figura 5.2 a malha aplicada a estrutura sólida de acordo com o respectivo o elemento selecionado para análise, bem como as condições de contorno que foram aplicadas ao modelo.

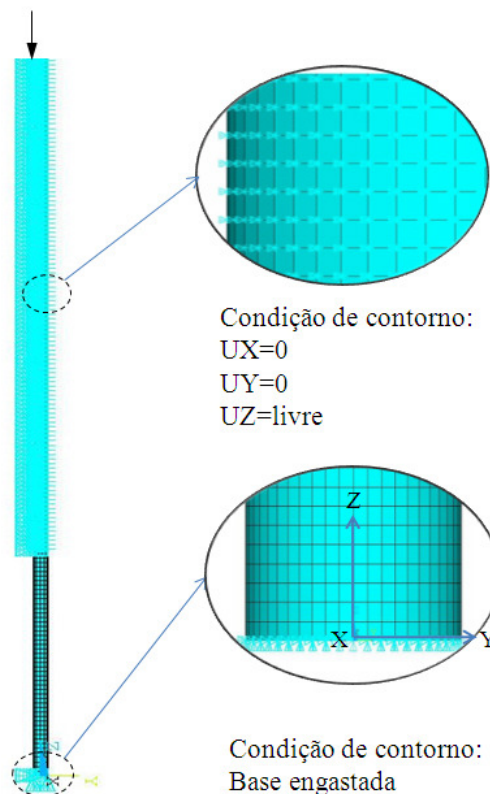


Figura 5.2 – Representação da malha aplicada ao pino e condições de contorno

Como pode ser observado na figura 5.2, a base da coluna se encontra engastada. Uma grande parte da estrutura está sujeita somente a deslocamento na direção vertical. Essa condição é válida, pois o pino extrator se encontra guiado por uma estrutura lateral, que pode ser visualizada na figura 4.2.

Conforme GRIGOLETTI, 2009, como se trata de uma análise não-linear, primeiramente se faz uma análise de estabilidade por autovalores via ANSYS, o qual fornece os valores das forças críticas (autovalores) e os correspondentes modos de flambagem (autovetores), para então quando possível se escolher os modos puros, isto é, os modos isolados e não combinados/acoplados de instabilidade, referentes aos modos de instabilidade local e global, quando aplicável.

As configurações deformadas (modos de flambagem) escolhidas são então amplificadas e superpostas (combinação linear dos modos) para então obter-se a nova geometria (isto é, as coordenadas dos nós da malha de elementos finitos são atualizadas para que esta malha represente a nova geometria).

A figura 5.3 representa o primeiro modo de flambagem associado ao primeiro autovalor obtido considerando a estrutura elástica e válidos pequenos deslocamentos, dos quais se baseia as imperfeições aplicadas à geometria em estudo.

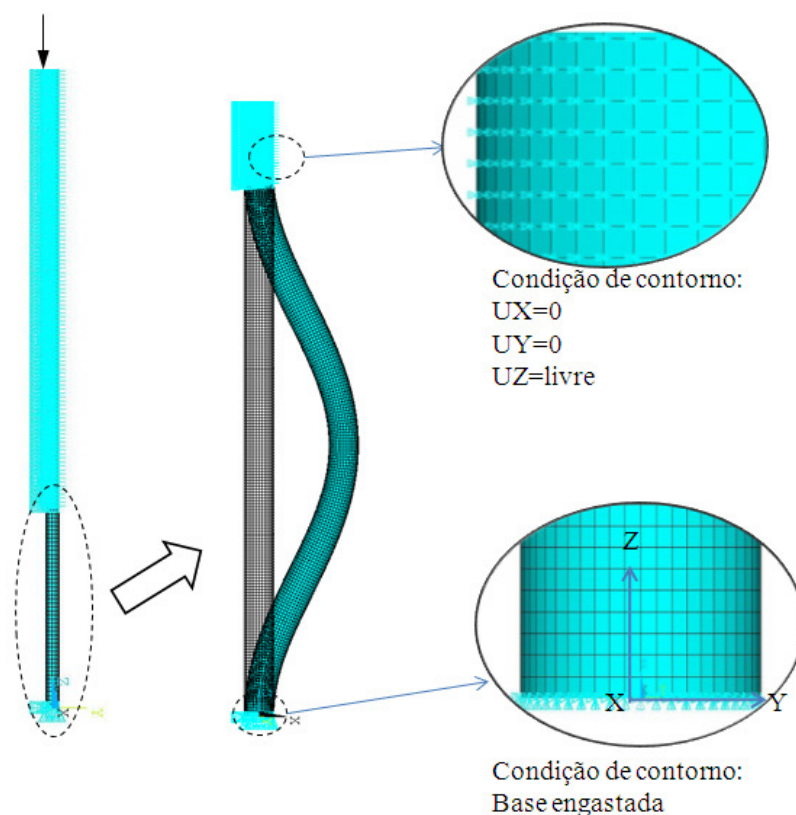


Figura 5.3 – Representação do primeiro modo de flambagem

O gráfico da figura 5.4 logo abaixo representa os resultados para a análise não-linear executada no software ANSYS®. A estrutura ao lado esquerdo do gráfico mostra um detalhe da região onde se fez o monitoramento do deslocamento no sentido do eixo z de um elemento arbitrário.

A figura 5.4 apresenta três curvas distintas de força versus deslocamento para o modelo de elementos finitos do pino extrator estudado. As curvas representam as excentricidades escaladas com diferentes fatores de escala ($L/2500$, $L/2000$, $L/200$). Para compor a forma das imperfeições geométricas considerou-se somente o primeiro modo de flambagem, por ser este claramente o que mais influencia no comportamento da estrutura. Na figura 5.4 também se apresentam os valores de carga obtidos quando ocorreu a falha *in locu* e a carga de colapso calculada com auxílio da NBR 8800.

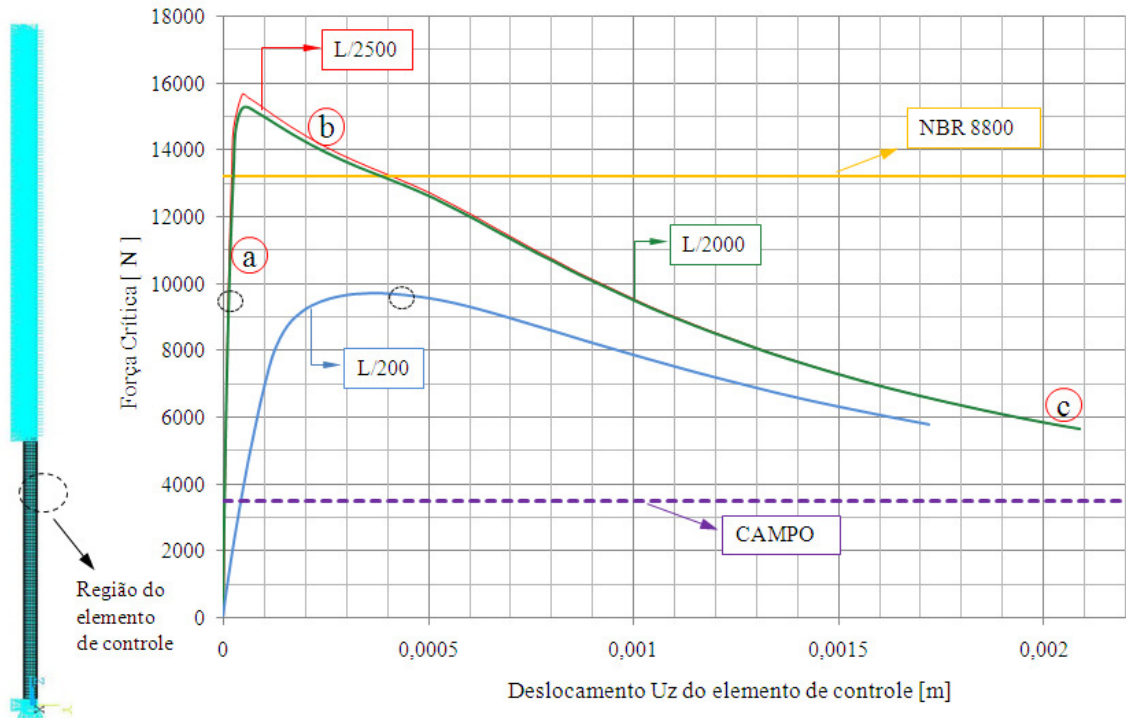


Figura 5.4 – Força crítica de colapso

Neste gráfico pode-se observar a marcação de quatro pontos (a, b, c) sobre a curva que representa a imperfeição geométrica de escala $L/2500$. Com o auxílio da tabela 5.1, e da figura 5.5 se consegue avaliar as tensões máximas encontradas em cada posição marcada nessa curva.

Tabela 5.1 – Tensão máxima dos pontos a, b, c, d

Ponto na curva	Tensão máxima de Von Mises [Mpa]
<i>a</i>	777
<i>b</i>	1280
<i>c</i>	1420

Considerando que a tensão de escoamento da material é de aproximadamente 1280Mpa, pode-se afirmar que as tensões na estrutura vão aumentando até que a partir de certo ponto (ponto b), o material do pino começa a plastificar. A força crítica para a estrutura representada por essa curva pode ser observada no pico da curva, e vale aproximadamente 15630 N.

Na figura 5.5, logo abaixo, é mostrado o estado de tensões de Von Mises para cada ponto específico da curva supracitada. Também se pode ter uma idéia da forma como ocorre o colapso da estrutura. As unidades dos valores numéricos são N/m^2 (Pa).

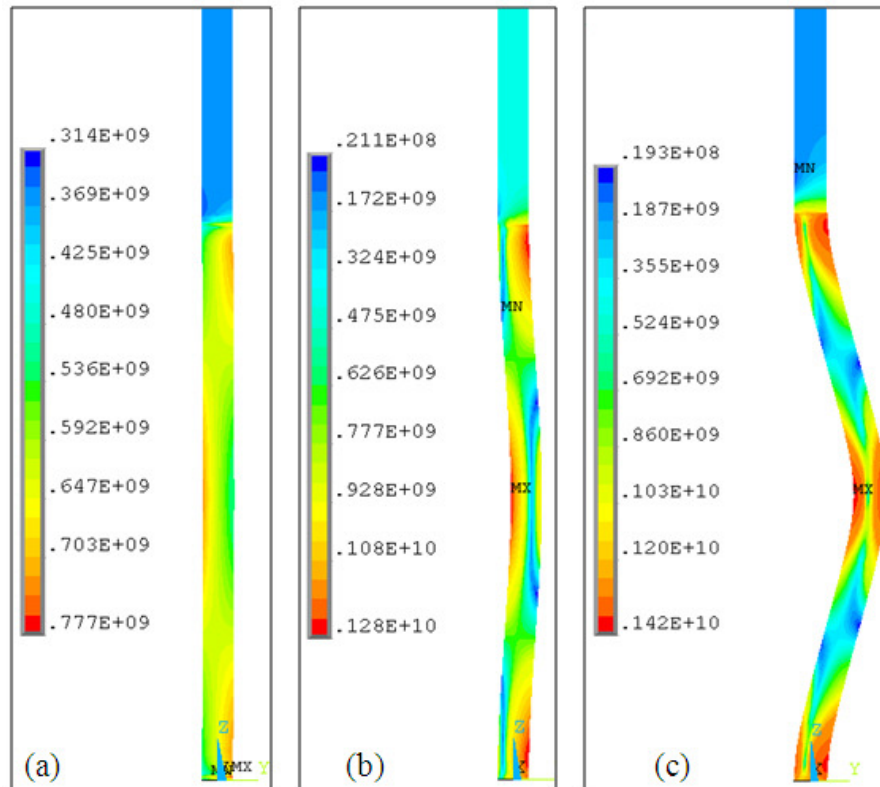


Figura 5.5 – Estado de tensões de Von Mises para os pontos a, b, c.

Ressalta-se aqui, que cada caso demonstrado nas figuras 5.5 e 5.6 representam somente uma parte da estrutura em análise, mais especificamente, a região onde ocorre o colapso, próximo a base do pino.

Na figura 5.6 são apresentadas as configurações deformadas para cada escala de imperfeição geométrica aplicada a estrutura na análise via método de elementos finitos. O estado de tensões, juntamente com o aspecto deformado da estrutura foi extraído para um valor de carga da ordem de 9700N. Os valores numéricos para o mapa de tensões de cada caso estão expressos em N/m^2 .

Para a figura em questão foram avaliados três fatores de escala diferentes ($L/2500$, $L/2000$ e $L/200$). O significado físico do fator de escala (relação L/cte) está vinculado ao máximo deslocamento transversal pré-aplicado a estrutura antes da análise de pós-flambagem. Como o comprimento da coluna é de 295 mm, para o fator de escala $L/2000$, por exemplo, o máximo deslocamento transversal pré-aplicado a estrutura é de aproximadamente 0,14 mm.

Através da figura 5.6 e com o auxílio do gráfico da figura 5.4 pode-se notar a sensibilidade da estrutura de acordo com o fator de escala das imperfeições geométricas aplicadas. Quando é aplicado um fator de escala demasiadamente grande ($L/200$, por exemplo) pode-se notar que a estrutura plastifica precocemente, enquanto que as outras duas análises, para a mesma carga de 9,7kN ainda não plastificaram. Cabe ressaltar que os pontos do gráfico da figura 5.4 que deram origem as imagens abaixo, estão referenciados no mesmo por círculos tracejados.

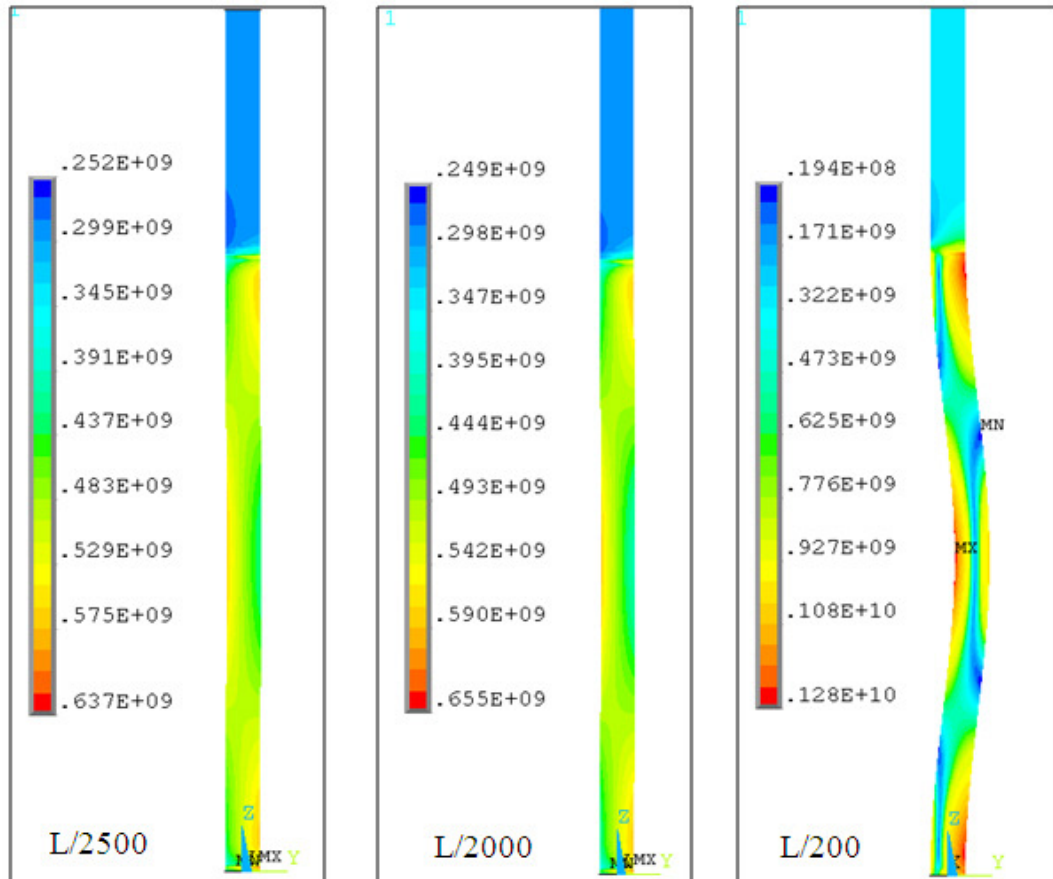


Figura 5.6 – Forma deformada e estado de tensões da estrutura para cada fator de imperfeição geométrica aplicada (força de 9,7kN).

5.3 Força de colapso encontrada em campo

Segundo constatado logo após a quebra de um pino extrator em campo, verificou-se que para um molde de 53 pinos extratores, a força aplicada foi de 185 kN, resultando uma força resultante de compressão para cada pino de aproximadamente **3490,6 N**. Esse valor de força que a placa extratora empurrou os pinos foi lido diretamente no painel da injetora. O valor de carga de colapso aqui apresentado demonstra a ordem de grandeza da força de colapso do pino, uma vez que, nem todos os pinos quebraram, e muito menos se pode garantir que os todos os pinos estavam sujeitos a mesma carga no instante do colapso.

A figura 5.7 representa um dos pinos que colapsou para a carga acima citada encontrada na máquina. Nesta imagem aparece somente uma parte do pino, já que a outra ficou presa a máquina. A parte ausente do pino foi representada por uma linha tracejada.

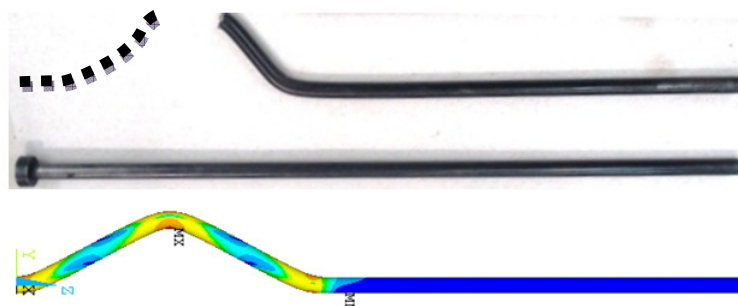


Figura 5.7 – Colapso do pino extrator.

Analisando-se essa imagem e comparando-a com as demais oriundas da análise por elementos finitos, pode-se verificar a semelhança com que o fenômeno de colapso ocorrido em campo pode ser retratado pela análise numérica proposta neste trabalho.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores encontrados para as três simulações numéricas apresentadas no gráfico de figura 5.4 mostram valores diferentes de cargas críticas de colapso, fato que se deve a influência do fator de escala aplicada à imperfeição geométrica utilizada em cada análise.

As curvas $L/2500$ e $L/2000$ quase se sobrepõem, demonstrando assim uma não dependência do valor de carga crítica com o fator de imperfeição geométrica aplicado à análise da estrutura. Já a curva azul ($L/200$) apresenta uma força crítica muito abaixo das demais.

O valor da força crítica alcançado pela simulação numérica é de aproximadamente 15600 N, enquanto que o valor encontrado com auxílio de cálculos recomendados pela norma ficou na ordem de 13200 N. Esses dois valores se encontram próximos, porém o valor encontrado pela norma NBR 8800 se apresenta mais conservador.

Confrontando os valores acima com o valor de carga de colapso encontrado em campo (aproximadamente 3490 N), nota-se uma diferença considerável, porém coerente, já que não se considerou um possível efeito dinâmico na análise de colapso, nem tampouco se pode efetuar uma medição individual dos esforços no pino que colapsou.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se a avaliação da carga de colapso de um pino metálico utilizado como extrator em uma injetora para fabricação de peças fundidas. Foram utilizadas duas metodologias para se obter a força de colapso, como a Norma NBR8800 e um modelo de elementos finitos que considera a não linearidade física e geométrica no qual se incorporaram também um campo de imperfeições geométricas a sua configuração inicial. Os valores calculados foram comparados com uma medição experimental. Através do trabalho foi possível obter as seguintes conclusões.

- A força crítica de colapso encontrada para o pino extrator em questão sujeito a um carregamento por compressão está em torno de 15600 N.

- Conclui-se ainda que as diferenças encontradas em relação ao valor de colapso evidenciado em campo, possivelmente se referem ao fato da não incorporação de efeito dinâmico tanto na análise pela norma, quanto pela análise numérica (simulação).

- Para uma análise mais detalhada e validação dos resultados de carga crítica, necessita-se de um ensaio experimental que represente as condições de contorno do problema analisado.

- conclui-se também que uma possível forma de se resolver o problema do colapso dos pinos seria mudar a sua geometria na região próxima a base do mesmo, por ser esta a região onde o colapso ocorre. Fortalecer essa região da estrutura torna-se imprescindível para sanar o problema avaliado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2007.

BEER, P. F.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T. **Resistência dos materiais**. 4.ed. São Paulo: AMGH, 2010.

GRIGOLETTI, G.C. **Otimização via algoritmos genéticos de perfis U formados a frio submetidos à compressão utilizando o método da resistência**. Tese (Doutorado em Engenharia mecânica). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 205p, 2009

POPOV, E. P. **Introdução à mecânica dos sólidos**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1978.

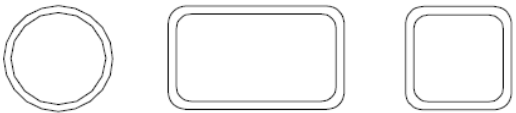
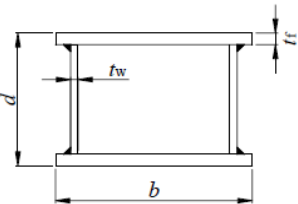
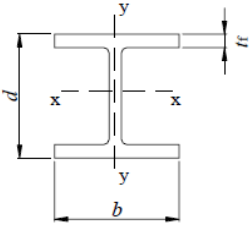
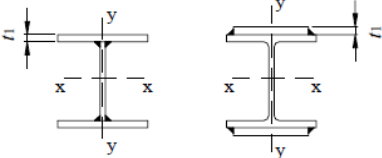


McCORMAC, J.C. **Diseño de estructuras de acero**. México, D. F.: Alfaomega, 1991.

Anexo A

48

NBR 8800 - Projeto de revisão - Janeiro 2007

Tabela 4 - Curvas de dimensionamento à compressão para instabilidade por flexão

Seção transversal ³⁾		Instabilidade em relação ao eixo	Curva ^{1), 4)}	
Seções tubulares 	Sem costura	Qualquer	a	
	Com costura		c	
Seções caixão soldadas 	Soldas de filete de tamanho grande ⁵⁾ $(d_w > 0,7 t_f)$	$b / t_f < 30$ $d / t_w < 30$	Qualquer	c
	Outros casos		Qualquer	b
Seções I e H laminadas 	$d / b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	x - x	a
		$40 < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y	b
	$d / b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	x - x	b
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y	c
Seções I e H soldadas 	$t_1 \leq 40 \text{ mm}$	x - x	b	
	$t_1 > 40 \text{ mm}$	y - y	c ²⁾	
Seções U, T e sólidas laminadas 		Qualquer	c	
Seções L (cantoneiras) laminadas 		Qualquer	b	
NOTAS: ¹⁾ Nos casos de instabilidade por torção ou por flexo-torção, deve ser usada a curva para instabilidade em relação ao eixo y. ²⁾ Se o perfil soldado for fabricado por deposição de metal de solda com chapas cortadas a maçarico, pode ser usada a curva b. ³⁾ Seções não incluídas na tabela devem ser classificadas de forma análoga. ⁴⁾ Para barras compostas, deverá ser adotada a curva c para a instabilidade em relação ao eixo que não intercepta os perfis componentes principais. ⁵⁾ d_w é o tamanho da menor perna da solda de filete.				

Anexo C – Propriedades do material

ORVAR 2M

Generalidades

ORVAR 2M é um aço ligado ao Cromo – Molibdênio – Vanádio, que é caracterizado por:

- Boa resistência à abrasão tanto a baixa ou alta temperatura.
- Excelente tenacidade e ductilidade
- Uniforme e elevado nível de usinabilidade e polibilidade
- Boa resistência a altas temperaturas e a fadiga térmica
- Propriedades de têmpera uniforme
- Boa estabilidade dimensional durante a tempera

Composição Química %	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	0,39	1,00	0,40	5,30	1,30	0,90
Norma	AISI H13, W.Nr. 1.2344					
Estado de Fornecimento	Recozido, ~185 HB					
Cor de identificação	Laranja / Violeta					

Aplicações

Ferramentas para extrusão

Peças	Alumínio Ligas de magnésio HRC	Ligas de cobre HRC	Aço inoxidável HRC
Matrizes	44-50	43-47	45-50
Apoios, porta- matriz, buchas anteparos, hastes	41-50	40-48	40-48
Temperatura austenitização	1020°C	1030°C	

Aplicações em moldes plásticos

Aplicações	Temp de Austenitização (aproximado)	HRC
Injeção de moldes termoplásticos: corridas de longas produções	1020 – 1030°C Revenimento 250° ou 560-580°C	48 – 50
Moldes de partes em resinas plásticas com exigência final	1020 – 1030°C Revenimento 250°C	50 – 52

Outras aplicações

Aplicações	Temp. de Austenitização	HRC
Severa furação a frio, tesoura de sucata	1000 – 1030°C Revenimento 250°C	50 – 52
Cisalhamento a quente	1000 – 1030°C Revenimento 250° ou 560-620°C	50 – 52 48 – 50
Anéis de compressão	1020°C Revenimento 560-620°C	45 – 50
Partes com resistência ao desgaste	1020°C Revenimento 560°C Nitretação	Núcleo 50 Superfície ~100 HV ₁

Propriedades

Dados Físicos

Temperado e revenido a 45 HRC

Dados a temp. ambiente e elevadas temp.

Temperatura	20°C	400°C	600°C
Densidade			
Kg/m ³	7800	7700	7600
lbs/in ³	0,281	0,277	0,274
Módulo de Elasticidade			
MPa	210 000	180 000	140 000
psi	30,5 x 10 ⁶	26,1 x 10 ⁶	20,3 x 10 ⁶
Coefficiente de Expansão Térmica por °C a 20°C			
	-	12,8 x 10 ⁻⁶	13,2 x 10 ⁻⁶
Condutibilidade Térmica			
W/m °C	-	29	30

Propriedades Mecânicas

Limite de resistência à tração aproximado a temperatura ambiente

Dureza	52 HRC	45 HRC
Tensão de Ruptura Rm		
N/mm ²	1820	1420
Kp/mm ²	185	145
tsi	117	92
psi	263 000	208 000
Limite de Escoamento Rp0,2		
N/mm ²	1520	1280
Kp/mm ²	155	130
tsi	98	83
psi	220 000	185 000

Resistência aproximada a elevadas temperaturas

Temperatura de Austenitização: 1020°C

Temperatura de Revenimento: 610°C

