

ALFREDO C.B.GANDOLFO
ÉLCIO DE SÁ FREITAS
MIGUEL A.BUELTA MARTINEZ

928

ANÁLISE AUTOMATIZADA DE ESTRUTURAS
SUBMERSÍVEIS

P. 224
VI CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERIA NAVAL, TRANSPORTE
MARITIMO E INGENIERIA PORTUARIA

Veracruz y Cd. de México, 16 al 22 de Septiembre de 1979

1.0 Introdução

Nos últimos anos, a aplicação de submersíveis a finalidades pacíficas vem aumentando, dado o contínuo aumento de explorações do fundo dos oceanos. É provável que essa tendência ainda mais se acentue para o futuro.

Submersíveis podem ser considerados vasos sob pressão externa uniforme. Entretanto os requisitos que sobre eles incidem, de mobilidade e de carga útil por unidade de deslocamento, exigem que seu projeto se faça com margens bem menos generosas que aquelas de vasos de pressão terrestres. Consequentemente torna-se imprescindível a aplicação de refinadas análises, aliadas a resultados experimentais. Muito embora a literatura básica sobre o assunto seja livre e bastante difundida, tudo indica que muitas informações sobre as partes críticas do projeto permanecem praticamente restritas, sendo uma combinação de conhecimentos teóricos e de resultados experimentais obtidos em modelos de variadas escalas, em protótipos e em veículos em operação. Essa combinação de conhecimentos teóricos e experimentais, ainda que fosse amplamente difundida, seria de pouca utilidade para aqueles que, por outros meios, não tivessem reconhecido as características principais dos pontos críticos do projeto. É possível que o método dos elementos finitos, com o estágio que já atingiu, seja um meio adequado para atingir esse fim.

Alguns pontos críticos de projeto a que se aludiu são:

- trechos cônicos irregulares reforçados por cavernas (fig.1a);
- anteparas de extremidade com enrijecedores internos, em forma de hemisférios ou elipsóides;
- efeitos locais resultantes da ligação de trechos longitudinais com diferentes geometrias; por exemplo: cilindro cavernado a tronco de cone cavernado; etc.
- efeitos de anteparas de tanques e de conveses sobre a caverna e o chapeamento do casco resistente (figs. 1b e 1c);
- efeitos de aberturas e de reforços" no casco resistente.

Uma tentativa de examinar simultaneamente todos os pontos críticos acima, através de elementos finitos, é inviável técnica e economicamente [14]. Entretanto o exame de alguns deles, em separado, poderá ser útil. O presente trabalho é um esforço inicial segundo essa linha. Aqui se examina o problema de um trecho cônico irregular, reforçado por cavernas, e limitado por uma antepara plana e por outra elipsoidal. Nesse trecho encontra-se também um convés e anteparas estanques (fig. 1a). As perguntas para as quais se busca uma resposta inicial são:

- qual a distribuição geral de tensões no chapeamento do cone irregular, nas cavernas e no chapeamento da tampa elipsoidal?
- qual a influência do convés e das anteparas de tanques nessa distribuição?
- qual a extensão e intensidade dos efeitos de ligação das anteparas plana e elipsoidal ao cone irregular reforçado por cavernas?

Os capítulos a seguir mostram o método e os resultados a que se chegou na procura de respostas iniciais a essas perguntas.

2.0 Apresentação do Problema

2.1 Geometria

No presente trabalho pretende-se estudar a secção de popa de um submersível, cujo arranjo geral está esquematizado à fig. 1.a.

A secção possui um comprimento de 33'9", composta de uma secção tronco-conica não axi-simétrica, com 32'1" de comprimento; essa secção é terminada, no seu topo, por um elipsóide, de revolução, com semi eixo maior de 5'10" e semi eixo menor 1'8". Tem um convés corrido horizontal, distando 102" da linha de base, e sofrendo uma elevação de 1' nas duas últimas cavernas. O casco resistente é constituído de um chapamento com 0.95" de espessura, de aço "HTS"; o cavernamento é interno, constituído por chapas 8"X0,36", reforçadas com flanges de 4" X 1,08". Os vaus e pés de carneiros são perfis T com 8" X 0,27", reforçados por flanges de 4" X 0.425"; o convés tem 0.5" de espessura.

Em algumas secções a parte inferior do convés, entre este e o costado, é formada por hastilhas cheias. Duas secções típicas são apresentadas às fig. 1-b e 1-c.

2.2 Carregamento

A secção de popa, atrás descrita, foi submetida a um carregamento externo uniforme de 350,0 psi, tomado como constante em todo o chapeamento do casco. Tal pressão equivale a uma imersão de aproximadamente 790'.

3.0 Modelagem

3.1 Seleção dos elementos para a discretização da estrutura

A estrutura foi analisada pelo Método dos Elementos Finitos, por intermédio do programa NAVSAP (15). Para uma boa discretização da estrutura foram utilizados os seguintes elementos daquele programa:

- Elemento nº 1 - (Elemento de treliça) para simular o comportamento dos flanges das cavernas e dos vaus. Esse elemento permite apenas 1 deslocamento por nó, no sentido axial, e apresenta como dados de saída a tensão normal (fig. 2).
- Elemento nº 3 - (Elemento de membrana) para simular o comportamento da alma das cavernas, das hastilhas e do convés. Esse elemento permite dois graus de liberdade por nó, e foi usado para obter o comportamento de estado plano de tensão. Os dados de saída são as tensões, de membrana σ_x e σ_y e τ_{xy} no centro do elemento. (fig.2)
- Elemento nº 6 - (Elemento de placa) para simular o comportamento do costado. Esse elemento possui cinco graus de liberdade por nó: duas rotações e dois deslocamentos no plano da placa, e um deslocamento perpendicular ao mesmo plano. Os dados

de saída desse elemento apresentam uma superposição dos comportamentos de membrana e de placas, isto é: são dadas no centro do elemento as tensões de membrana como foi atrás especificado, e os momentos M_x M_y e M_{xy} que permitem calcular as tensões devidas à flexão. Como o elemento é plano, não levando em conta, portanto, a curvatura, é necessário dividir a superfície cilíndrica em pequenos elementos para melhor representá-la. No caso presente uma meia secção ao chapeamento foi dividido em 12 partes, para permitir uma precisão razoável.

A composição desses tres elementos com pontos nodais comuns é assaz laboriosa, necessitando de aproximadamente 240 horas de um "engenheiro senior" para o preparo dos dados. A verificação da exatidão de malha pela listagem de saída é extremamente fastidiosa, além de não apresentar suficiente confiabilidade. Foram então usado os pré-processadores do programa - DIM-3 (16), que desenha a malha toda, permitindo uma imediata identificação dos erros de coordenadas, ou de incidência. Quatro saídas desses pré-processadores, são mostrados às figuras 3, 4, 5 e 6, respectivamente: dois anéis tipos, o convés, e o costado visto em perspectiva.

A estrutura assim modelada, constituiu-se de 490 pontos nodais, 194 elementos de treliça, 298 elementos de membrana, e 206 elementos de placas. Para a estrutura assim composta foram necessárias 607 equações e o tempo de computação gasto foi de aproximadamente 29 minutos.

3.2 Condições de contorno

Tendo a estrutura um plano de simetria, plano esse que corre no sentido proa-popa, e sendo o carregamento também simétrico, é possível estudar-se meia secção da estrutura, desde que se imponha no eixo de simetria as devidas condições de contorno.

Na secção de ligação entre o trecho cônico e o trecho cilíndrico, correspondente ao corpo médio, a estrutura foi adotada como perfeitamente engastada. A justificativa para essa hipótese é a seguinte: o estudo do compartimento de popa, exigiria no mínimo, o estudo desse e de mais um compartimento contíguo; a não adoção dessa medida irá falsear, como se provou durante o estudo, o campo de tensões próximo a antepara estaque. Diante desse fato poderemos adotar qualquer condição de contorno, daí a optarmos pelo engastamento perfeito. A fig. 7 mostra os eixos escolhidos e as condições de contorno adotadas.

4.0 Resultados Obtidos

4.1 Observações gerais

Foi escolhido o trecho compreendido entre as cavernas C_1 e C_2 , distantes entre si de 2'6", que é aliás o espaçamento das cavernas em toda a secção de popa (fig. 7). Essas cavernas distam 15' e 17.6" da antepara estaque que divide o compartimento, ora em estudo do primeiro compartimento do corpo médio. Foram feitas 3 análises do compartimento, a fim de se fazer um estudo comparativo:

- uma primeira em que só foi considerado o chapeamento externo

simplesmente, sem o cavernamento e o convés;

- uma segunda análise, em que foram considerados o chapeamento externo conjuntamente com o cavernamento, mas ainda sem o convés;

- finalmente uma terceira análise, em que foi considerada a estrutura integrada, isto é, chapeamento externo cavernamento e convés.

4.2 Campo de deslocamentos

A fig. 8 apresenta o campo de deslocamentos na caverna C2, para as três situações acima enumeradas, apresentação essa que será sistematizada nos demais gráficos deste trabalho. Vemos que o campo de deslocamentos é praticamente o mesmo para as três situações, apresentando deflexões ligeiramente maiores, como é óbvio, para a estrutura em que é considerado só o chapeamento. Queremos notar que a escala em que foram traçados os deslocamentos está exagerada em relação à escala em que foi traçada a caverna, o que pode gerar, à primeira vista, estranheza sobre os resultados.

4.3 Campo de Tensões

4.3.1 - Tensões no corpo troncônico

4.3.1.1. Tensões de Membrana

Nas figs. 9 e 10, acham-se plotadas as tensões de membrana segundo as direções circunferencial e meridional. As tensões de cisalhamento correspondentes estão na fig. 11. Vemos que as tensões de membrana circunferenciais praticamente independem

de θ . Para os três casos o valor médio dessa tensão, ao longo de θ , atingiu cerca 27.000psi. As tensões meridionais já não apresentam a mesma uniformidade de distribuições com θ , oscilando entre 6.000 e 13.000psi; porém para os três casos, sua distribuição com θ apresenta o mesmo aspecto. Verificamos também que a tensão máxima se dá no topo superior da secção, e a menor no ponto diametralmente oposto. As tensões de membrana em cisalhamento tem uma distribuição praticamente igual para os três casos considerados, e verificamos também que o seu valor oscila entre 500 e 1.700 psi, bem inferiores às tensões normais circunferenciais e meridionais.

4.3.1.2 Tensões de flexão

Nas figs. 12 e 13 são mostradas as tensões circunferenciais e meridionais devidas aos momentos fletores e, na fig. 14, as tensões de cisalhamento associadas à flexão.

Verificamos, na fig. 13, que as tensões de flexão meridionais, numa mesma face do chapeamento, varia entre -24000 e 28000 psi, anulando-se 5 vezes ao longo da semi-circunferência. As distâncias entre pontos que se ela anula diminuem quando θ vai de 0° a 180° . Essa distribuição é praticamente a mesma para os três casos analisados.

As tensões de flexão circunferenciais (fig. 12), para a mesma face de chapeamento, elas variam entre -32000 a 26000 psi, a elas aplicando-se as demais observações feitas para as tensões de flexão meridionais. O mesmo quadro se observa para as tensões de cisalhamento, que variam entre -19000 e

21000 psi, anulando-se ao plano de simetria do trecho troncônico, tal como deveria acontecer.

4.3.1.3 Tensões combinadas de membrana e flexão

Nas figs. 15 e 16 estão mostradas as tensões combinadas de membrana e flexão. As máximas tensões se verificaram sempre no mesmo elemento e na face externa. Combinando as tensões de membrana e as de flexão, e usando o critério de Von Mises - para escoamento, as tensões equivalentes a comparar com a tensão de escoamento num ensaio convencional são:

$$\sigma_{\text{chap}}^e = 54.397,0 \text{ psi}$$

$$\sigma_{\text{chap+cav.}}^e = 52.903,0 \text{ psi}$$

$$\sigma_{\text{chap+cav+convés}}^e = 53.238 \text{ psi}$$

4.3.2 Tensões na calota

A calota foi discretizada por elementos quadriláteros de placa. Os nós de cada elemento foram determinados pela intersecção de superfície de calota com dois planos paralelos ao plano de simetria do trecho de submersível analisado, e por outros dois perpendiculares aos primeiros.

Na calota elíptica, o único reforço é o convés que sobre ela se abate. Ainda assim ela apresentou resultados praticamente iguais para os tres casos analisados, tal como aconteceu na parte cônica.

Na fig. 17 estão representadas as tensões de membra

na em uma secção paralela ao plano de simetria, e que dele dista 27,45". Vemos que as tensões normais de membrana apresentam um valor maior no eixo de simetria da secção, diminuindo quando dele nos afastamos. A faixa de variação é de 4.000 a 18.000 psi para as tensões $\sigma_{x_c}^m$, e de 7.000 a 15.000 psi para as tensões $\sigma_{y_c}^m$. As tensões de membrana em cisalhamento, τ_{xyc} , variam de -9000 psi a 8.000 psi. Nota-se que, devido à simetria da estrutura, essa tensão é nula no eixo de simetria da secção. Na fig. 18 representam-se as tensões de flexão na calota. Nota-se que $\sigma_{x_c}^f$ varia de 600 a 6000psi, e que $\sigma_{y_c}^f$ varia de -1400 a 7000psi. As tensões de cisalhamento τ_{xyc}^f associadas à flexão, estão na faixa de -2600 a 2200psi. Usando o critério de Von Mises e tensão equivalente será de $\sigma^e = 18.870$ psi para os três casos.

4.2.3 Tensões nas almas das cavernas, flanges, hastilhas e convês.

As máximas tensões encontradas nos demais elementos foram:

- na alma da caverna 109 foi achada a tensão de $\sigma=311,0$ psi;
- no flange da caverna 109 foi achada a tensão $\sigma=139,0$ psi;
- no convês a maior tensão foi de 150,0 psi, localizada em elemento contíguo à calota.

5.0 Análise dos resultados

Analisaremos os resultados obtidos entre as cav. C_1 e C_2 , e aqueles da antepara elipsoidal.

Os resultados obtidos mostram que, para a geome-

tria analisada, a presença das cavernas, do convés e das anteparas de tanques pouco afetam o comportamento da casca tronco-cônica, com a possível exceção de efeitos muito concentrados e que somente se poderão analisar com malha mais fina. Verifica-se também que as tensões de membrana circunferenciais são basicamente as mesmas que existiriam em uma casca cônica com ângulo no vértice igual à média dos que ocorrem no tronco de cone irregular. De fato, para este caso teríamos, entre as cavernas C_1 e C_2 , $\sigma_{ym} = 28000$ psi, muito próxima dos 27000 psi que esta análise produziu, quase constantes com θ . O mesmo não ocorre com as tensões de membrana meridionais que, para uma casca única regular, ficariam em 14.000 psi, bem superior à média em θ observada na análise, aproximadamente igual 10.000psi. Isto pode-se explicar observando-se que não apenas forças de membrana atuam sobre a casca, mas também momentos fletores e forças cortantes, como se examinará adiante.

O fato de o tronco de cone não ser regular, torna seu comportamento bem diferente do de u'a membrana, muito embora σ_{ym} se aproxime bastante de tensão de membrana correspondente. Isto se observa pelos altos valores de tensão de flexão encontrados, tanto na direção circunferencial como na meridional, da mesma ordem de grandeza das tensões de membrana. Note-se que este efeito não se deve à presença das cavernas, conveses e tanques de antepara.

Torna-se difícil comparar os resultados obtidos na antepara elipsoidal com os de uma teoria de cascas, dado o sistema de coordenadas que adotamos. Entretanto fica bem clara

ro que o nível geral de tensões no elipsóide é cerca de metade daquela encontrado entre as cavernas C_1 e C_2 do corpo tronco-cônico. Isto se deveria esperar, dado o menor raio do tronco de cone na secção em que encontra o equador do elipsóide, o qual também possui 0,95" de espessura. Apesar de usar-se malha relativamente grossa para pesquisar efeitos locais, nota-se que as tensões de flexão no elipsóide preponderam próximo ao equador, zona em que sofre mais a influência do efeito de ligação ao tronco de cone.

6.0 Trabalhos futuros

Embora se tenham obtido resultados para todo o corpo tronco-cônico, apenas aqueles entre as cavernas C_1 e C_2 foram aqui analisados. É necessário examinar da mesma forma o campo de tensões na extensão longitudinal do corpo tronco-cônico, provavelmente da caverna C_1 para ré, onde o efeito de condições de engastamento, arbitradas, já se torna desprezível. Essa análise global poderá trazer à tona alguns aspectos importantes. Após tal análise o modelo que ora apresentamos deverá ser reajustado, e sua malha certamente refinada. A partir daí é que se deverão utilizar os resultados como condições de contorno, para pesquisar os efeitos locais, tais como ligação do tronco de cone ao elipsóide, aberturas, reforços, etc.

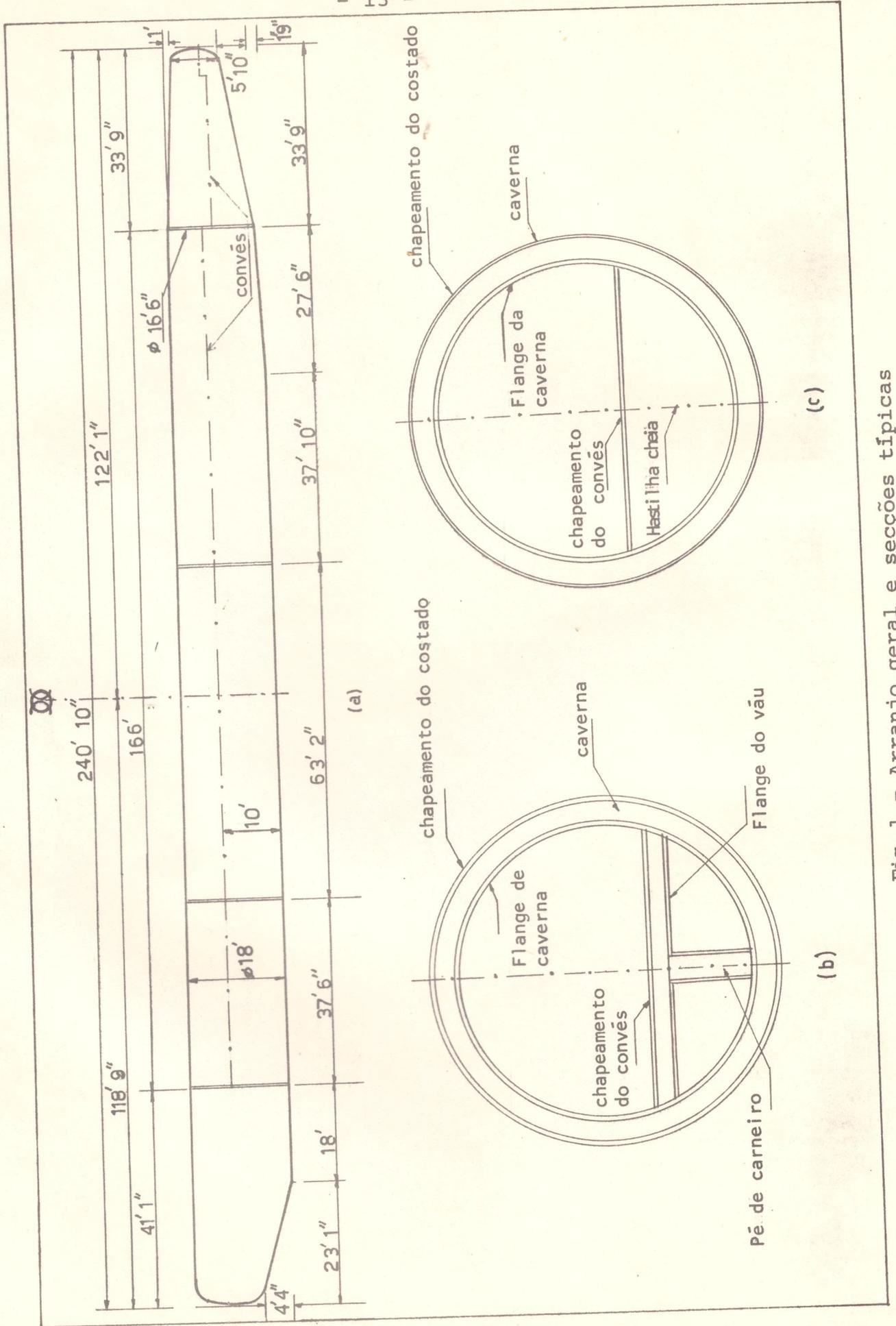
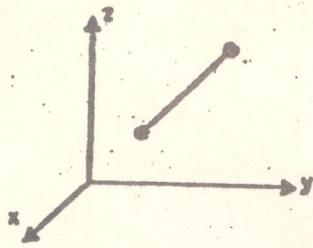
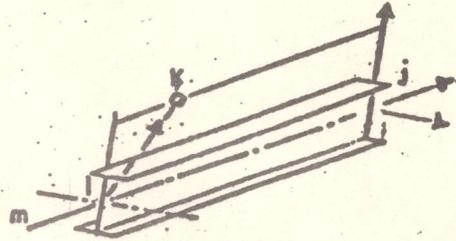


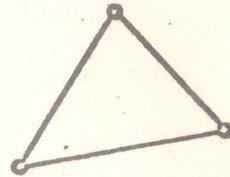
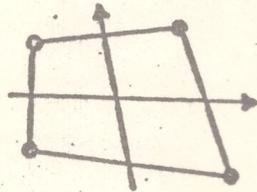
Fig. 1 - Arranjo geral e secções típicas



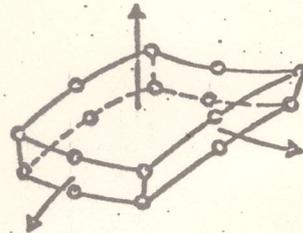
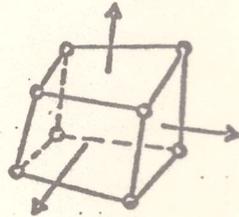
Elem. nº1 Treliça



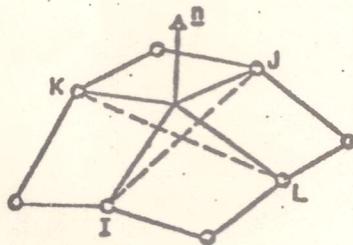
Elem. nº2 Barra



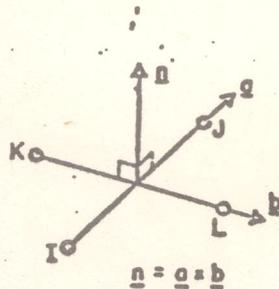
Elem. nº3 e 4: Estado Plano de tensão e axissimétrico



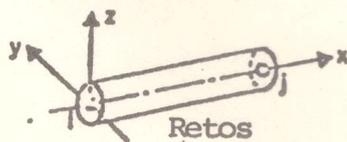
Elem. nº5 : Sólidos e placas espessas



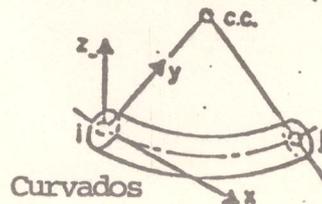
Elem. nº6: Placas finas



Elem. nº7: Contorno



Retos



Curvados

Elem. nº8: Tubos

Fig. 2 - Elementos utilizados na modelagem

D I M 3 - N O P N
ESTUDO DA SECAO DE RE" DE UM SUBMERSIVEL - CAV C2

ELEMENTOS

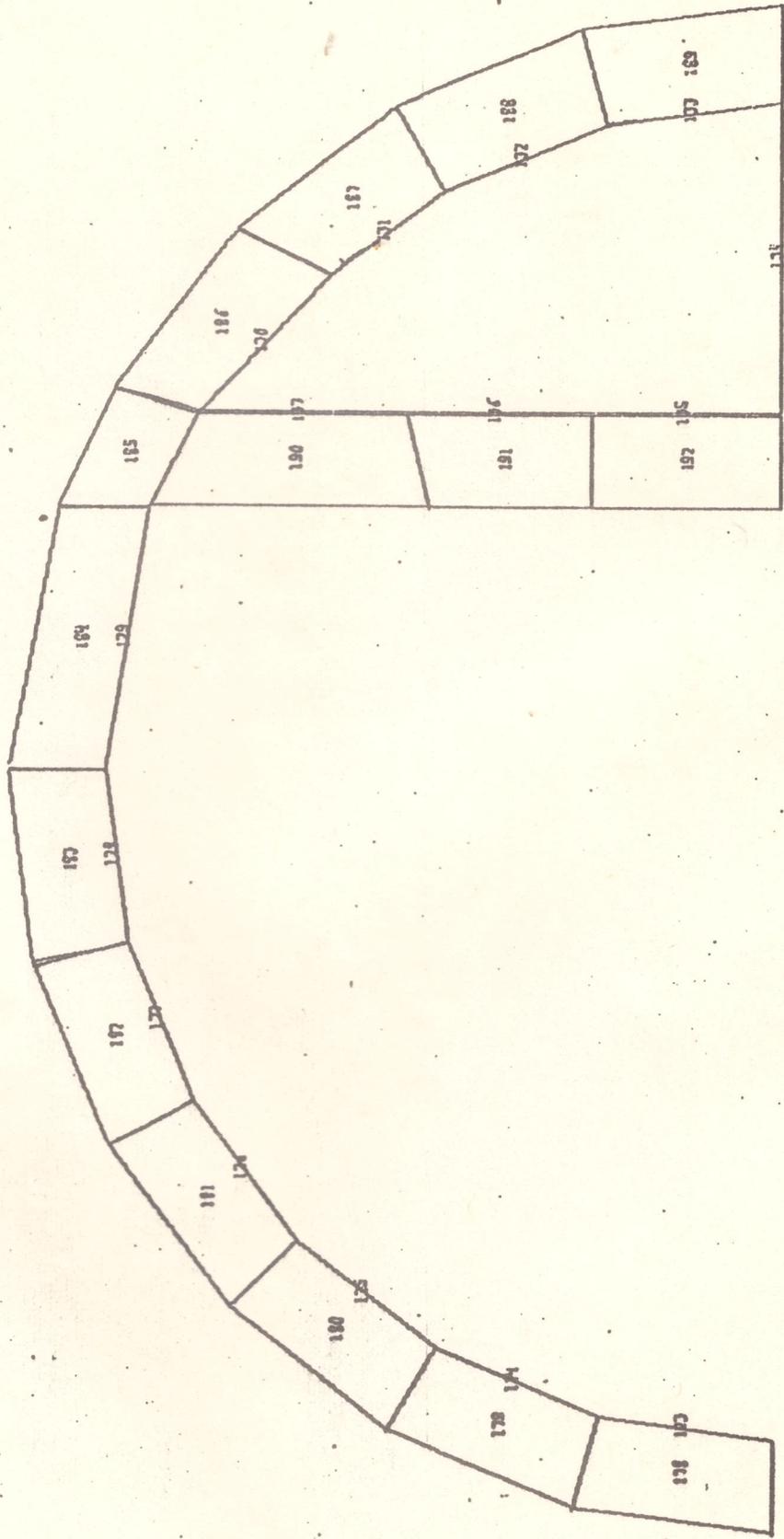


Figura 3

D I M 3 - N O P N
ESTUDO DA SECAO DE RE" DE UM SUBMERSIVEL - CAVIC1

ELEMENTOS

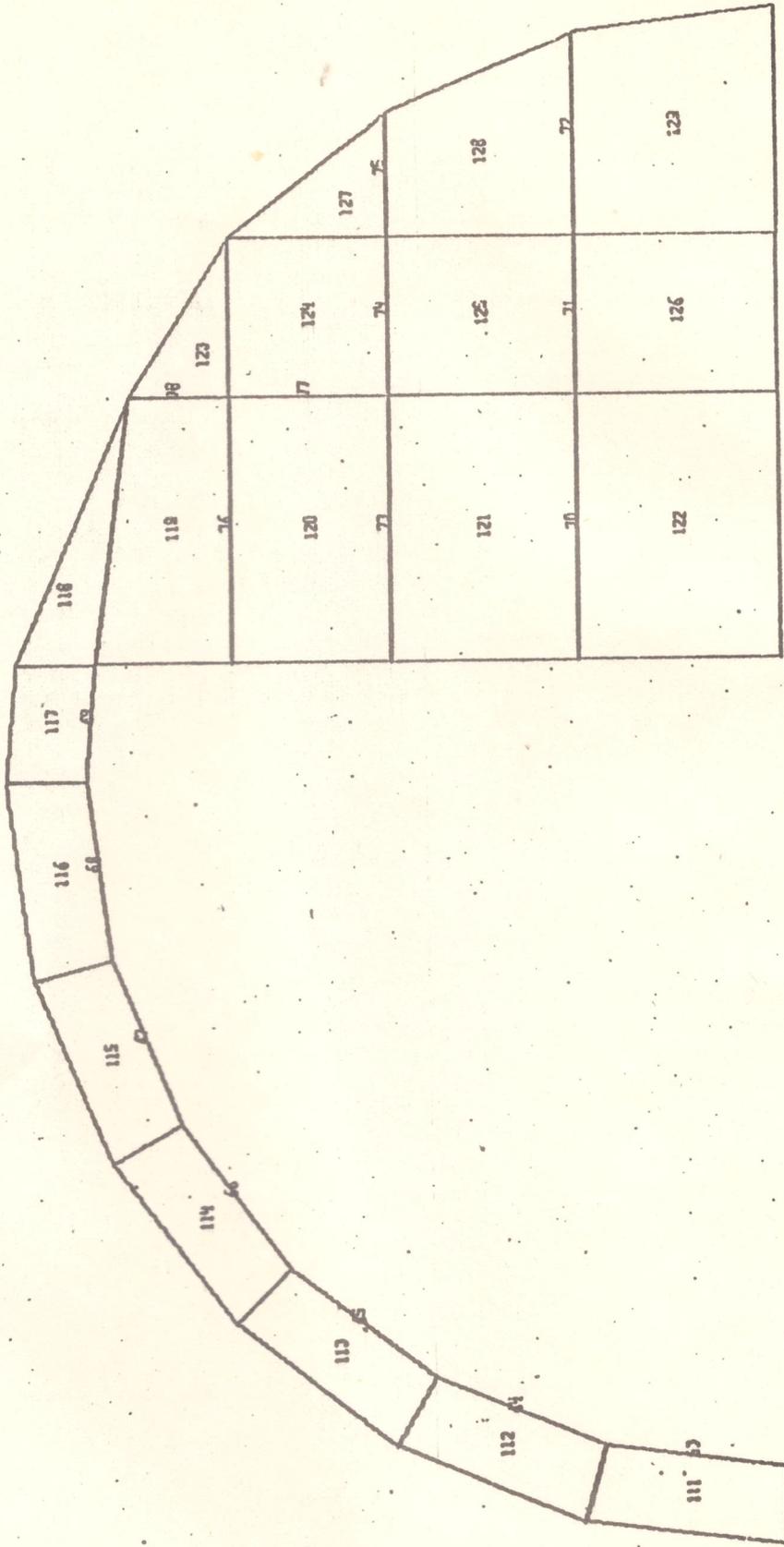


Figura 4

D I M 3 - N D P N
ESTUDO DA SECAO DE RE" DE UM SUBMERSIVEL - CONVES

DISCRETIZACAO

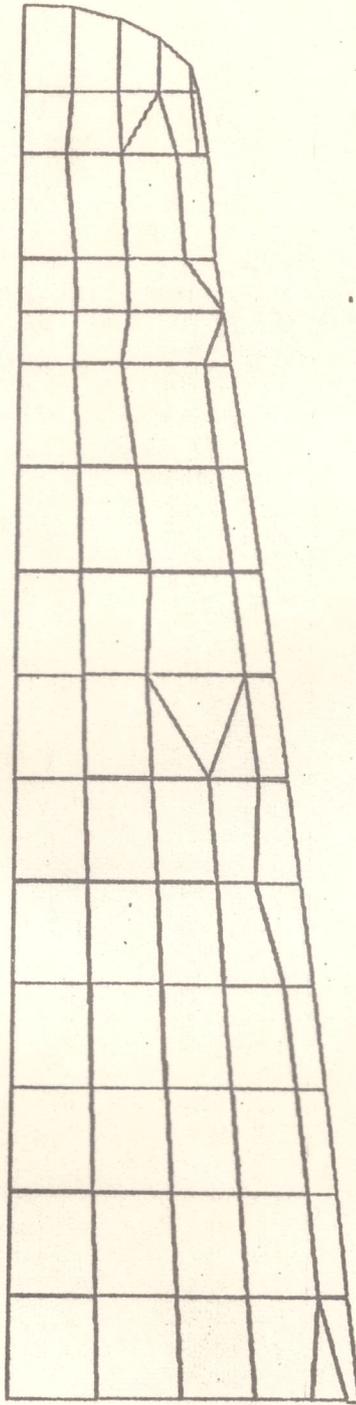


Figura 5

D I M 3 - N O P N
 ESTUDO DA SECAO DE "AE" DE UM SUBMERSIVEL - COSTADO
 ELEMENTOS

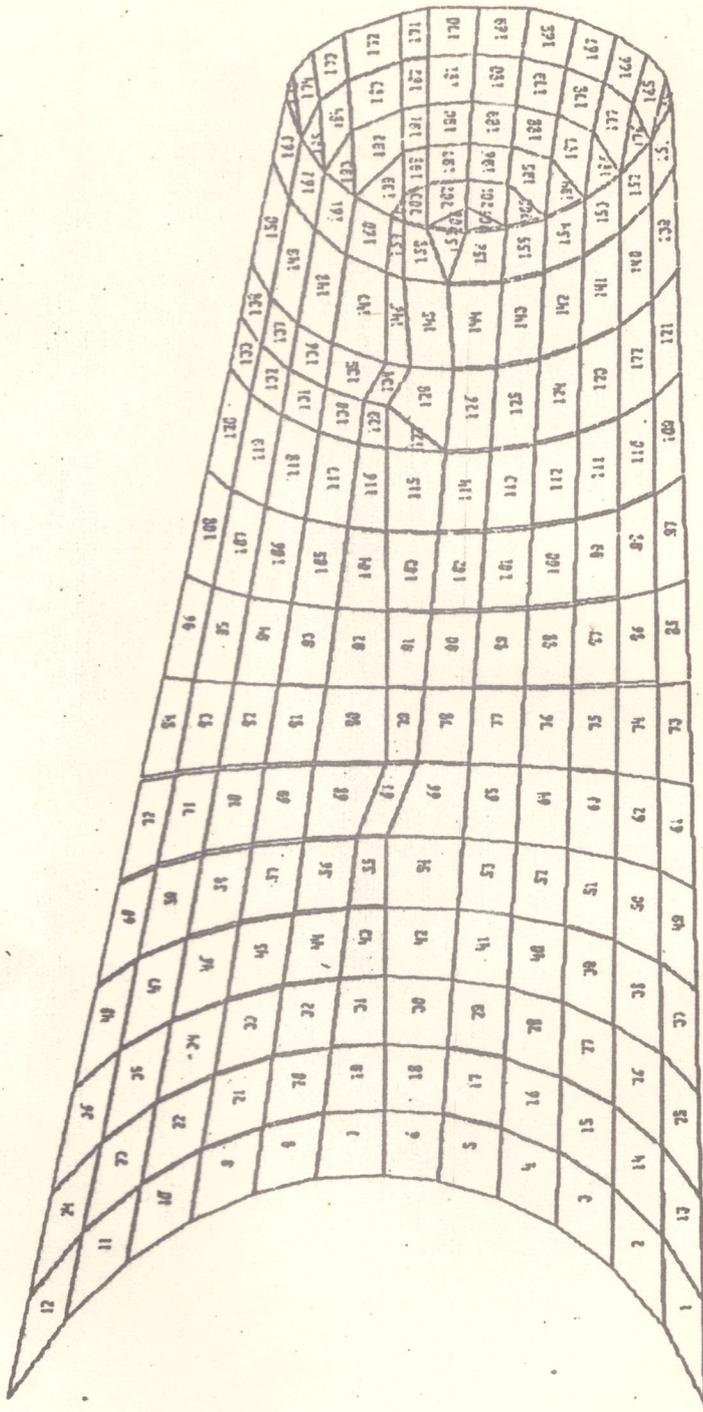
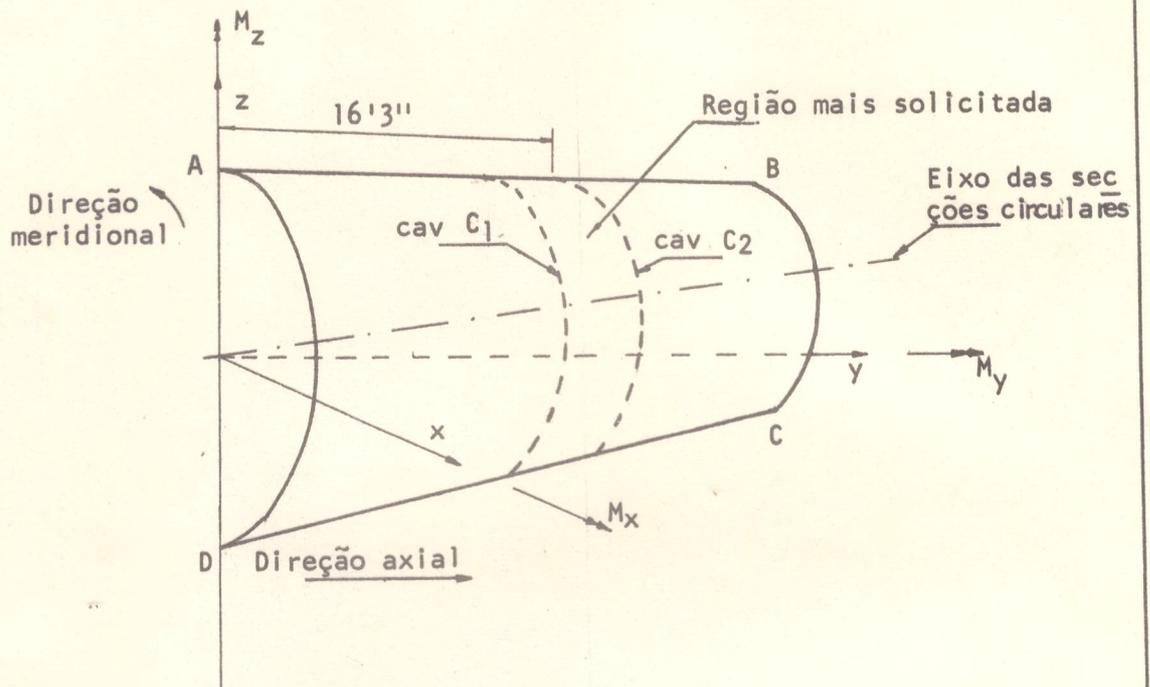


Figura 6



Segmento	Translações			Rotações		
	x	y	z	M_x	M_y	M_z
ABCD	1	0	0	0	1	1
AD	1	1	1	1	1	1

Codigo
 1=restrição total
 ao movimento
 0=liberação total
 ao movimento

Fig. 7 - Esquema do trecho analisado e suas condições de contorno

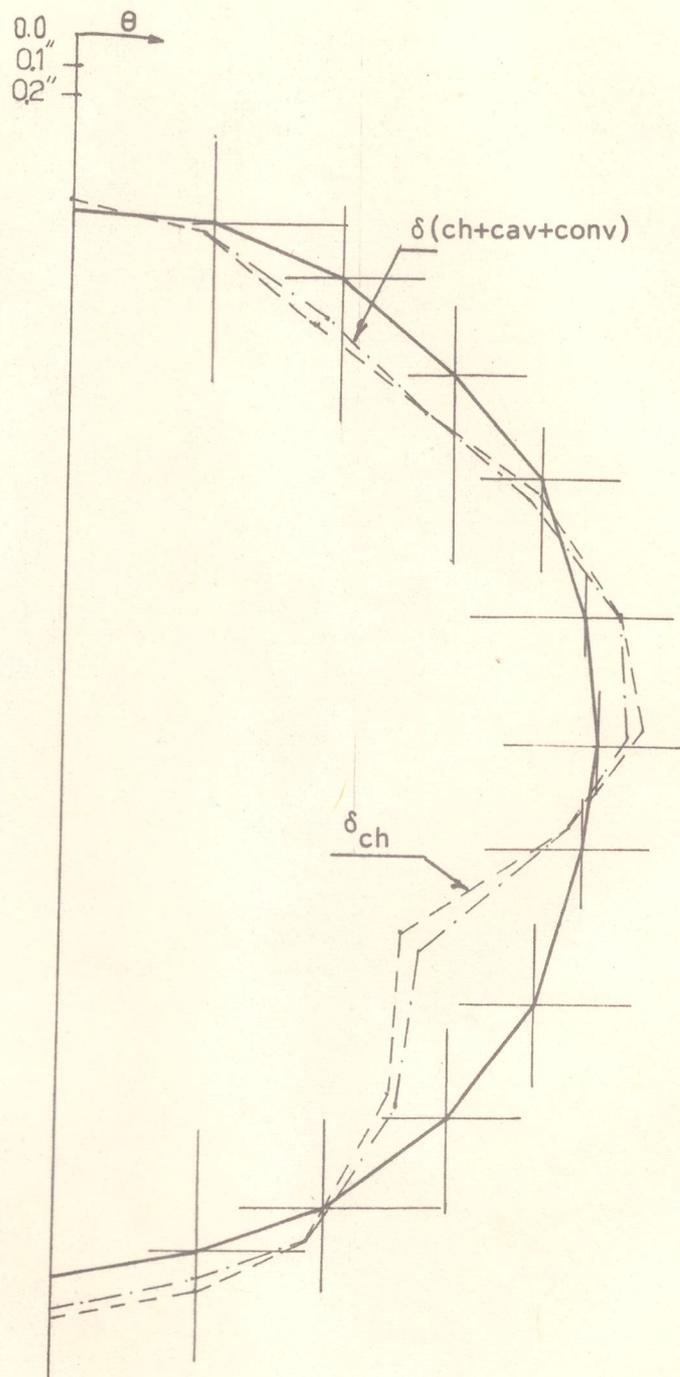


Fig. 8 - Campo de deslocamentos da caverna C_1

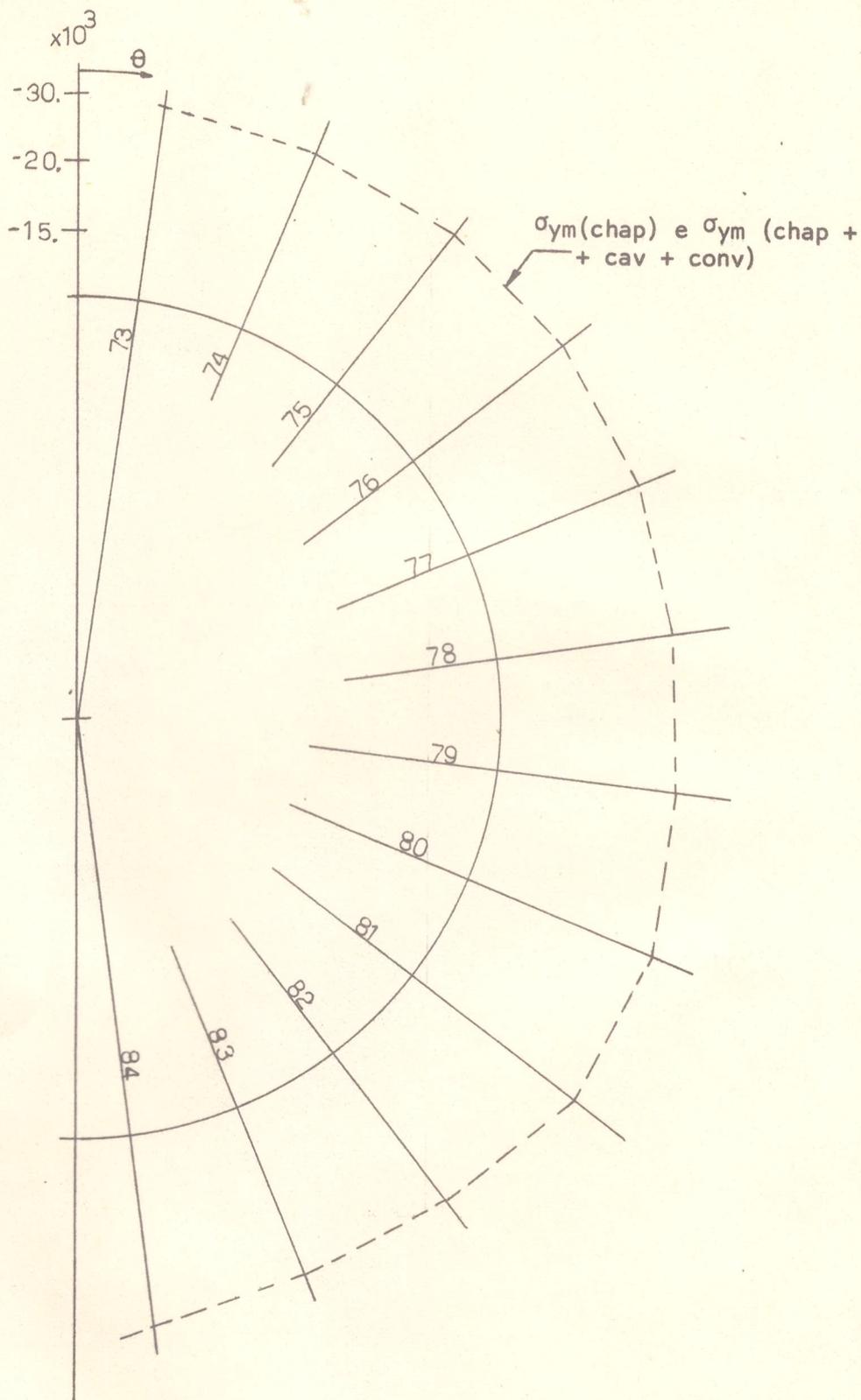


Fig. 9 - Tensões de membrana circunferenciais no corpo tronconico (σ_{ym})

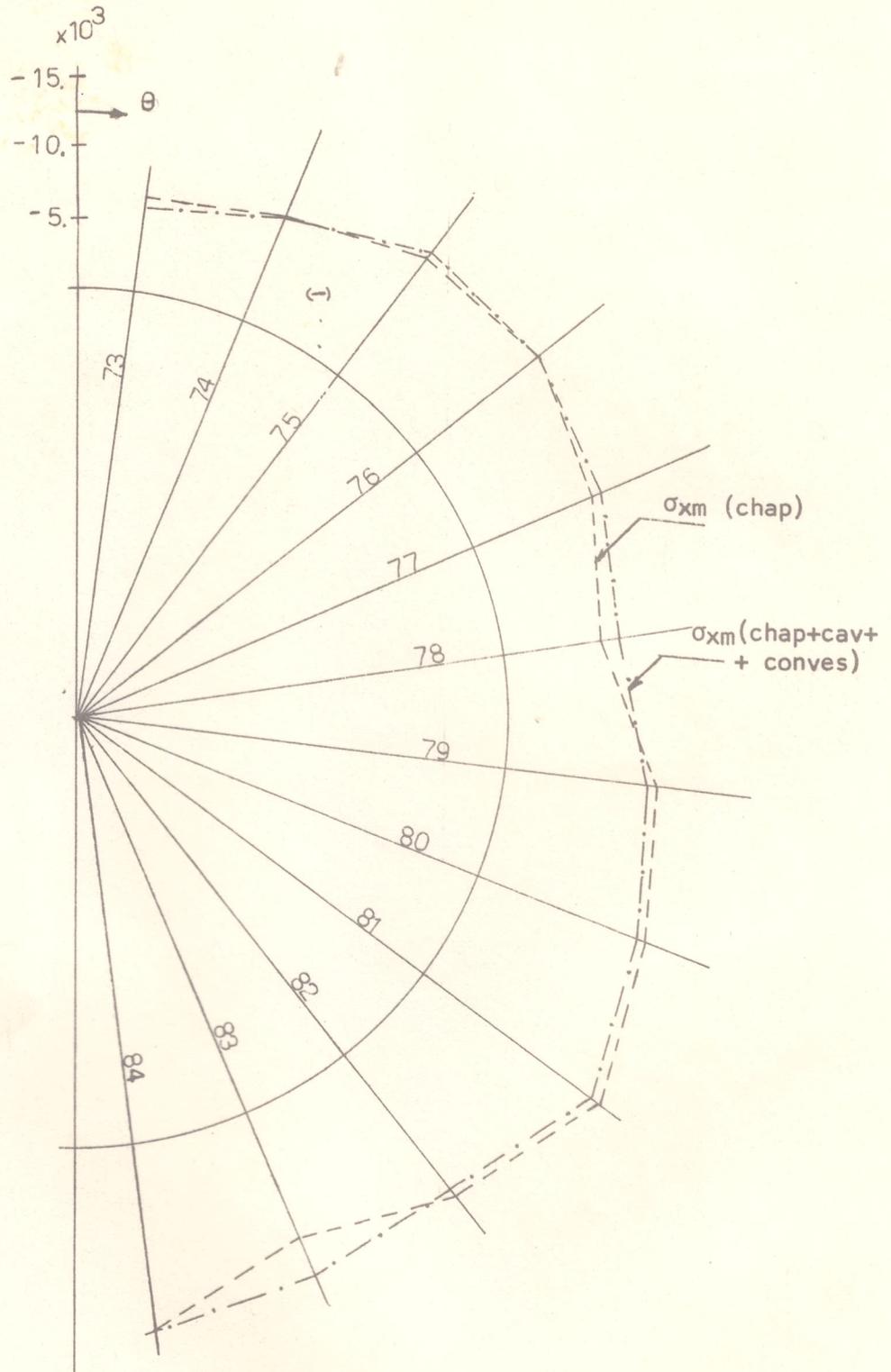


Fig. 10 - Tensões de membrana meridionais no corpo tronconido (σ_{xm})

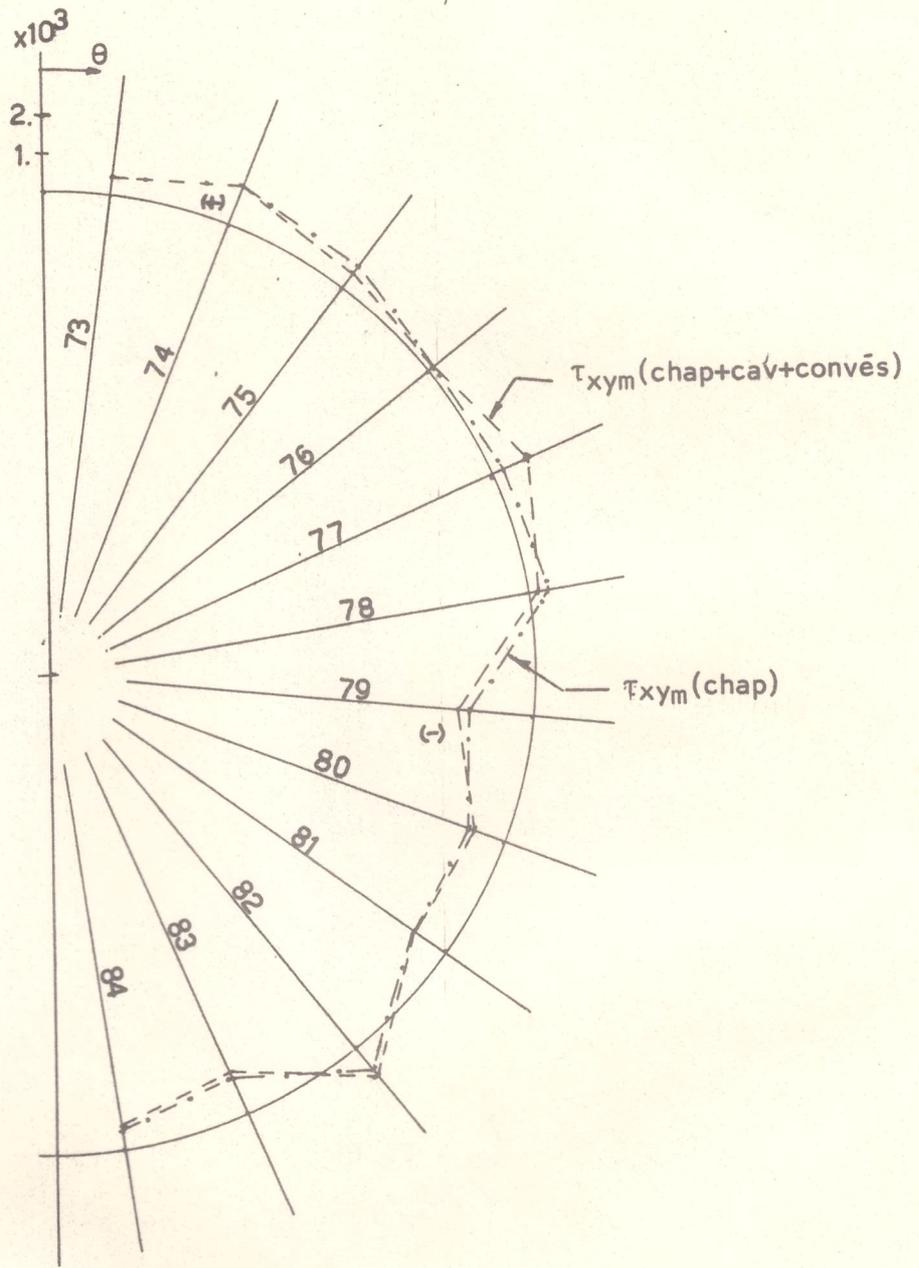


Fig. 11 - Tensões de membrana em cisalhamento no corpo tronconico (τ_{xym})

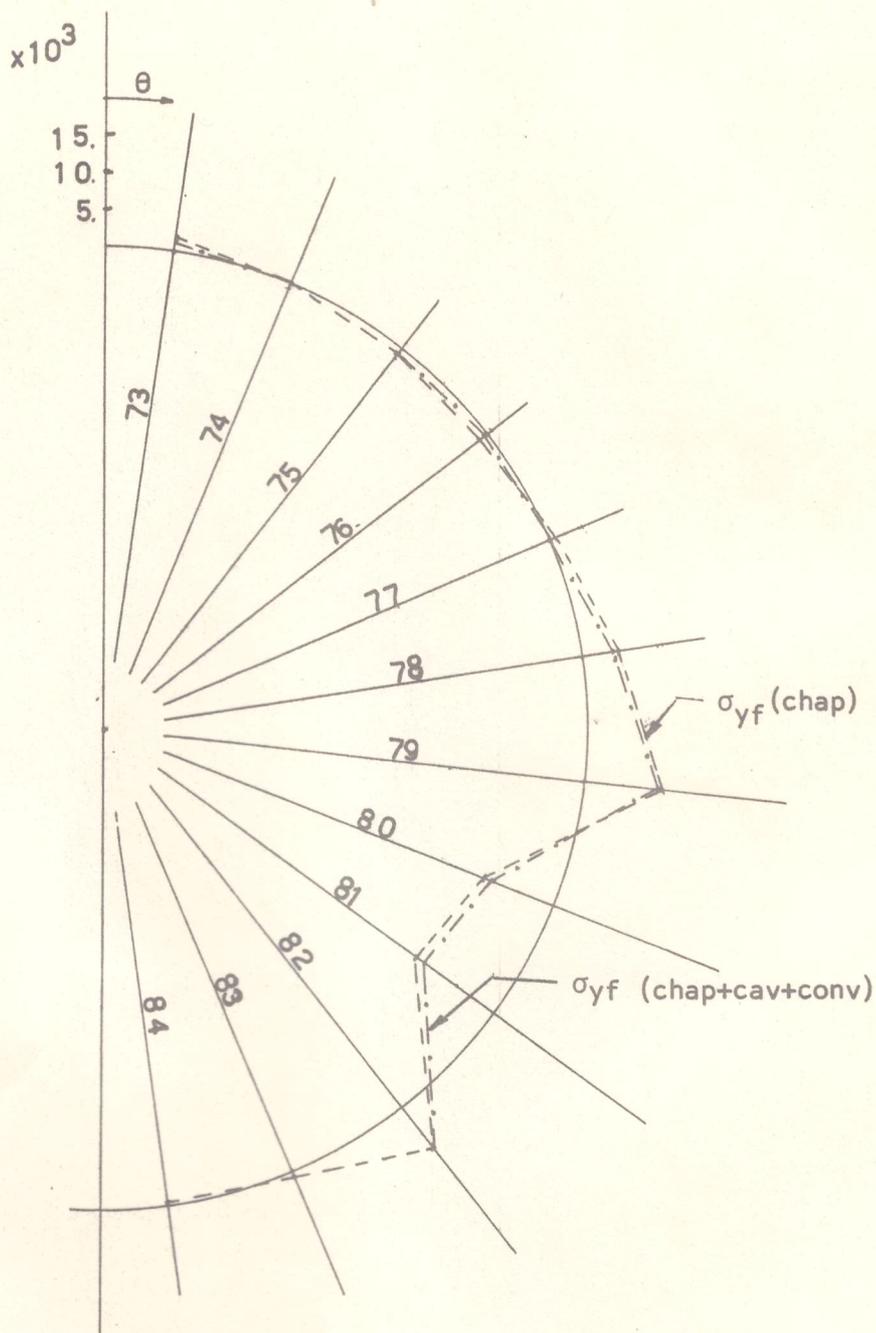


Fig. 12 - Tensões de flexão circunferenciais no corpo troncônico (σ_{yf})

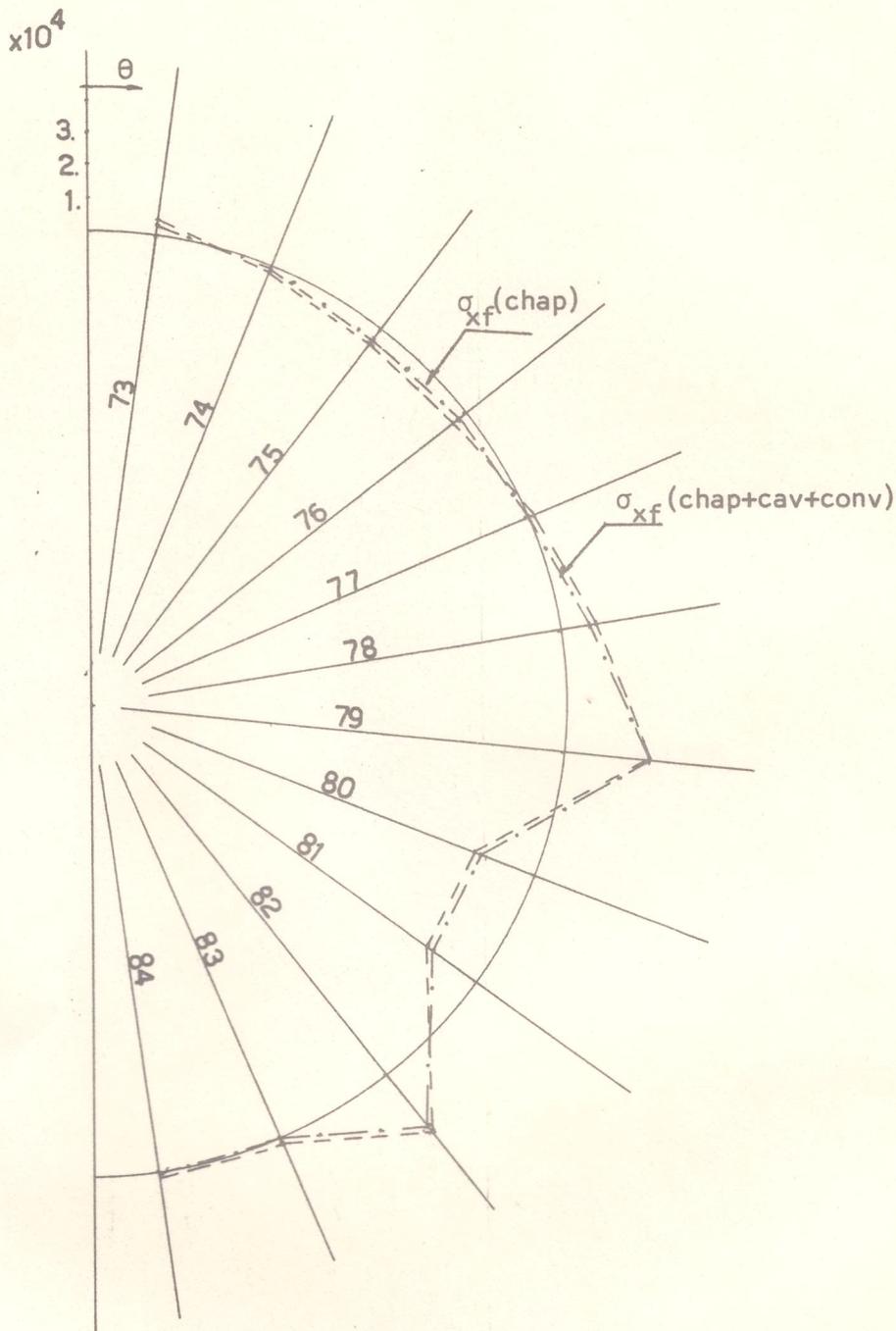


Fig. 12 - Tensões de flexão circunferenciais no corpo tronconico (σ_{yf})
Fig. 13 - Tensões de flexão meridionais no corpo tronconico (σ_{xf})

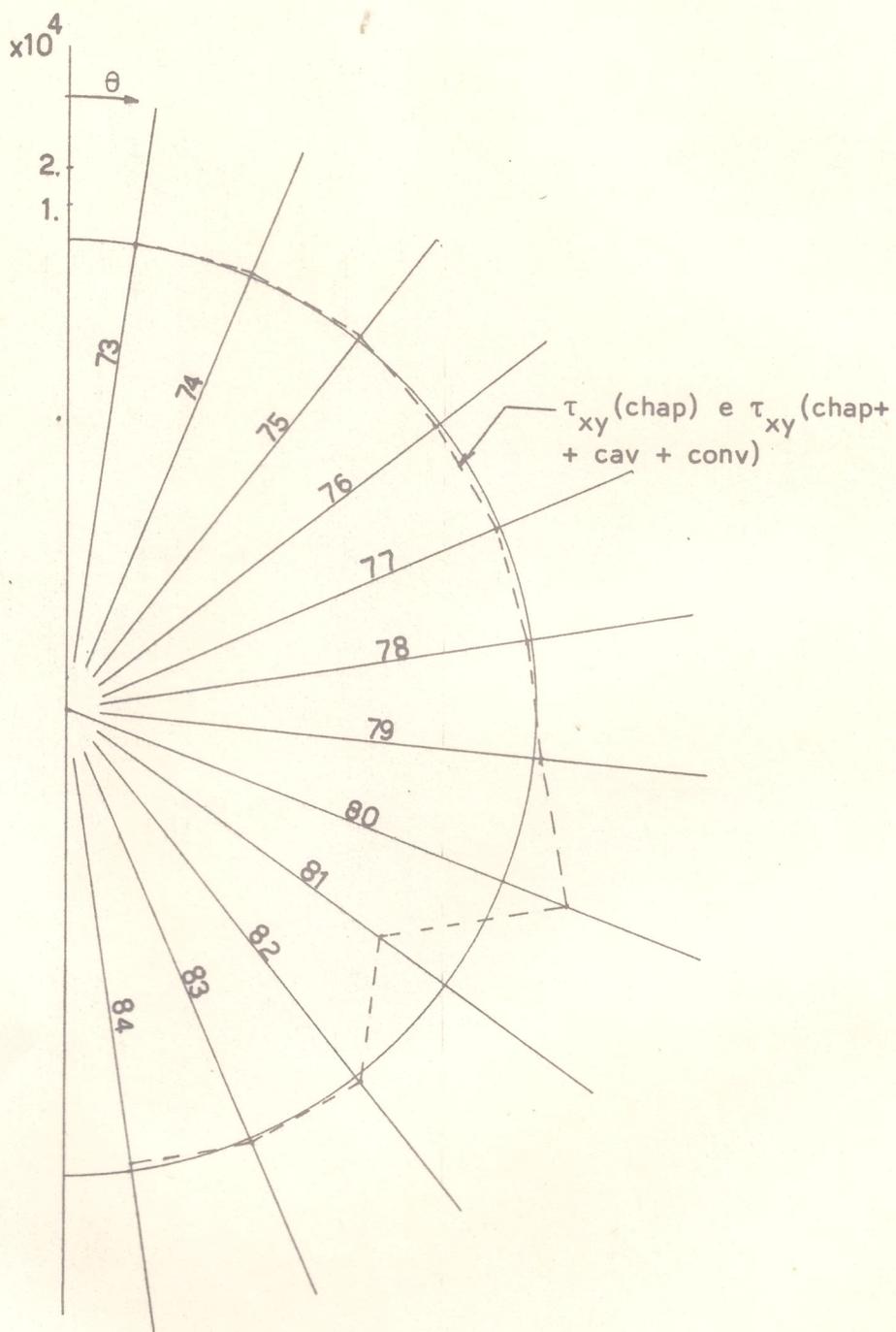


Fig. 14 - Tensões de cisalhamento associadas à flexão no corpo tronconico (τ_{xyf})

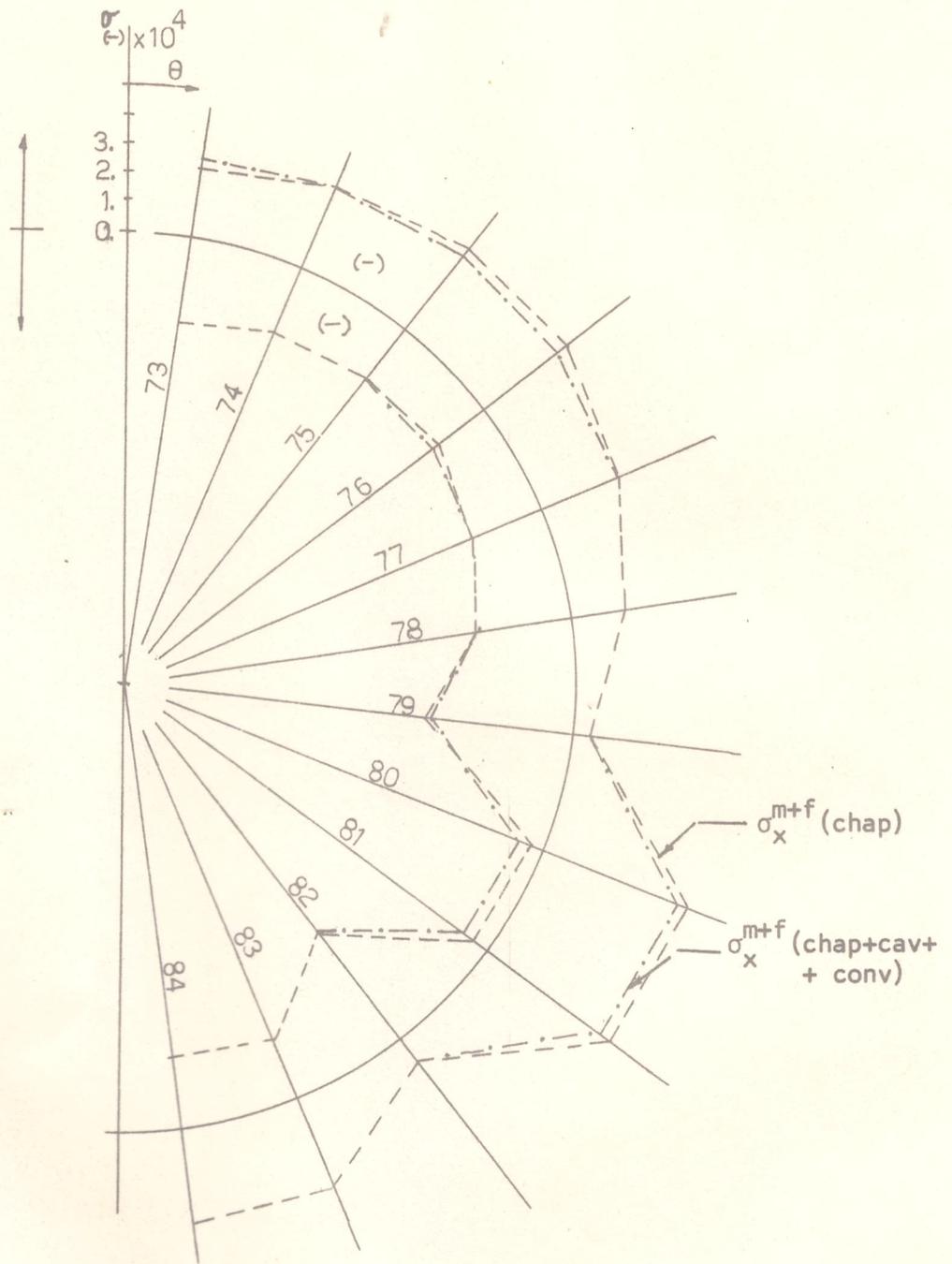


Fig. 15 - Tensão normal total na direção diferencial circunferencial no corpo tronconico (σ_x^{m+f})

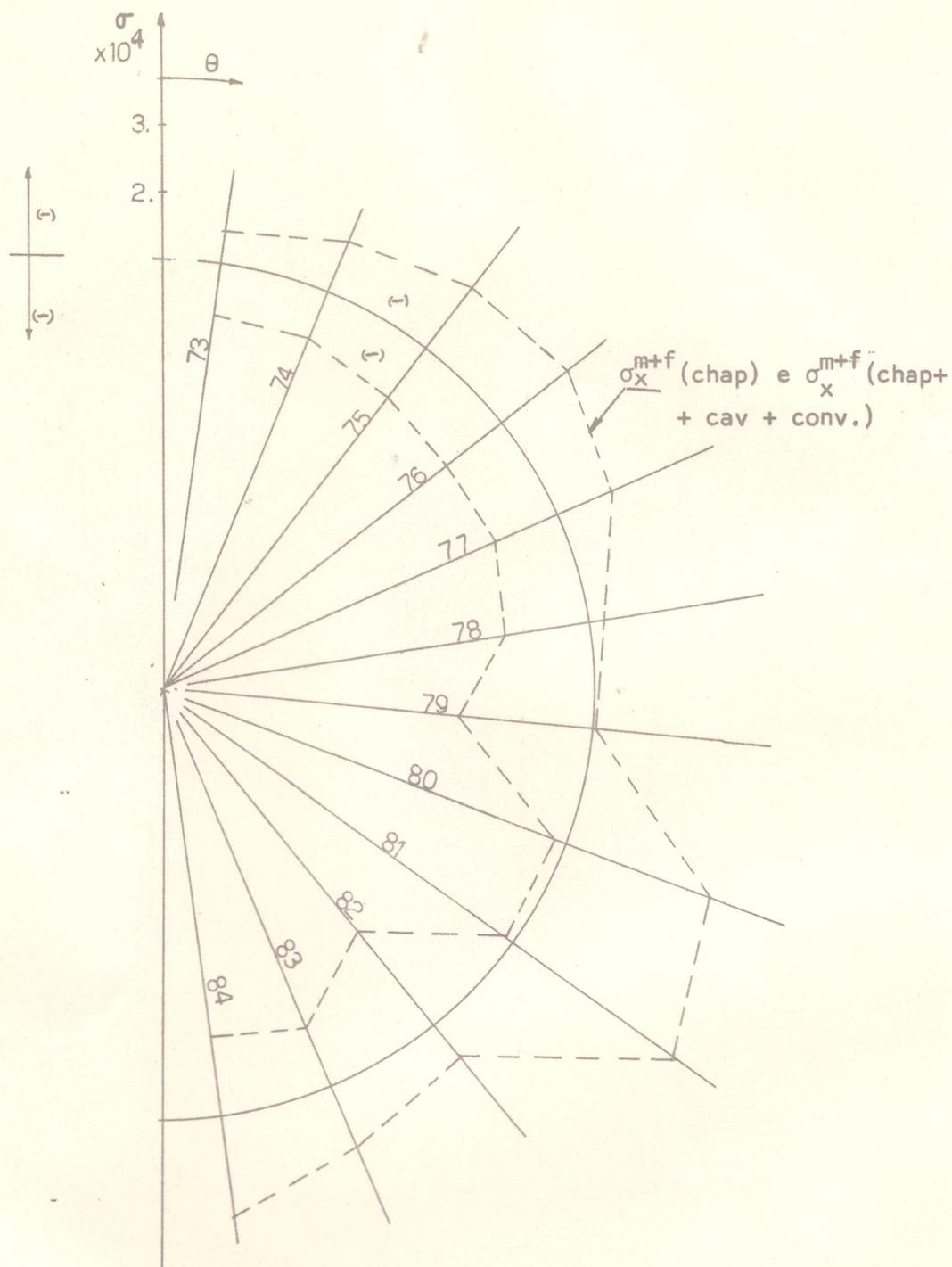


Fig. 16 - Tensão normal total na direção meridional no corpo tronconico (σ_x^{m+f})

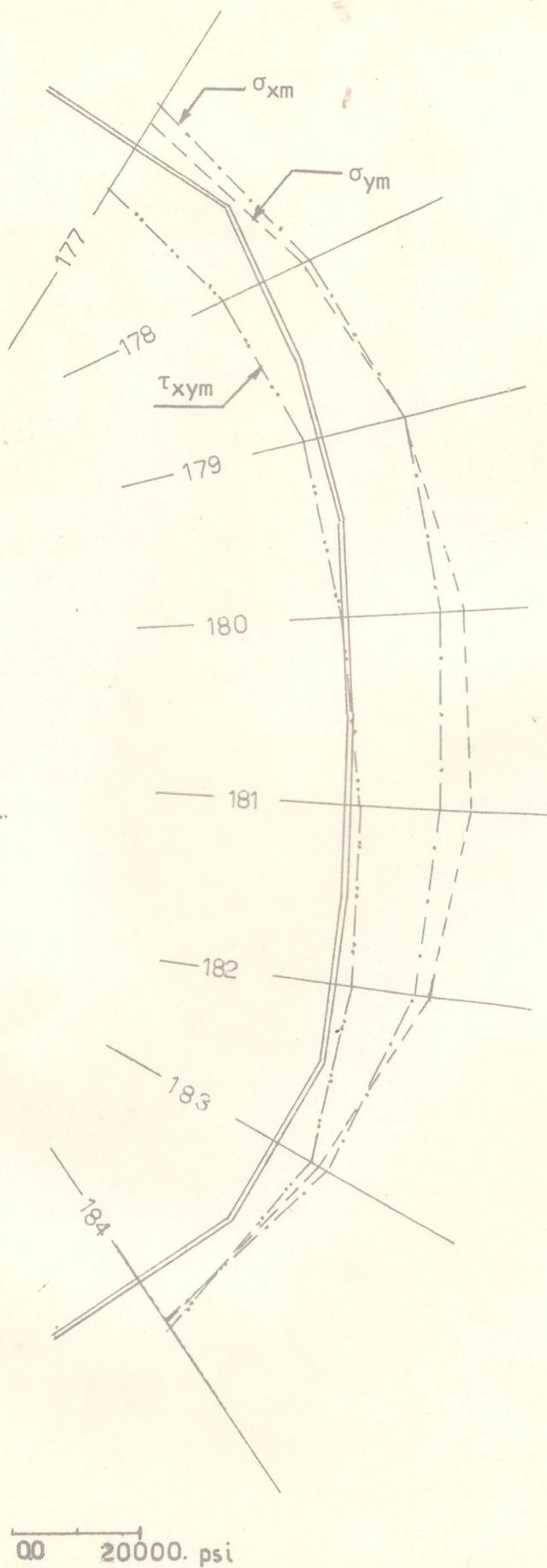


Fig. 17 - Tensões de membrana numa secção da calota elipsoidal paralela ao plano de simetria do corpo tronconico ($\sigma_{xm}^m, \sigma_{ym}^m, \tau_{xym}^m$)

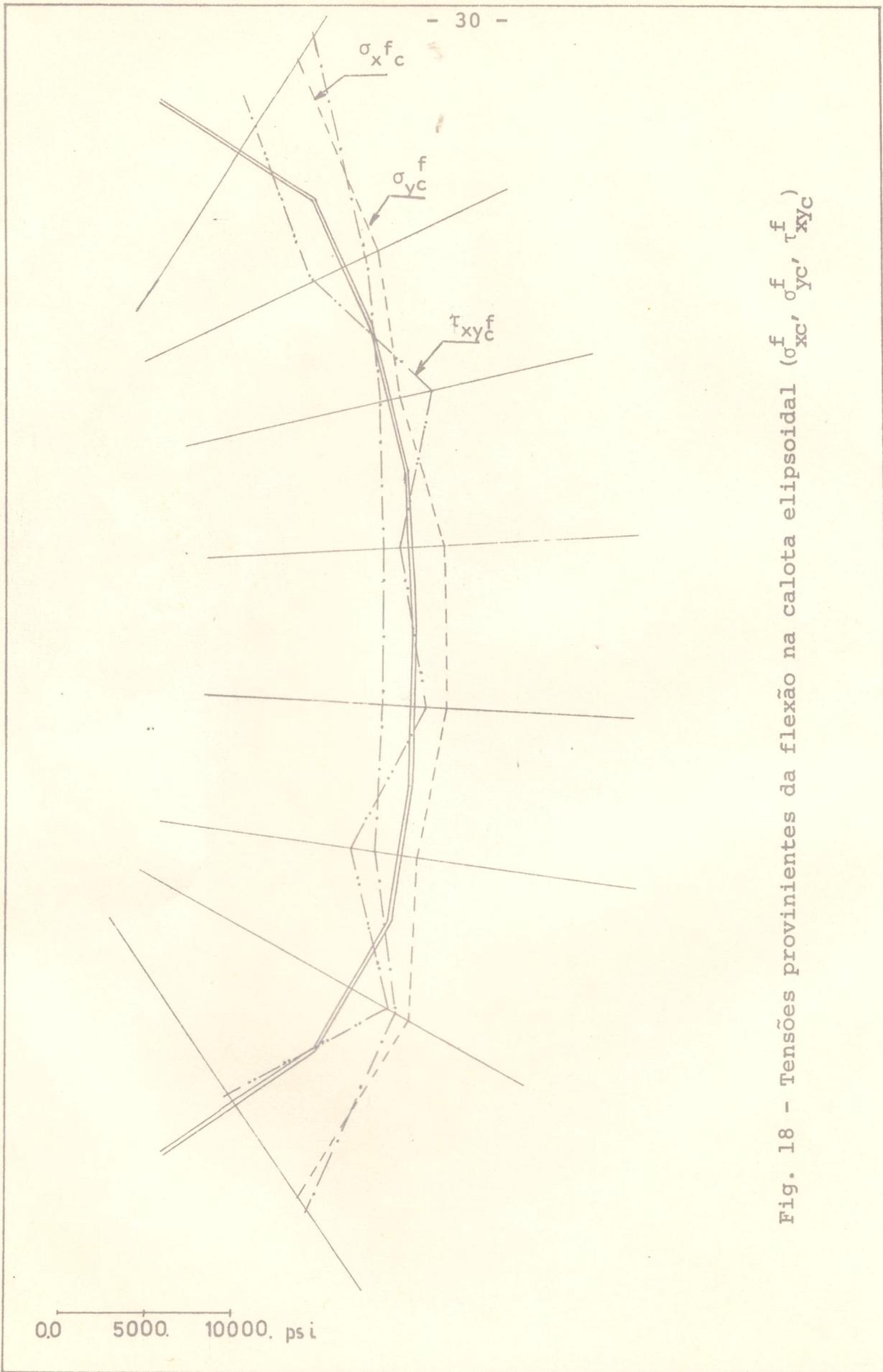


Fig. 18 - Tensões provenientes da flexão na calota elipsoidal (σ_{xc}^f , σ_{yc}^f , τ_{xyc}^f)

REFERENCIAS

1. Trilling, C., "The Influence of Stiffening Rings on the Strength of Thin Cylindrical Shells Under External Pressure," EMB Report 396.
2. Kaminsky, E. L., "General Instability of Ring-Stiffened Cylinders With Clamped Ends Under External Pressure by Kendrick's Method", DTMB Report N9855.
3. Reynolds, T.E., "General Instability of Ring-Stiffened Cylindrical Shells Subject to External Hydrostatic Pressure," DTMB Report C-841.
4. Wenk, E., and Kennard, E. H., "The Weakening Effect of Initial Tilt and Lateral Buckling of Ring Stiffeners on Cylindrical Pressure Vessels", DTMB Report 1073.
5. K. Voñ Sanden and K. Gunther; "The Strength of Cylindrical Shells, Stiffened by Frames and Bulkheads, under Uniform External Pressure on all Sides" (translated by E.N. Labouvie, annotated by E. Wenk and W. A. Nash); TMB Report T-38 , March 1952.
6. Kendrick, S. - The buckling, under external pressure , of ring stiffened circular cylinders - RINA, 1965.
7. Bukalov, V. M. - Atomic powered submarine design-National Technical Information Service - U. S. Department of Commerce.
8. "Analysis of pressure vessels and pressure vessel components" Edited by SS GILL - Pergamon Press 1970.
9. "Stress analysis goes deep" - Palermo, Peter M. - Association of Senior Engineers of the Naval Ship Systems Command -1974

10. R.V. Raetz and J.G. Pulos - "A procedure for computing stresses in a conical shell near ring stiffeners on reinforced intersection" TMB Report 1015, April 1958.
11. R.V. Raetz - "Analysis of stresses at junctures of axysimmetric shells with axysimmetric rings of linearly varying thickness "TMB Report 1444, January 1961.
12. "Deep ocean simulation facilities of the United States", SNAME T & R Report, R.13 , January 1972.
13. Dunham, F.W. and Heller, S.R., "Comparative Behaviour of Submarine Pressure Hull Structures of Different Scales Under Uniform External Pressure", Naval Engineers Journal, May 1963.
14. Finite Elements for Thin Shells and Curved Members=edited by D.G. Ashwell and R.H. Gallagher - John Wiley and Sons - 1976.
15. Wilson, L.W., Bathe, K.J., Petterson, F.E. SAP IV "A structural Analysis Program, for static and Dynamic Response of Linear Systems, University of California, Berkeley , California.
16. "Implantação de um sistema de programas para a análise de estruturas típicas de navios" Manual de Usuário - Projeto NDPN-420-DEN-EPUSP-MB-BNDE".