

AVALIAÇÃO DO COLAPSO ELASTO-PLÁSTICO DE CASCAS CILÍNDRICAS REFORÇADAS SOB PRESSÃO EXTERNA

Miguel Mattar Neto
IPEN-CNEN/SP - COPESP

1 - INTRODUÇÃO

Cascas cilíndricas reforçadas sob pressão externa podem falhar das seguintes maneiras:

- a. Colapso axissimétrico da casca entre reforçadores (escoamento da casca entre reforçadores);
- b. Colapso não-axissimétrico da casca entre reforçadores (o reforçador permanece circular enquanto a casca tem ondas na direção circunferencial);
- c. Colapso global (a casca e os reforçadores falham com ondas nas direções circunferencial e axial);
- d. Instabilidade local dos reforçadores (se ocorrer, pode induzir o colapso global).

As aplicações deste tipo de estrutura são de interesse muito grande para as Marinhas dos vários países e inúmeros estudos sobre este assunto foram feitos ou patrocinados por elas. Deste modo, mesmo os códigos de projeto em aplicações civis [1],[2] são em grande parte baseados nestes estudos.

Os códigos de projeto para cascas cilíndricas reforçadas sob pressão externa são baseados em formulações que deixam uma margem (coeficientes de segurança) da pressão máxima de operação em relação às pressões correspondentes a cada modo de falha.

Além das propriedades físicas e geométricas das cascas, há fatores tais como as imperfeições geométricas iniciais, as tensões residuais e a forma como as condições de contorno são aplicadas que têm influência no colapso das cascas, e são considerados nos códigos de projeto. Como estes fatores são pouco conhecidos na fase de projeto (eles *serão somente quando a casca for construída*) eles são inseridos nos cálculos por meio de estimativas conservadoras baseadas em testes de outras estruturas.

Visando, então, determinar por meio do método dos elementos finitos os efeitos das imperfeições geométricas e condições de contorno em etapas futuras foram feitas, inicialmente, avaliações do colapso entre reforçadores de uma casca cilíndrica reforçada sem imperfeições projetada seguindo as formulações de [1] com a aplicação do programa ANSYS [3] para análises de sensibilidade quanto a malhas e a modelos de plasticidade.

2 - A CASCA ANALISADA

Com base nas formulações de [1] foi projetada a casca cilíndrica reforçada cujas propriedades geométricas e físicas estão indicadas nas figuras 1 e 2, respectivamente.

Foram adotados como critérios para o cálculo desta casca que o estado de tensões deveria ser aproximadamente uniforme em toda a estrutura, que os colapsos axissimétrico e não-axissimétrico deveriam ocorrer no regime plástico do material e aproximadamente sob a mesma pressão.

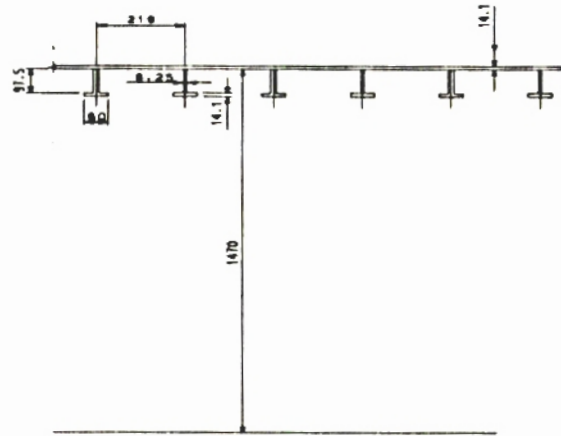
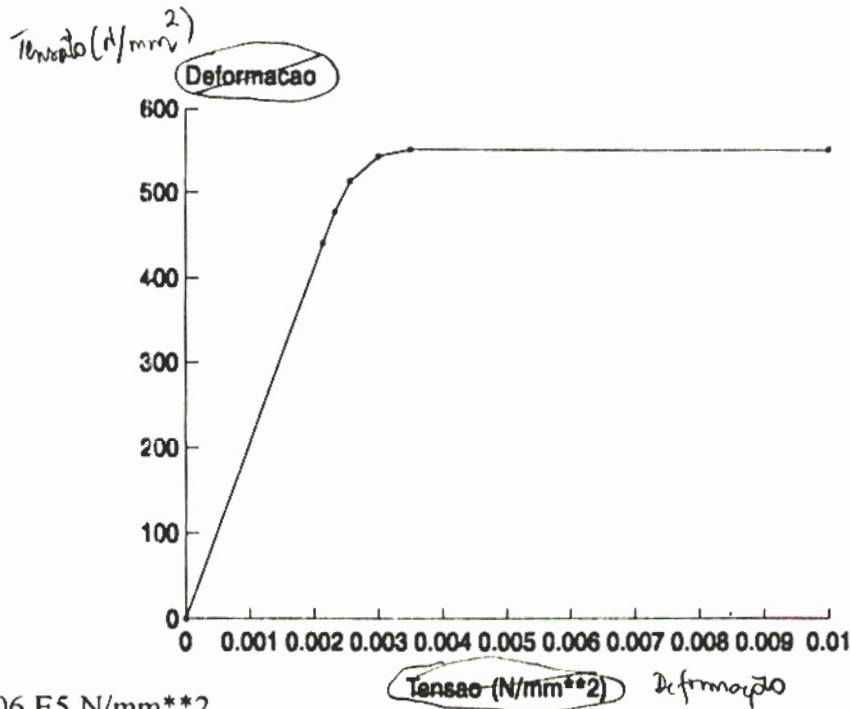


Figura 1: Características geométricas da casca (medidas em mm)



$E = 2,06 \text{ E}5 \text{ N/mm}^2$
 $\nu = 0,3$

Figura 2: Propriedades do material da casca

Estes critérios condicionaram as características geométricas da casca (espessura da casca, geometria e distância entre os reforçadores) de tal modo que se tivesse uma configuração com menor massa.

Com as formulações de [1] foram calculadas as tensões na casca e reforçadores que se baseiam em [4], as pressões de colapso axissimétrico da casca entre reforçadores [5] e não-axissimétrico da casca entre reforçadores [6]. Os valores de pressão de colapso obtidos foram:

- a. Colapso axissimétrico - pressão = 8,203 N/mm**2
- b. Colapso não axissimétrico - pressão = 8,214 N/mm**2

3 - ANÁLISES EFETUADAS COM O ANSYS

Utilizando o programa ANSYS [3] e suas opções foram feitas várias análises. Foram utilizadas malhas, elementos e modelos de material diferentes como se verá adiante.

Foi utilizada no ANSYS a opção de análise estática não-linear. Como a estrutura analisada é axissimétrica, sob carregamento axissimétrico e sem imperfeições geométricas somente o colapso axissimétrico da casca entre reforçadores foi capturado. A ocorrência deste modo de falha se caracteriza ao se atingir a carga limite quando a pressão atinge seu valor máximo em curvas deslocamento versus pressão.

Inicialmente foram feitas as seguintes análises:

- a. Com o elemento STIF43, 5 graus da estrutura, 10 reforçadores, material com a opção "classical bilinear kinematic hardening" (C13=10), malha de elementos da figura 3;
- b. Idem a., com o elemento STIF93;
- c. Idem a., utilizando 3 reforçadores e não 10, malha de elementos da figura 4;
- d. Idem c., com o elemento STIF93;
- e. Idem a., com malha da figura 5 (mais refinada que o caso a.);
- f. Idem c., com malha da figura 6 (mais refinada que o caso c.).

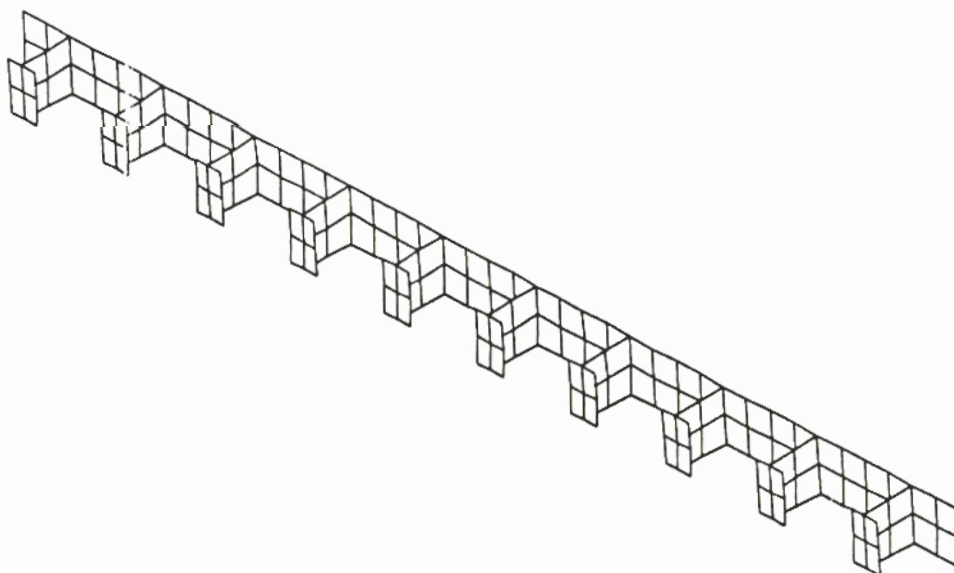


Figura 3: Malha menos refinada com 10 reforçadores (setor de 5 graus)

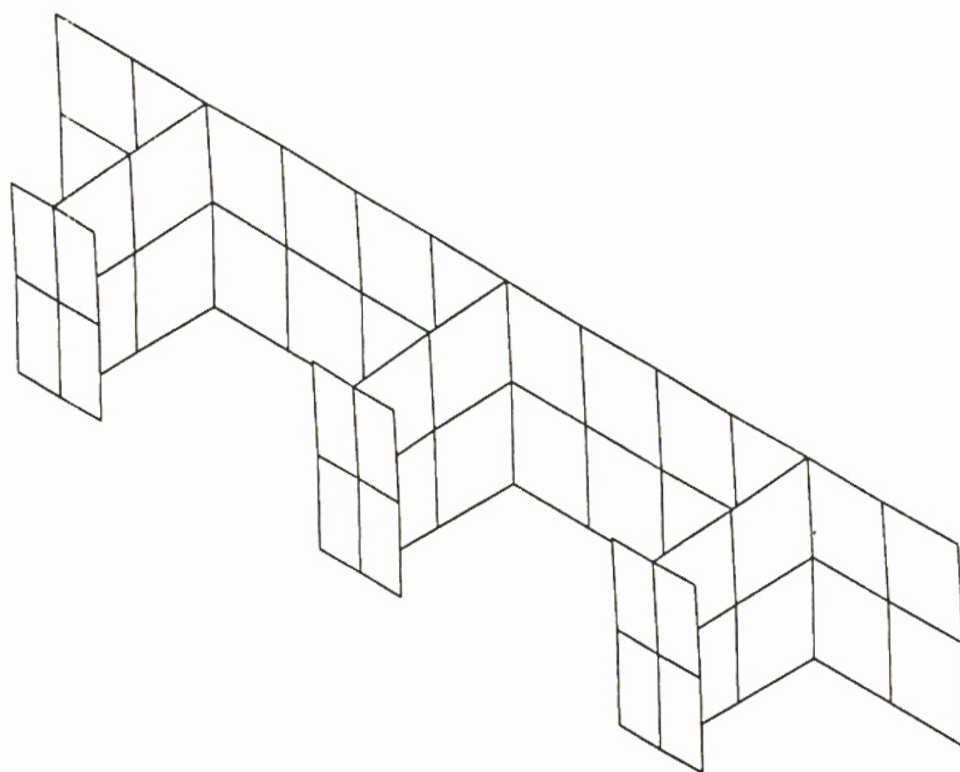


Figura 4: Malha menos refinada com 3 reforçadores (setor de 5 graus)

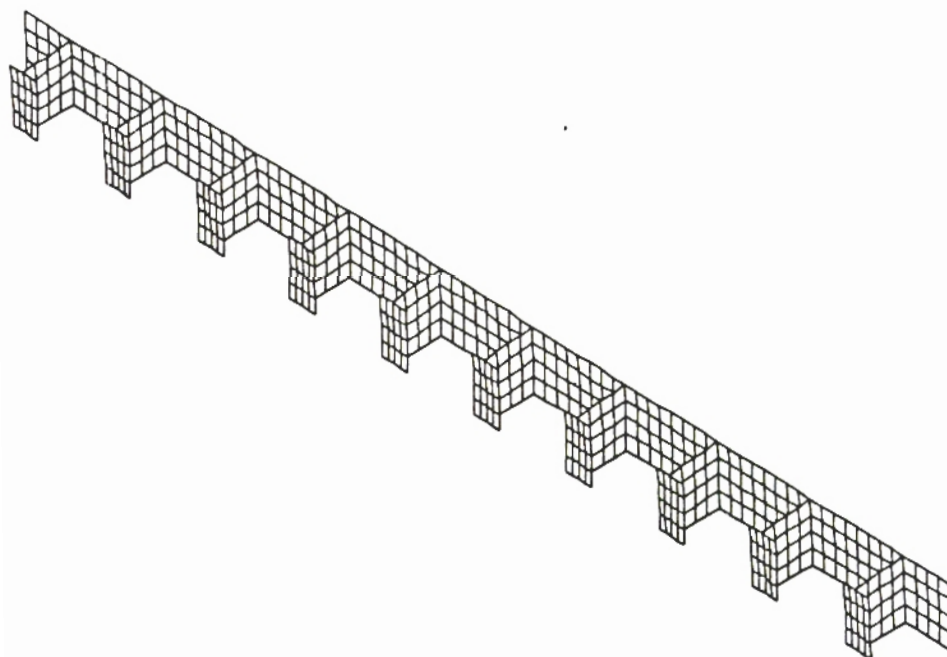


Figura 5: Malha mais refinada com 10 reforçadores (setor de 5 graus)

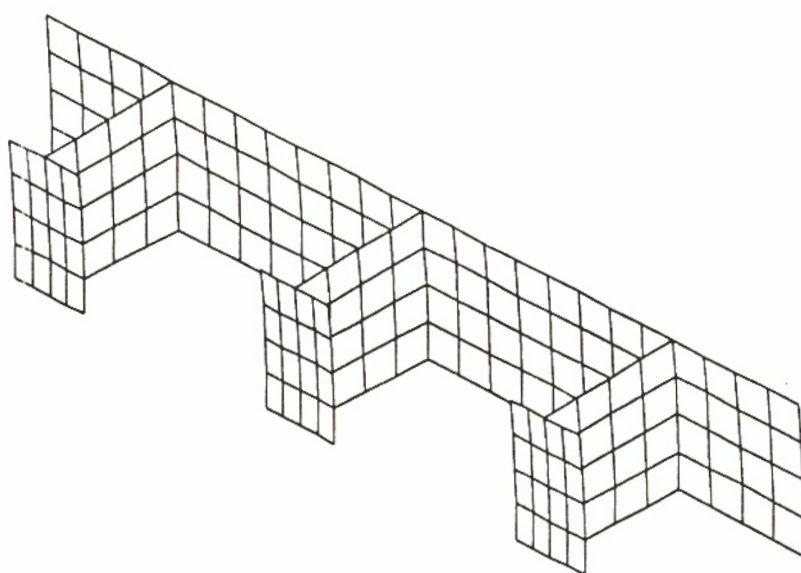
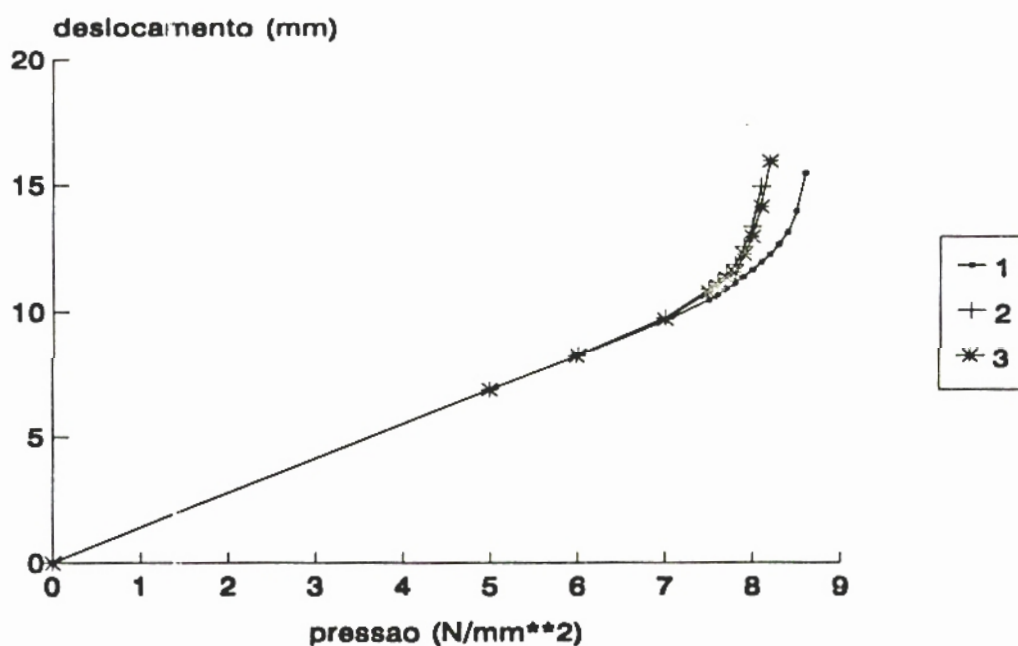


Figura 6: Malha mais refinada com 3 reforçadores (setor de 5 graus)

As curvas deslocamento radial do nó do centro da casca entre reforçadores versus pressão estão mostradas para os seis casos a. a f. acima na figura 7.



- 1 - Casos a. e c. (pressão de colapso = 8,6 N/mm²)
- 2 - Casos b. e d. (pressão de colapso = 8,2 N/mm²)
- 3 - Casos e. e f. (pressão de colapso = 8,3 N/mm²)

Figura 7: Curvas deslocamento radial do centro da casca entre reforçadores versus pressão

Os padrões típicos de deslocamentos da estrutura e das tensões para uma pressão pré-colapso são mostrados nas figuras 8 e 9, respectivamente. Estes padrões se repetem para as análises feitas.



Figura 8: Padrão de deslocamentos da estrutura

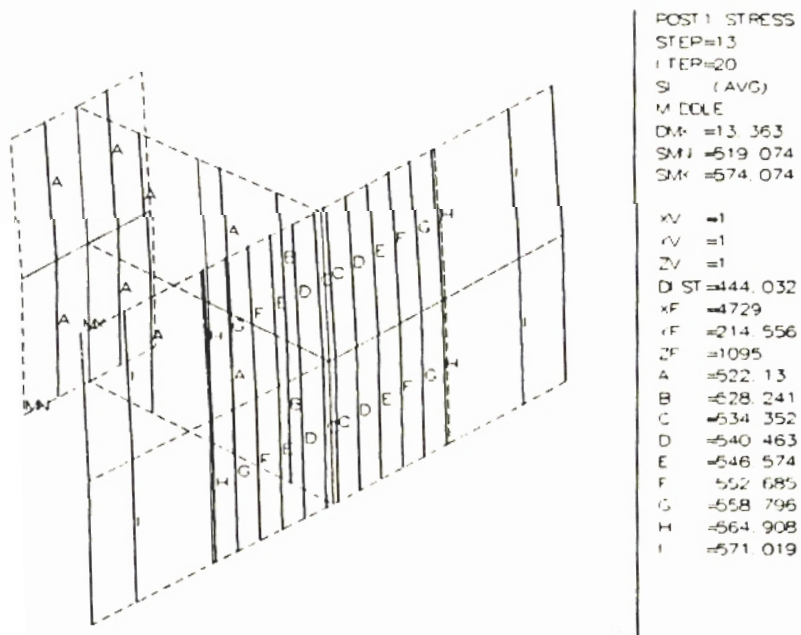


Figura 9: Padrão de tensões na estrutura

Foram feitas outras análises, utilizando o elemento STIF43, malhas com mesmo refinamento das malhas das figuras 5 e 6 e somente 3 reforçadores. Foram feitas, então:

- g. Com o elemento STIF43, 90 graus da estrutura, 3 reforçadores, material com "multilinear isotropic hardening: (C13=18) e malha de elementos da figura 10;
- h. Idem g., e material com "multilinear kinematic hardening"(C13=17);
- i. Idem g., com 180 graus da estrutura e malha da figura 11;
- j. Idem g., e material com C13=17 (em vez de C13=18).

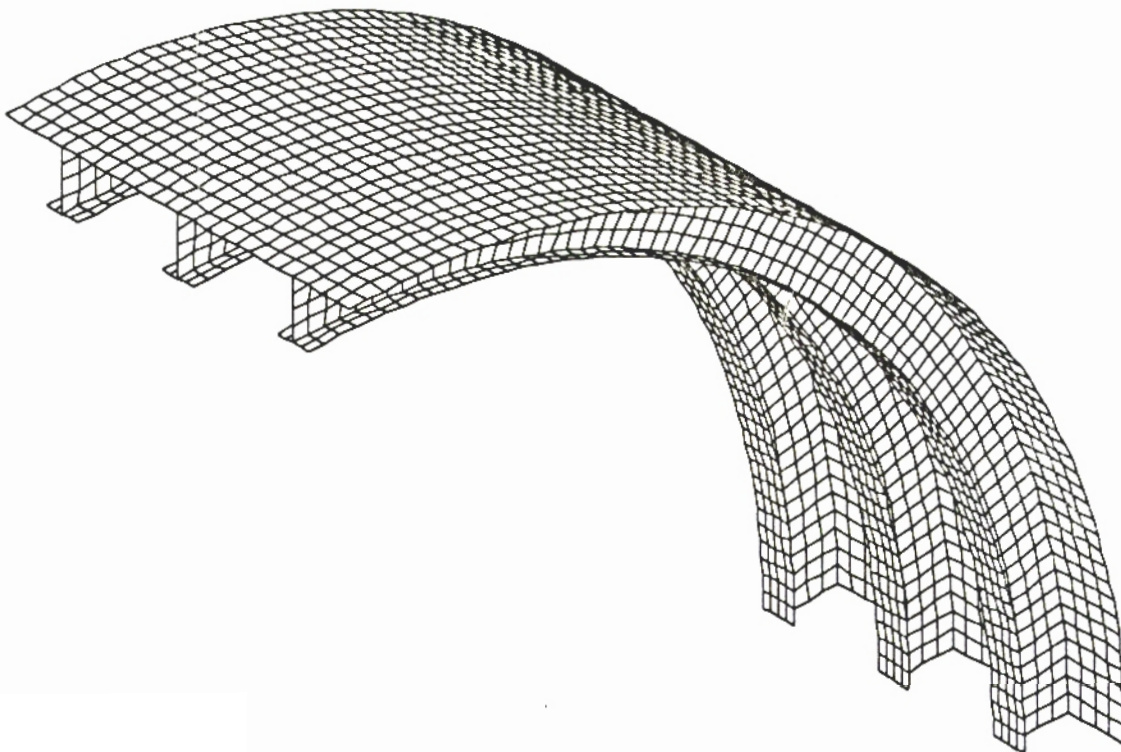


Figura 10: Malha com 90 graus da estrutura

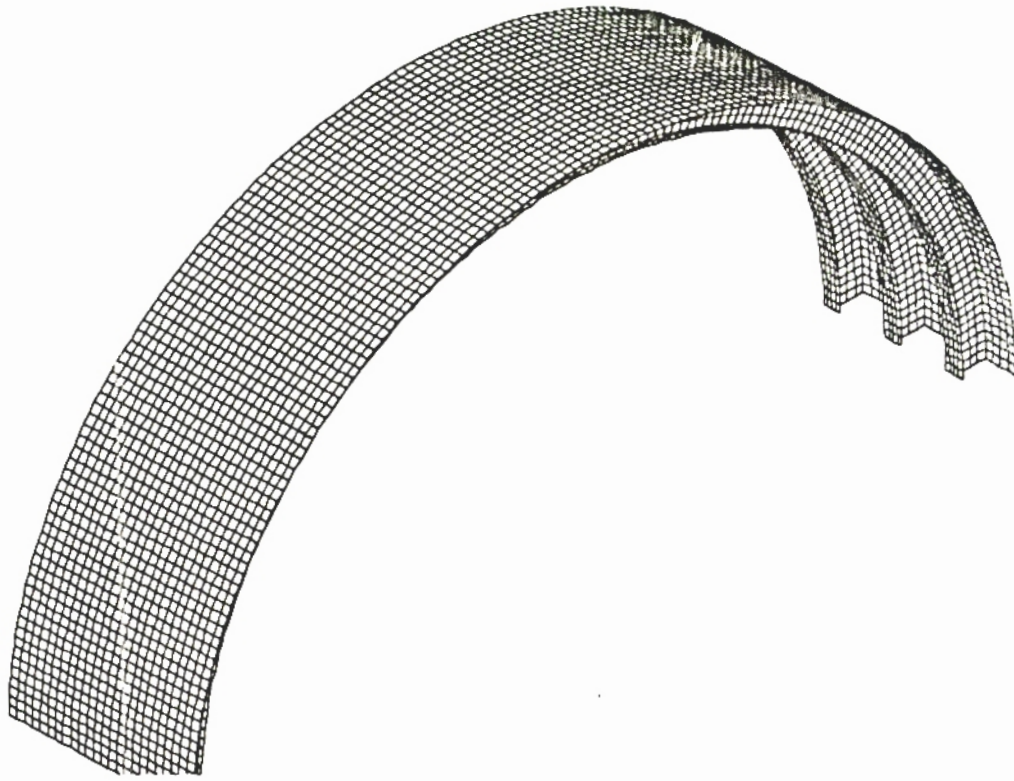
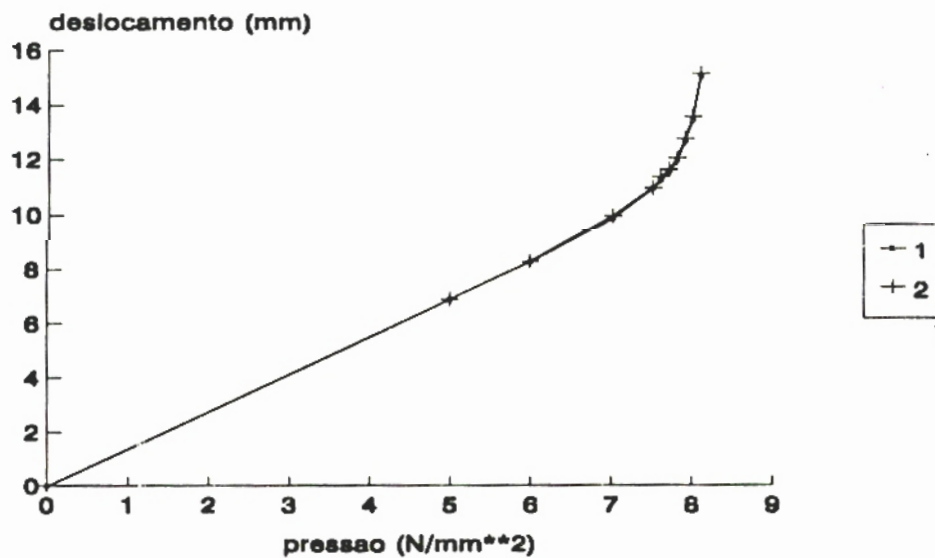


Figura 11: Malha com 180 graus da estrutura

As curvas deslocamento radial do nó do centro do vão da casca versus pressão para os casos g. a j. acima estão mostradas nas figura 12.



- 1 - Casos g. e. h. (pressão de colapso = 8,1 N/mm²)
- 2 - Casos i. e j. (pressão de colapso = 8,1 N/mm²)

Figura 12: Curvas deslocamento radial do centro da casca entre reforçadores versus pressão

4 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Em termos de pressão que causa o colapso axissimétrico da casca entre reforçadores há uma boa aderência entre o resultado do cálculo conforme [1] e os obtidos com o ANSYS neste trabalho (desvios de 5%)

Há uma aproximação maior entre resultados analíticos e numéricos com os casos onde o refinamento é maior, isto é, malhas mais refinadas ou feitas com o elemento STIF93.

O modelo de plasticidade empregado não traz grandes variações no valor de pressão de colapso para este modo de falha capturado nem na curva deslocamento versus pressão. Os resultados foram muito próximos para os 3 tipos de plasticidade utilizados. Deve-se mencionar que em [3] há indicações que o modelo C13=17 não deve ser empregado com os elementos STIF43 e STIF93. Neste trabalho, no entanto, houve o seu emprego com estes elementos e os não houve mensagens de erros ou de alerta na execução do ANSYS e os resultados foram coerentes com os outros modelos de plasticidade utilizados.

Os resultados obtidos dão confiança suficiente para se prosseguir o trabalho nesta área utilizando o método dos elementos finitos e o ANSYS introduzindo as imperfeições geométricas e diferentes condições de contorno para que sejam obtidas as pressões de colapso de estruturas reais.

5 - REFERÊNCIAS

[1] Germanischer Lloyd, "Rules for Underwater Technology, 1988 Edition, Chapter 2 - Submersibles", Hamburg, 1988.

[2] BS-5500

[3] DeSalvo, G. J. & Gorman, R. W., "ANSYS Engineering Analysis System User's Manual, For Revision 4.4", Houston, PE, May 1, 1989.

[4] Pulos, J. C. & Salerno, V. L., "Axisymmetric elastic deformations and stresses in a ring-stiffened, perfectly circular cylindrical shell under external hydrostatic pressure", DTMB-Report Nb. 1497

[5] Lunchick, M. E., "Plastic axisymmetric buckling of ring-stiffened cylindrical shells fabricated from strain-hardening materials and subjected to external hydrostatic pressure", DTMB-Report Nb. 1393

[6] Reynolds, T. E., "Inelastic lobar buckling of cylindrical shells under external hydrostatic pressure", DTMB-Report Nb. 1392