

FRAES - PROTÓTIPO DE SISTEMA ESPECIALISTA PARA ANÁLISE DO
COMPORTAMENTO MECÂNICO LOCAL DE RISERS FLEXÍVEIS.

Jose Antonio Bogarin Geymayr

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSARIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIENCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por :



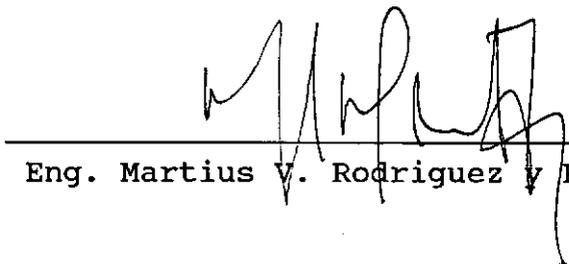
Prof. Nelson F. Favilla Ebecken, D.Sc.
(PRESIDENTE)



Prof. Agustín J. Ferrante , Ph.D.



Prof. Edison C. Prates de Lima , D.Sc.



Eng. Martius V. Rodriguez y Rodriguez.

BOGARIN, JOSE ANTONIO

Protótipo de sistema especialista para análise do comportamento mecânico local de risers flexíveis.

[Rio de Janeiro] 1990

IX, 161 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ), M.Sc., Engenharia Civil , 1990

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro , COPPE

1. Risers flexíveis

2. Sistemas Especialistas

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

A meus pais , Jorge e Marta

A minha esposa , Nathalie

Aos meus filhos Gabriela e Mauricio

AGRADECIMENTOS

Ao professor Nelson Francisco Favilla Ebecken pela orientação irrepreensível , pela dedicação , pelo incentivo e principalmente , pela amizade.

Aos amigos Marcia , Lea , Jose Alves , Paulo D'Elia , Celio e Gilberto pelo apoio e colaboração.

A todos meus colegas do Programa de Engenharia Civil da COPPE , pela amizade e pelos bons momentos compartilhados ao longo da elaboração do trabalho.

A PETROBRAS , pela assistência técnica sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

A minha família em geral , pelo incentivo , pela paciência e principalmente pelo carinho e compreensão.

Resumo da Tese apresentada á COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessarios para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc).

**FRAES - PROTÓTIPO DE SISTEMA ESPECIALISTA PARA ANÁLISE DO
COMPORTAMENTO MECÂNICO LOCAL DE RISERS FLEXÍVEIS**

JOSE ANTONIO BOGARIN GEYMAJR

Junho de 1990

Orientador : Nelson Francisco Favilla Ebecken

Programa : Engenharia Civil

Este trabalho tem como objetivo básico a análise do comportamento de tubos flexíveis de alta pressão ,utilizados como risers em estruturas offshore, visando o estudo do comportamento da sua estrutura interna.O modelo matemático permite o cálculo das tensões ,deformações e pressões de contato entre as diversas camadas ,devido a combinação de carregamentos axissimétricos e flexão.

A parte algorítmica representada em FORTRAN é gerenciada por um sistema especialista implementado no ESE da IBM.O sistema resultante combina os resultados numéricos obtidos com a programação sequencial , á uma análise qualitativa decorrente da experiência dos especialistas devidamente codificada numa base de conhecimentos que recebe o nome de FRAES.

Abstract of thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc).

FRAES - FLEXIBLE RISER ANALYSIS EXPERT SYSTEM

Jose Antonio Bogarin Geymayr

June , 1990

Thesis Supervisor : Nelson Francisco Favilla Ebecken

Department : Civil Engeneering

This work deals with the behaviour of high-pressure flexible pipes which can be used as risers in offshore applications. It concerns primarily about the behaviour of the internal structure of the pipe. A theoretical approach allows to establish the stresses , strains and contact pressures between layers due to axisymmetrical loads and bending.

The algorithms were represented in FORTRAN under an Expert System "help-desk" Prototype using the E.S.E from IBM. The resulting system links the numerical results from conventional programming to the qualitative criteria codified on a knowledge base named FRAES by using the available expert's heuristic and experience .

INDICE

Capítulo I	: Introdução	1
Capítulo II	: Modelo matemático de análise estática linear seccional de Risers flexíveis	12
II.1	Introdução	12
II.2	Características principais de um tubo flexível	13
II.3	Discretização do modelo	21
II.4	Comportamento mecânico local sob ação de cargas Axissimétricas	23
II.5	Relação tensão-deformação nas camadas de armaduras	29
II.6	Relação tensão-deformação nas camadas plásticas	33
II.7	Equações de equilíbrio de forças	35
II.8	Equações de compatibilidade de deformações nas interfaces...	40
II.9	Atrito entre camadas	40
II.10	Comportamento das armaduras submetidas á esforços de flexão	41
II.11	Verificação de tensões admi- ssíveis e de colapso	49
II.12	Algoritmo resultante de so-	

	lução	52
Capítulo III	: Inteligência artificial e	
	suas aplicações	58
III.1	Introdução	58
III.2	Características do conheci- mento humano	61
III.3	Importância de Sistemas Especialistas	63
III.4	Diferenças básicas entre a programação convencional e Sistemas Especialistas	64
III.5	Parâmetros que determinam a viabilidade de constru- -ção de Sistemas Especialistas..	66
III.6	Objetivos básicos de um (SE) ...	69
III.7	Cuidados a serem tomados na implementação de (SE)	70
III.8	Critérios de seleção de problemas candidatos a (SE)	71
III.9	Como montar a base de conhe- cimento com a técnica de Prototipagem Rápida	77
Capítulo IV	: Aspectos técnicos de (SE)	79
IV.1	Introdução	79
IV.2	Arquitetura de sistemas especialistas baseados em regras	80
IV.3	Objetos principais da base de conhecimentos	83

IV.4	Mecanismo de inferência : Backward e Forward Chai- ning	99
IV.5	Como testar a base de conhe- cimentos	102
Capítulo V	: Aquisição de conhecimentos	103
V.1	Introdução	103
V.2	O problema	105
V.3	Definição do escopo	107
V.4	Especificação do domínio	109
V.5	Aquisição do conhecimento	111
Capítulo VI	: Comparação de Resultados	135
Capítulo VII	: Conclusões	141
Bibliografia	144
Apêndice	146

*Capítulo I**Introdução*

Em função da crise energética atual e do esgotamento de reservas de petróleo no continente, as empresas petrolíferas tiveram que investir tempo e dinheiro na exploração de petróleo em alto mar.

Surge assim a Engenharia Offshore onde os modelos de análise estrutural dinâmicos e estáticos lineares e não lineares são criados especificamente para o cálculo dos parâmetros de projeto de uma plataforma em alto mar, e os seus componentes, visando segurança e economia. Uma característica interessante da engenharia offshore é que o conhecimento e a experiência adquirida devem ser constantemente adaptadas ao novo tipo de situação criada i.e., não existe um projeto padrão que possa ser aproveitado em situações futuras. Isto faz com que a interação projetistas/tecnologia seja constante, abrindo novos campos de pesquisa no que se refere ao aproveitamento de novos materiais nos diversos componentes das plataformas e a respectiva análise numérica que possibilite a sua aceitação.

Com o aparecimento de novos materiais mais resistentes e leves, fruto da investigação aeroespacial, os materiais tradicionais como o aço estão sendo substituídos por materiais plásticos.

Uma particularidade dos materiais plásticos é que todos eles tem o seu "ponto fraco" no que se refere ao

conjunto de características físicas e mecânicas que possam ser aproveitadas. Os fios de Kevlar ,por exemplo,tem quase a mesma resistência e tensão axial do aço,com o peso específico equivalente à água mas a sua resistência à tensões cisalhantes é muito baixa.Existem outros materiais plásticos ,muito resistentes à altas temperaturas mas sem nenhuma resistência mecânica.

A solução adotada que permite aproveitar ao máximo as vantagens deste tipo de material é montar compostos, utilizando os diferentes tipos de plásticos embebidos numa matriz,tambem plástica,que reuna todas as características desejadas,e que represente um ganho de resistência ou de economia quando comparada com materiais uniformes convencionais.Um exemplo clássico de material composto são os pneus de automóveis.

Na engenharia offshore materiais compostos são utilizados para a fabricação de risers marítimos flexíveis.*Risers marítimos* são um dos componentes básicos na exploração de petróleo em alto mar e tem três funções específicas : retirar a lama durante a escavação , permitir a passagem das ferramentas e transportar o petróleo do poço até a plataforma durante a exploração.

Qualquer falha no sistema de risers pode ocasionar poluição ambiental devido ao vazamento de óleo no mar , interrompendo as operações e causando elevados prejuizos econômicos.Existem dois tipos de risers marítimos : Rígidos e flexíveis.

Os risers do tipo rígido são confeccionados com estruturas tubulares de aço soldadas que apresentam

problemas de flambagem quando excitadas por correntes e ondas marítimas em profundidades superiores a 300 metros (fig 1.1).

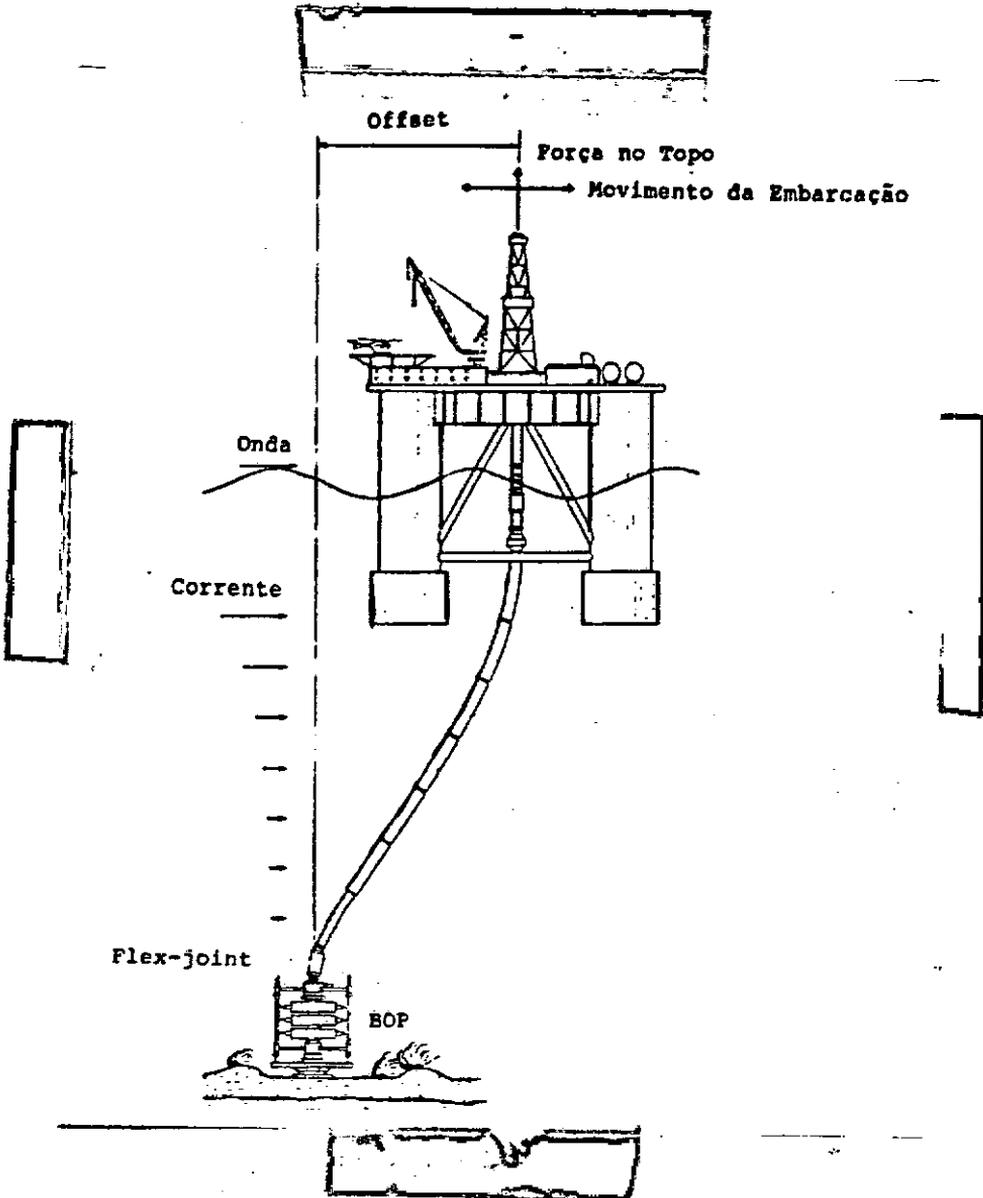


FIGURA 1.1: CONFIGURAÇÃO ESPACIAL DE RISERS RIGIDOS

Este problema é acentuado pelo peso próprio dos grandes comprimentos de tubo necessários para a exploração em águas profundas. Para prevenir a ruína por flambagem e evitar grandes deflexões, aplica-se no topo superior do riser uma tensão no mínimo equivalente ao peso próprio do mesmo em operação. As juntas nos extremos do tubo são do tipo "esfera" o que permite uma rotação angular evitando esforços exagerados de flexão quando o riser sofre deslocamentos laterais. Esta rotação é limitada devido as características mecânicas das juntas, e geralmente não ultrapassa os 10 graus. Um estudo detalhado dinâmico não linear torna-se então necessário para analisar o seu comportamento, onde os intervalos de tempo utilizados (fixos ou variáveis) podem ocasionar em certos casos instabilidade numérica ou então grande esforço computacional. Atualmente existe uma ampla referência bibliográfica sobre este tipo de risers.

Por outro lado, em 1978 surgiram os risers do tipo flexível (Fig 1.2), que são compostos de camadas de espiras helicoidais de aço e materiais plásticos de comportamento mecânico similar a cabos que permite grandes deformações devido a sua elevada flexibilidade. A composição dos risers flexíveis varia de acordo com as características para as quais foi projetado, mas geralmente a rigidez axial é aproximadamente 5 cifras superior a rigidez à flexão, o que permite a sua utilização adotando os mais variados tipos de configuração (Fig.1.3).

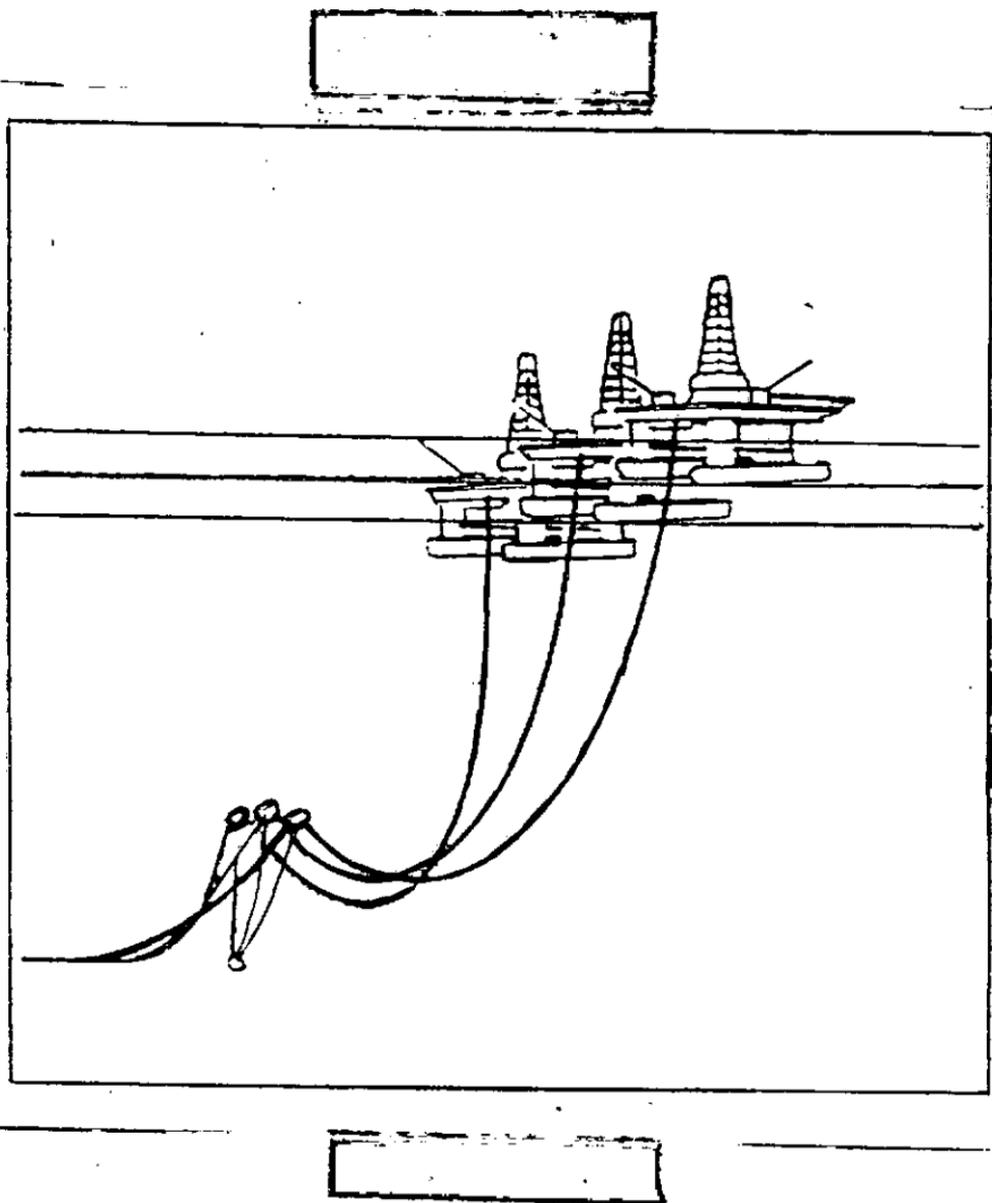


FIGURA 1.2. : CONFIGURAÇÃO ESPACIAL DE RISERS FLEXIVEIS

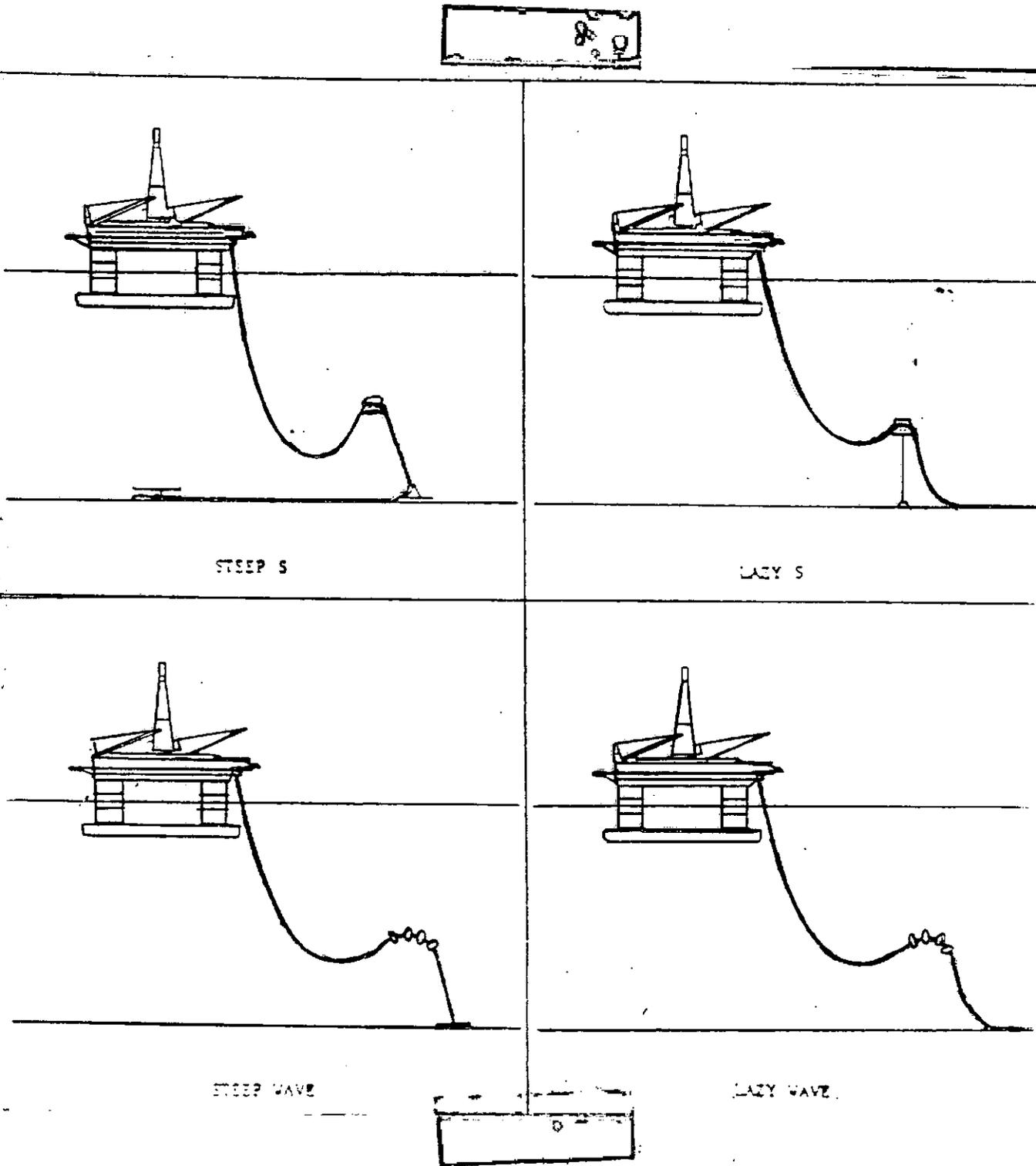


FIGURA 1.3 : TIPOS DE CONFIGURAÇÃO

Como era de se esperar, devido as características da sua estrutura composta, surge a necessidade de um novo modelo de análise, pois a ruína dos risers flexíveis é ocasionada pelo colapso de uma de suas camadas. Existe pouca bibliografia a respeito, mas futuramente este tipo de risers permitirá a exploração do petróleo em lâminas de água superiores a 1000 metros. (fig 1.1)

A especificação de modelos matemáticos para a análise de risers flexíveis torna-se assim uma necessidade para as empresas petrolíferas, pois embora apresente vantagens técnicas sobre os rígidos, são estruturas muito mais dispendiosas devido ao complicado processo de fabricação e montagem. Este fator econômico pode tornar inviável um projeto de plataforma, pois o custo de instalação da rede de risers flexíveis pode representar em certos casos 60 por cento do custo total da mesma.

FÉRET e BOURNAZEL [4] em 1970 apresentaram o primeiro modelo matemático de análise mecânica de risers flexíveis possibilitando a fabricação dos primeiros protótipos de risers ainda em fase experimental. Em seguida a empresa COFLEXIP foi criada com ajuda do Institut Français du Pétrole (I.F.P) para fabricar os primeiros risers flexíveis flowline em escala comercial, revolucionando o mercado de linhas flexíveis em aplicações offshore.

Baseados no trabalho de FÉRET et al, MACNAMARA [5] apresentou um modelo de análise tridimensional utilizando o método de elementos finitos. Até então, o objetivo principal era o domínio da tecnologia de fabricação de

risers, monopolizada pela COFLEXIP. Surgem assim outras indústrias, a PAG-O-FLEX na Alemanha, a DUNLOP na Inglaterra, a TAURUS na Bélgica e recentemente a FURUKAWA no Japão. Uma característica comum dos fabricantes é que, com o objetivo de "reserva de mercado" e principalmente para evitar o surgimento de novos concorrentes, eles restringem o acesso aos seus respectivos modelos de análise. As empresas petrolíferas além de comprar os tubos se vem na necessidade de contratar os serviços dos fabricantes no que se refere a projeto e instalação dos mesmos, encarecendo ainda mais o seu preço.

Todos estes "modelos de análise" foram calibrados em função do tipo de tubo produzido pelo fabricante com o objetivo de determinar com precisão os parâmetros de projeto : Pressão de estouro , Tração de ruína , Pressão de colapso hidrostático, Curvatura máxima etc.; acompanhando a sua determinação numérica com resultados experimentais que validam as suas respectivas teorias.

Bom negócio para os fabricantes , péssimo para as empresas petrolíferas que na maioria das vezes se vem na obrigação de adquirir tubos "superdimensionados" para certos tipos de esforços, e "mal dimensionados " para outros; pois ao estabelecer os fatores de projeto , o fabricante não considera a superposição de efeitos que podem acontecer durante a sua utilização, e que podem alterar em muito o valor dos fatores de projeto calculados isoladamente, principalmente no que se refere a determinação da sua vida útil.

Por outro lado durante o seu lançamento ao mar, o tubo

pode se submeter a esforços imprevistos que danificam alguma camada em particular. Como saber se o dano de uma camada específica representará a ruína do tubo?. Todos estes fatores que acompanham o aproveitamento de tubos flexíveis fizeram com que empresas petrolíferas como a PETROBRAS, considerem "prioritários" o desenvolvimento de modelos de análise de risers flexíveis. Em 1989 pesquisadores da COPPE/UFRJ estabeleceram um modelo de Análise do comportamento mecânico local de risers flexíveis que permite a análise de qualquer tipo de riser flexível. O programa TUBFLEX [1] foi implementado para utilização "exclusiva" da PETROBRAS, e permitirá uma avaliação dos produtos padrão apresentados pelos diversos fabricantes, com o objetivo de determinar o "produto ideal", para satisfazer as necessidades da empresa.

Existem atualmente poucos programas de análise similares, sendo que todos eles, calibrados ou não, apresentam bons resultados quando os parâmetros do tubo são conhecidos na sua totalidade, mas em compensação se um deles é desconhecido, apresentam resultados absurdos e difíceis de ser interpretados. Isto se deve principalmente a complexidade do problema, que faz com que o desempenho dos usuários não especialistas em risers flexíveis seja deficiente.

Este trabalho tem como objetivo básico mostrar como projetos de Sistemas especialistas (SE) podem ajudar a aumentar a produtividade numa equipe de trabalho de Engenharia offshore no Brasil, pois os mesmos já vem sendo utilizados com sucesso em outros países com tecnologia de ponta na área, como EUA, FRANÇA, INGLATERRA no

desenvolvimento de projetos de plataformas marítimas e os seus componentes.

O problema escolhido para tal ,é a "Análise de tensões de risers flexíveis" pois o autor deste trabalho teve a oportunidade de participar da equipe de pesquisadores da COPPE/UFRJ que especificou e desenvolveu o modelo matemático do pacote TUBFLEX, pesquisando assim, os fatores que viabilizam a construção do protótipo de sistema especialista em questão.

No Capítulo II apresentaremos uma breve descrição do modelo matemático utilizado no TUBFLEX e dos outros modelos existentes. Mostraremos também, os diversos tipos de risers flexíveis , apontando as vantagens e as desvantagens de cada um, no que se refere a sua resistência mecânica e condições limite de utilização.

No Capítulo III definimos conceitos básicos de Inteligência artificial que serão utilizados ao longo deste trabalho .Mostramos também as vantagens e os cuidados a serem tomados na elaboração de um projeto de sistema especialista ,mostrando quando devem e não devem ser utilizados.

No Capítulo IV nos preocupamos em enumerar as diferentes técnicas de Aquisição de conhecimentos com ênfase em sistemas especialistas baseados em regras, sempre nos colocando na categoria de Principiantes, utilizando uma terminologia simples e de fácil interpretação para explicar o processo de funcionamento de um sistema especialista, conceitos que serão necessários para construir o protótipo desejado.

No Capítulo V definimos o domínio do problema que será aproveitado para montar o protótipo ,sendo que por uma questão de limite de tempo e de recursos focalizaremos a nossa a atenção na primeira parte do mesmo , que trata sobre a "Aquisição de dados de risers flexíveis",para o seu posterior aproveitamento nos diversos pacotes de análise disponíveis.

O Capítulo VI será reservado para analisar o rendimento dos usuários no que se refere a qualidade de resultados obtidos e tempo gasto na aquisição e refinamento de dados para obter resultados confiáveis e que possam ser aproveitados;inicialmente sem utilizar o protótipo e depois com a sua utilização verificando se os objetivos do mesmo foram cumpridos.

No Capítulo VII,Indicamos também as conclusões e possíveis expansões do trabalho aqui apresentado.

CAPITULO II

*Modelo matemático de análise estática local de risers flexíveis**II.1 Introdução*

Durante a utilização de risers flexíveis em águas profundas, as suas características flexíveis permite grandes mudanças de configuração, devido á sua baixa rigidez á flexão, quando comparada á rigidez axial ou torsional. A determinação dos esforços ao longo da linha requer uma análise estática e dinâmica não linear que permita detectar os pontos críticos da mesma. Embora existam varios trabalhos publicados sobre a análise estrutural global da linha, existe pouca informação referente ao comportamento da sua estrutura interna.

Existem na limitada literatura disponível, dois modelos numéricos de análise estática linear de tensões locais de risers flexíveis: O modelo Isotrópico e o modelo Ortotrópico. O Isotrópico é utilizado tanto para a análise de risers flexíveis com camadas "aderentes" ou "não aderentes" enquanto que o Ortotrópico e usado quase que exclusivamente nos tubos de camadas "adherentes".

O modelo numérico a ser apresentado é baseado na isotropia das diferentes camadas que compõem a estrutura interna de uma tubulação flexível de alta pressão, usados como risers na Engenharia Offshore. O algoritmo resultante, permite a determinação de tensões, deformações e

pressões de contato entre as diferentes camadas, em função do carregamento axissimétrico e de flexão atuantes, o que nos permitirá uma avaliação dos modos de colapso aos quais estão sujeitas as camadas, e do tempo de vida útil do tubo.

II.2 Características Principais de um Tubo Flexível

Os principais componentes de um tubo flexível são :

[M] tubos plásticos de seção circular que em número, constituição, finalidade e espessura variam de produto em produto, em função das características desejadas. A função básica destas camadas é proteger as armaduras de aço de substâncias corrosivas ou das ferramentas que são manipuladas no interior do tubo. No caso de tubos "Unbonded" servem também como camadas "Antiatribo" para evitar o desgaste entre camadas de armaduras e impermeabilizar o tubo, definindo as áreas de armaduras que resistirão a pressão, e as armaduras de tração. Estas camadas plásticas, de baixa elasticidade quando comparados com o aço, garantem também a flexibilidade e quase não contribuem com a resistência mecânica dos mesmos.

[N] camadas de armaduras de aço envolvendo contrahelicamente a forma tubular de seção circular. Cada camada i de armaduras de aço contém n_i espiras, onde as características geométricas da seção e o passo da sua configuração helicoidal, determinam a função específica dentro do conjunto de camadas de armadura para a qual foi projetada. Temos assim dois tipos de armaduras : as chamadas

armaduras de pressão, que tem um passo muito pequeno, e a sua seção é intertravada ou retangular, o que garante a resistência do tubo na direção radial. Outra finalidade deste tipo de armaduras é evitar ovalizações que dificultem a passagem de ferramentas, inclusive quando submetidas a flexão. Já as armaduras de tração que podem ser de seção retangular cheia, ou então cordoalhas, tem a finalidade de resistir as forças na direção axial. Armaduras com ângulo de assentamento com o eixo do tubo superiores a 55 graus são de pressão, em contrapartida as armaduras com ângulos inferiores a 55 são utilizadas em número par de camadas como armaduras de tração.

II.2.1 Tubos de camadas não aderentes (UNBONDED)

A característica principal destes tubos é que as suas camadas são montadas uma em cima da outra e podem deslizar livremente entre elas. O que garante o bom funcionamento dos tubos unbonded é a pressão de contato entre camadas, que faz com que todas elas se mantenham em contato. Em certos casos de carregamento, podem aparecer folgas entre duas camadas adjacentes provocando um substancial aumento de tensões que pode levar o tubo a ruína.

Nas interfaces das camadas, principalmente nas de aço, surgem tensões de atrito, produzindo desgaste nas armaduras, o que diminui consideravelmente o tempo de vida útil do mesmo.

A composição típica da estrutura interna de um riser

flexível do tipo "Unbonded" é mostrada na figura 2.1 onde identificamos de dentro para fora, as seguintes camadas :

A - Espira de aço de passo muito pequeno que fornece a devida resistência ao colapso, conhecida como armadura de pressão.

B- Camada tubular de polímero, que impermeabiliza o tubo e protege as camadas de aço da ação de gases corrosivos.

C- Espira de aço de passo pequeno utilizado como reforço adicional da camada de armadura (A)

D- Número par de camadas de armaduras de seção retangular, conhecidas como armaduras de tração, responsáveis pela resistência de esforços axiais (tração, torção) e em parte da pressão interna.

E- Camada tubular de polímero protetora e impermeabilizante.

A resistência mecânica deste tipo de tubos é dada pelas [M] camadas de polímeros e principalmente pelas [N] camadas de armaduras.

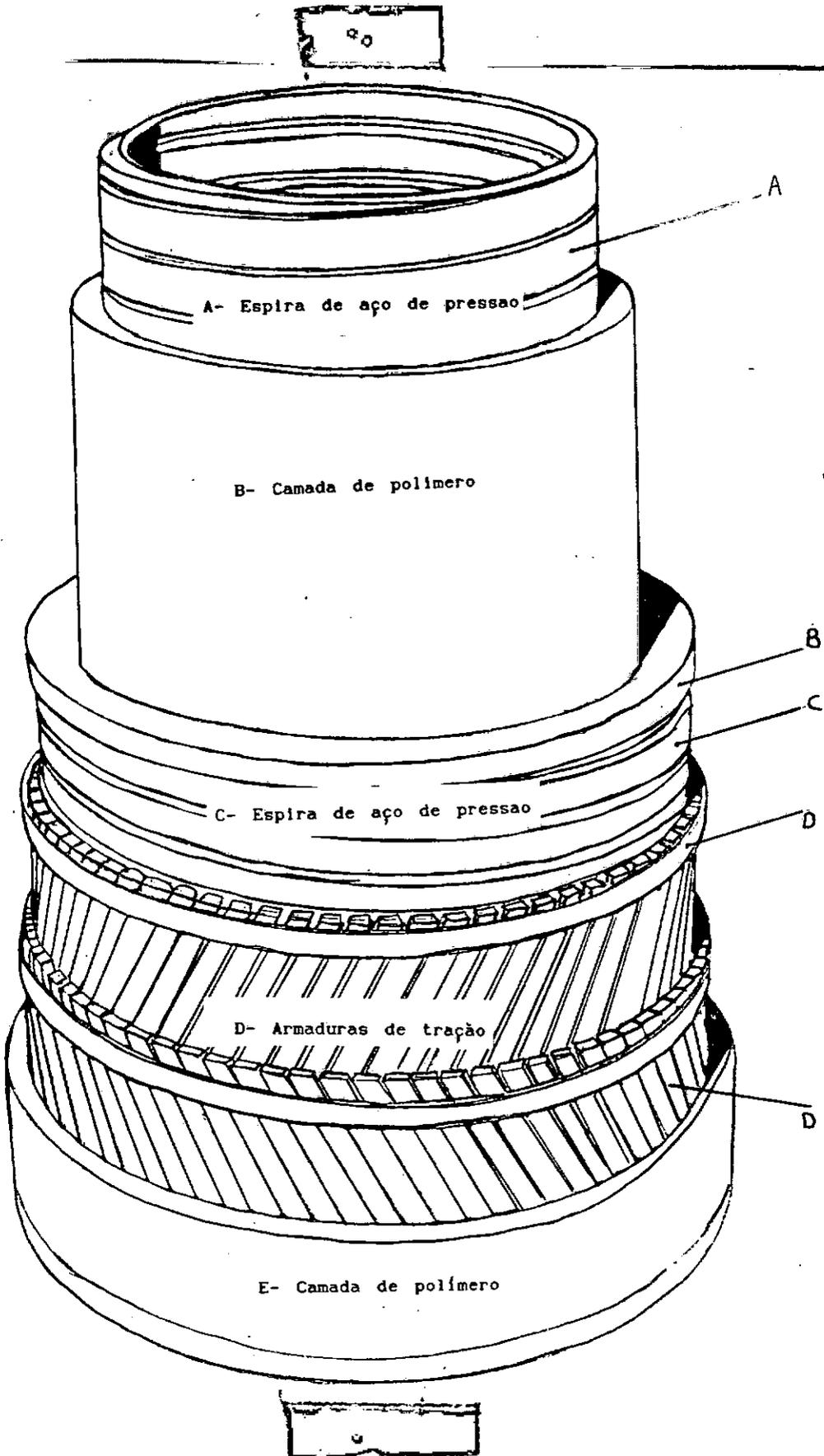


FIGURA 2.1 : Estrutura interna de um tubo "UNBONDED"

II.2.2 Tubos de camadas aderentes (BONDED)

Este tipo de tubos flexíveis tem como característica principal a vulcanização dos seus componentes de aço numa matriz de elastômero. Como camadas impermeabilizantes, são utilizados compostos de elastômeros reforçados com fibras plásticas embebidas no mesmo, ao contrário dos tubos "UNBONDED" onde são utilizadas camadas homogêneas de polímeros. Os espaços entre as armaduras de uma mesma camada são ocupados pelo elastômero, o qual é submetido a elevadas tensões cisalhantes, provocando o enrijecimento das camadas de armaduras, principalmente as de tração.

A estrutura interna de um tubo do tipo "Bonded" pode ser vista nas figuras 2.2, 2.3 e 2.4 respectivamente. De dentro para fora são identificadas as seguintes camadas :

A- Camada de elastômero impermeabilizante e protetora

B- Espira de aço de passo pequeno responsável pela resistência de cargas pontuais, pressões hidrostáticas e tensões de confinamento transmitidas pelas armaduras de tração.

C- Fibras de têxtil encapsuladas numa matriz de elastômero que evita o atrito entre as diferentes camadas adjacentes de armadura.

D- Cordoalhas de aço revestidas com cobre, vulcanizadas em elastômero que as protege da ação de gases corrosivos. Análogamente às armaduras de tração retangular nos tubos do tipo "Unbonded", estas camadas são dispostas em

número par ,contrapondo as adjacentes.A inclinação das mesmas se aproxima ao valor do ângulo neutro ($= 55^\circ$).

E- Camada externa protetora de elastômero composto.

A resitência mecânica dos tubos "bonded" é dada pelas [N] camadas de armaduras.

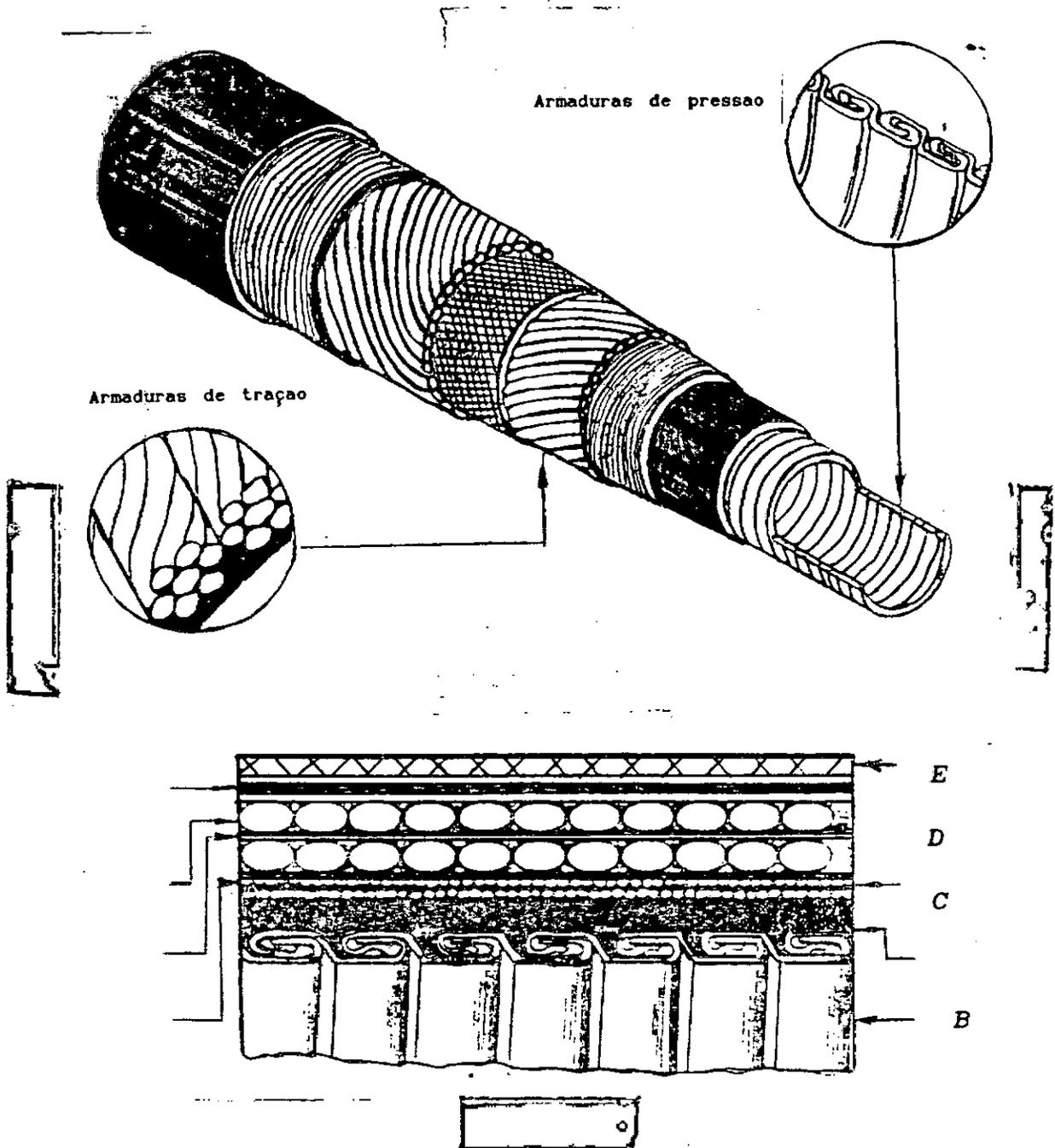


Figura 2.2 : Riser flexível do tipo "BONDED"

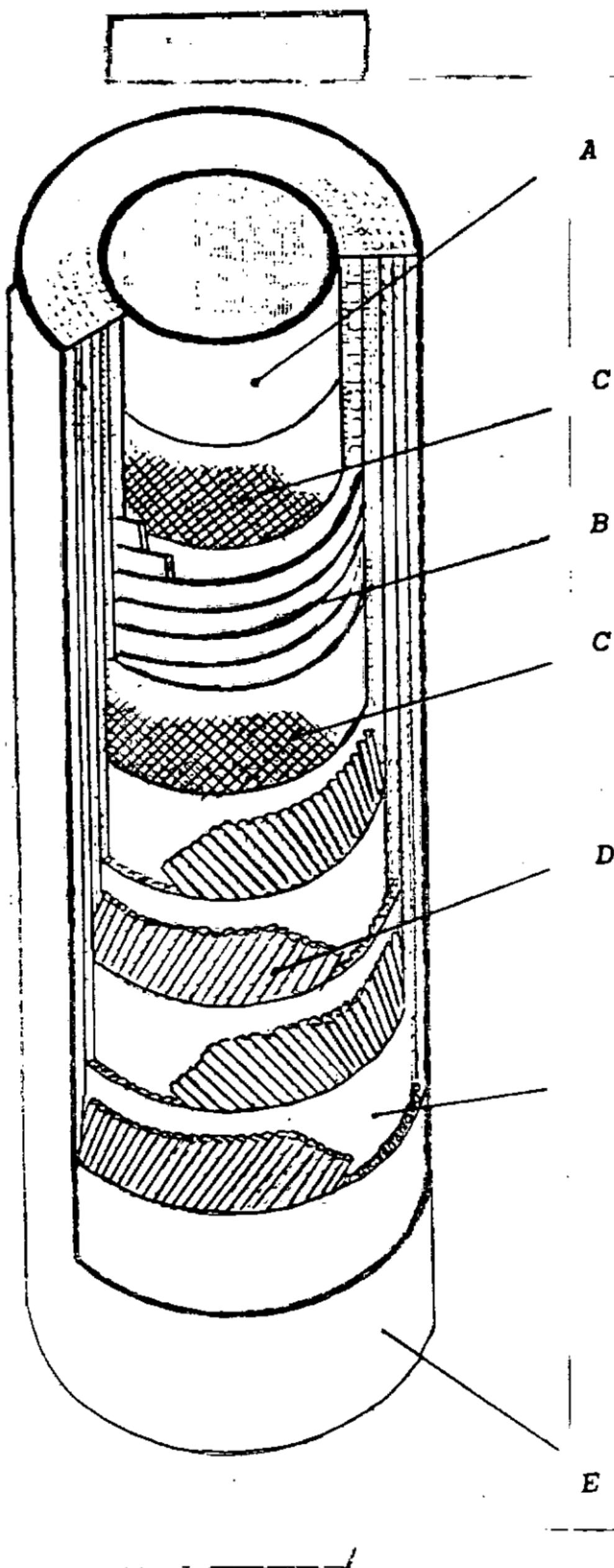


Figura 2.3 : Tubos do tipo "BONDED"

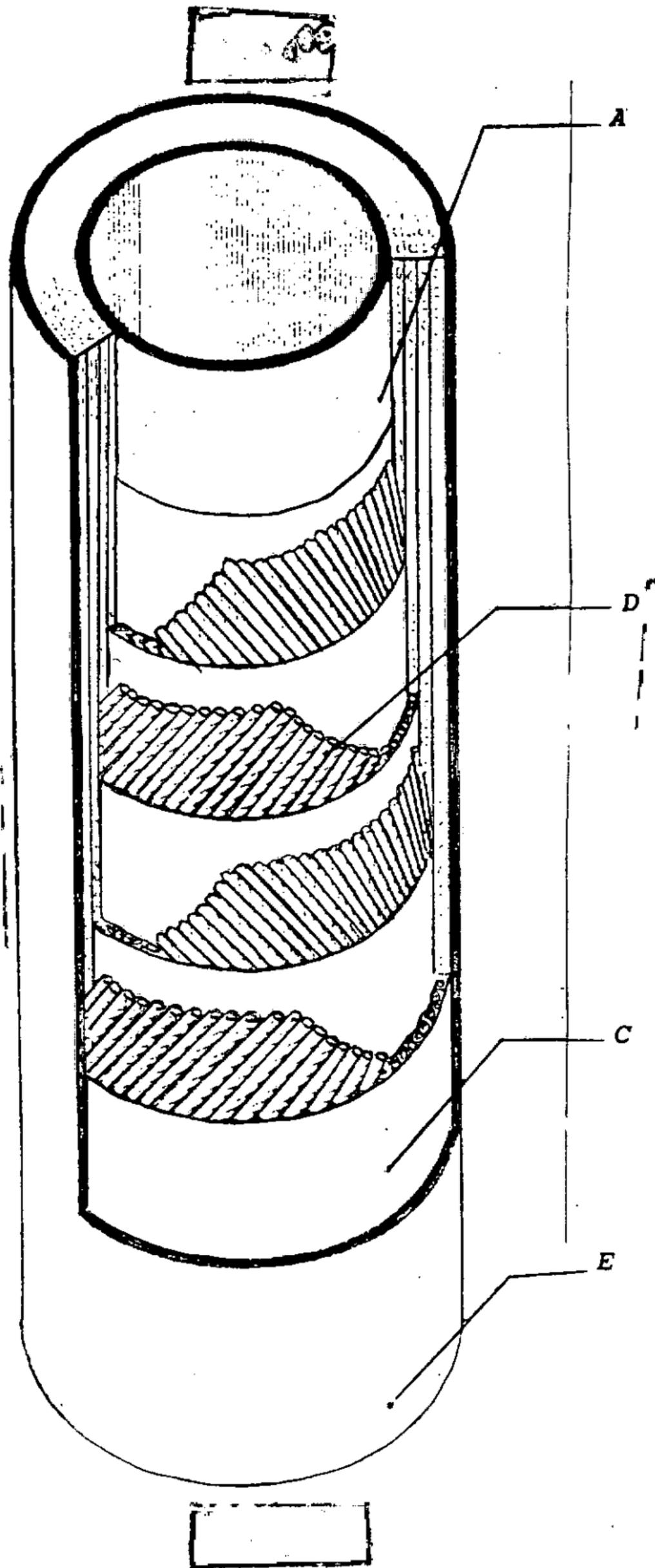


Figura 2.4 : Tubos do tipo "BONDED"

II.3 Discretização do modelo

A análise do comportamento mecânico local de tubos flexíveis realizada com o auxílio do modelo a ser apresentado, é feita sob as seguintes hipóteses básicas gerais :

a) Em função de sua destinação na aplicação "Offshore" o tubo flexível deve suportar as cargas de serviço sem sofrer grandes deformações em sua estrutura interna.

b) Conseqüentemente, as expressões para o cálculo das deformações nas espiras de armaduras de aço foram obtidas desprezando-se os termos de segunda ordem. Isto é, as deformações são assumidas como infinitesimais e a análise de tensões é feita no domínio elástico linear.

c) As membranas de polímeros, num caso, ou elastômeros no outro, acompanham as pequenas deformações das espiras de aço, o qual tem módulo de elasticidade bastante maior que aqueles dos dois outros materiais.

d) No domínio elástico linear é válida a superposição de efeitos de carregamento axissimétricos e de flexão

e) No caso de tubos "UNBONDED" considera-se o atrito entre as camadas de armaduras e entre estas e camadas de polímero, em qualquer caso de carregamento combinado.

f) No caso de tubos "BONDED" considera-se o confinamento do elastômero entre armaduras e as conseqüentes

tensões de cisalhamento;este campo de tensões é idealizado de forma simplificada segundo a teoria de estado plano de tensões aplicada a uma certa camada tubular após planificação de sua superfície média.

g) O alongamento axial e rotação axial sofridos pelo tubo são considerados constantes para todas as camadas.Observa-se que sob a ação de cargas axisimétricas - fundamentalmente tração e torção - aplicadas gradualmente a partir do estado descarregado,o tubo sofrerá inicialmente alongamento e variação de diâmetro, resistidos apenas pelo polímero(ou elastômero) até as que as armaduras entrem em carga.Assim os resultados obtidos para deformações - e não para tensões - do tubo flexível,com todas as camadas de estrutura interna,deverão ser acrescidas daquelas iniciais associadas somente às camadas plásticas.

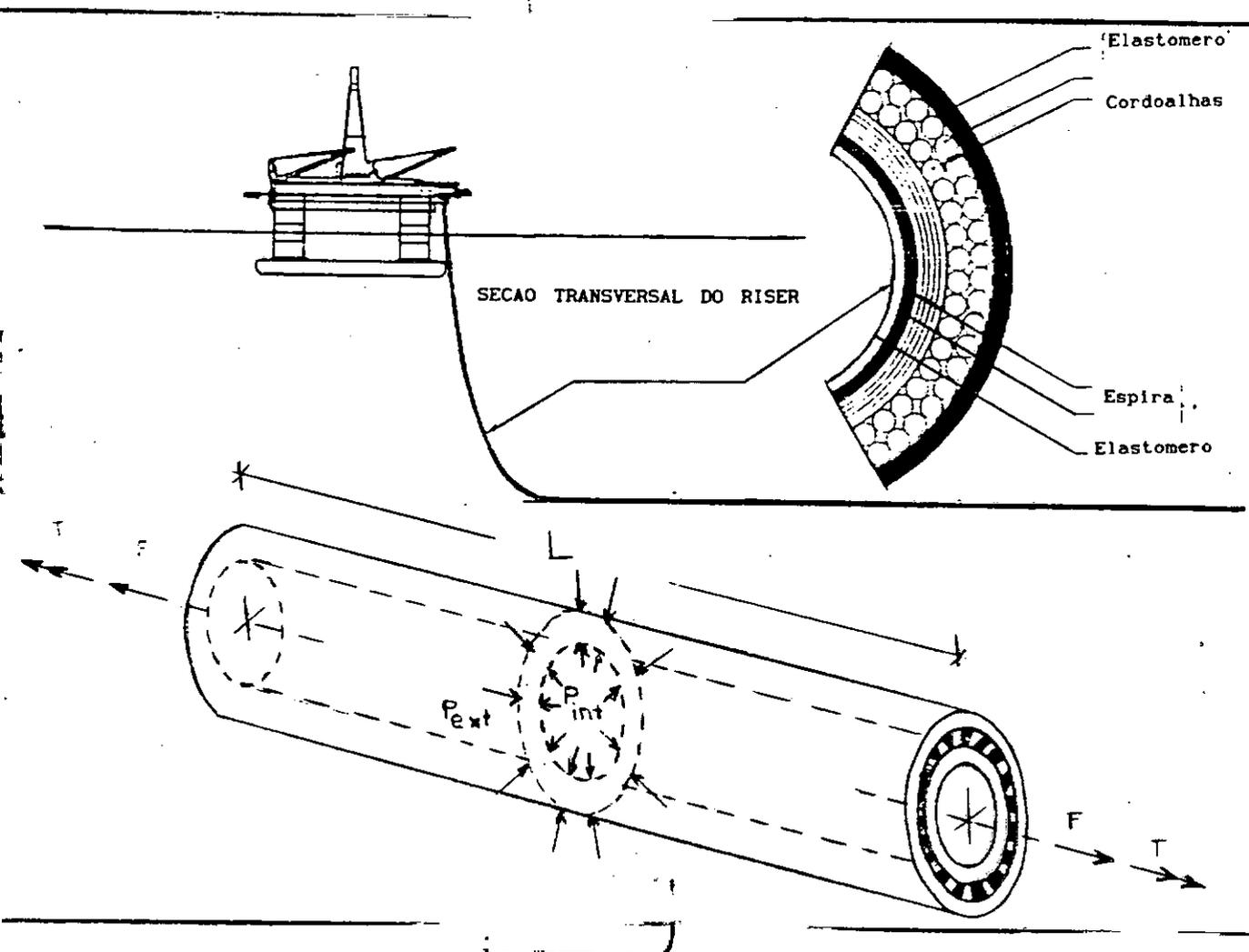
h) O cálculo das deformações e tensões nas armaduras de aço é feito considerando-as como espiras;mesmo para as de passo pequeno como as armaduras de pressão.

i) Não é considerada a ação de pressão interna sobre as armaduras de pressão que não estejam devidamente impermeabilizadas.

II.4 Comportamento mecânico local sob ação de cargas axissimétricas .

Consideram-se as seguintes cargas axissimétricas , conforme ilustrado nas figuras 2.5 e 2.6 :

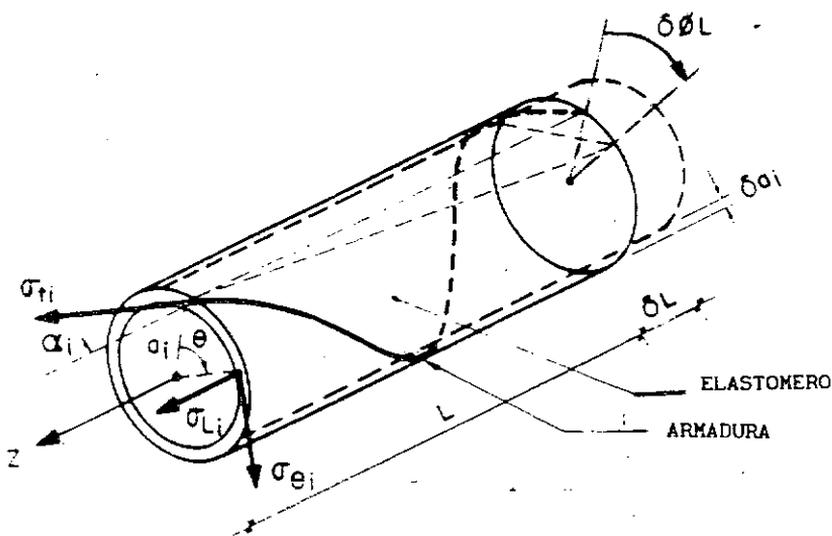
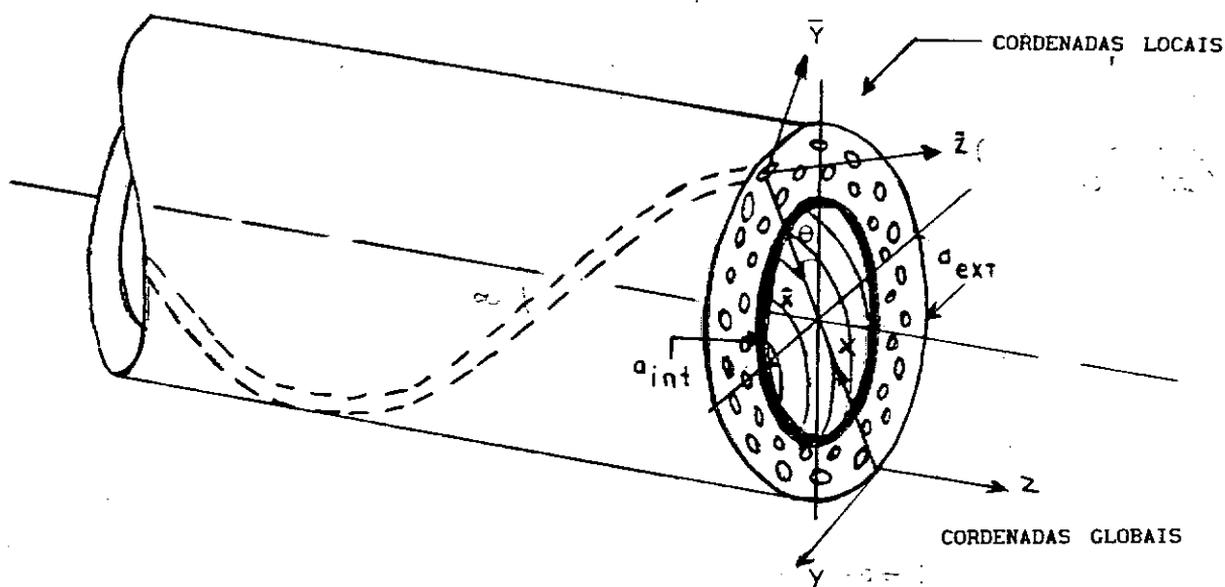
- Força axial (F), constante ao longo de um comprimento unitario (L);
- Torção axial (T), constante ao longo de (L);
- Pressão externa (P_{EXT}), constante ao longo de (L);
- Pressão interna (P_{INT}), constante ao longo de (L);



Figuras 2.5 e 2.6 : Cargas axissimétricas atuantes

Sob a ação dessas cargas ,o riser flexível sofre as seguintes deformações:

- Alongamento axial, $(\epsilon_z = \delta L/L)$;
- Variações de raio , $(\epsilon_y = \delta a_i/a_i)$; em cada camada i e a resultante variação do raio externo (a_{ext}) e interno (a_{int}) do tubo;
- Rotação axial $(\delta\phi)$ da seção transversal.

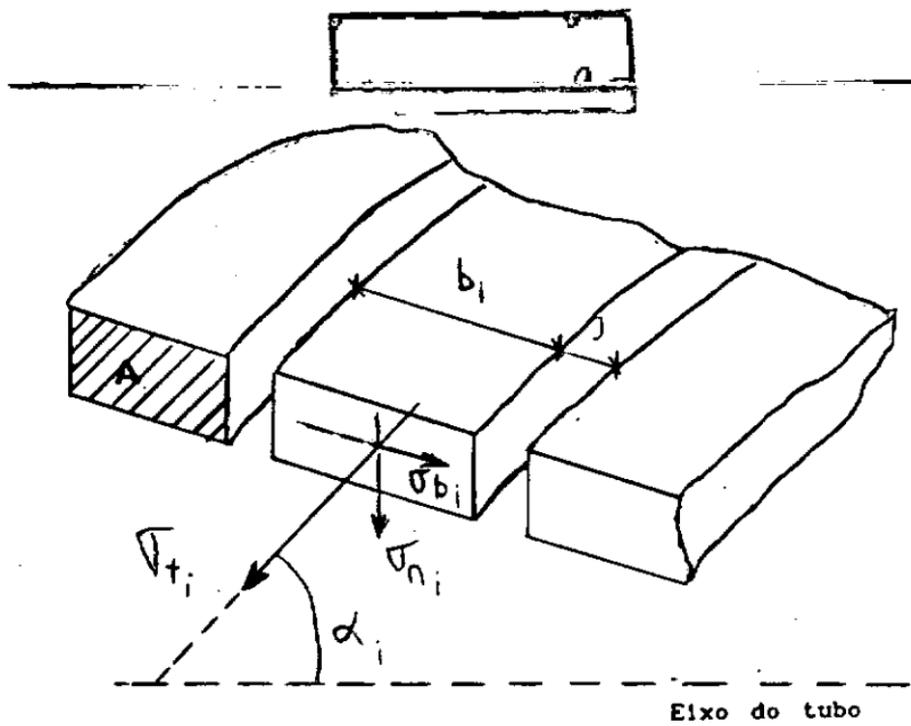


Figuras 2.7 e 2.8 : Deformações resultantes

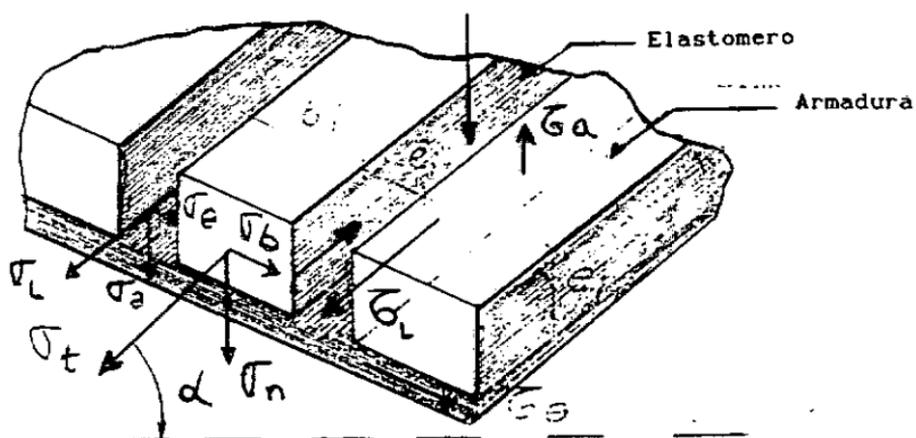
Conseqüentemente, as n_i espiras paralelas de uma certa camada i de armadura de aço, são submetidas a três tensões (fig 2.7 e 2.8)

- a) Tensão normal, (σ_t) ;
- b) Tensão radial, (σ_n) ;
- c) Tensão tangencial longitudinal (τ_L)

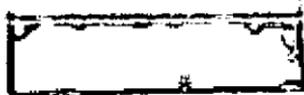
Observa-se nas figuras 2.9 (a) e (b) que a tensão na terceira direção é tomada como nula ($\sigma_b=0$). No caso de camadas "unbonded", existe um espaçamento lateral entre as armaduras e no caso "bonded", o elastômero confinado está submetida a cisalhamento puro, (τ_L) ; sendo que em ambos casos o deslizamento da armadura na sua direção helicoidal produz uma mudança no seu ângulo da hélice (α). Em função desta deformação angular ($\delta\alpha$) pode ser calculado o valor de (τ_L) no elastômero confinado, ou então considerar a redução do espaçamento entre as armaduras (δj) de uma mesma camada, onde em condições limites, podem entrar em contato lateral, comprometendo o bom funcionamento da camada de armadura em questão.



(a) Armaduras de tubos "UNBONDED"



(b) Armaduras de tubos "BONDED"



Por outro lado, as camadas de componentes tubulares plásticas, são submetidas a tensões, descritas nas três direções principais resultantes das deformações globais do tubo. Cabe observar que estas tensões são perfeitamente desprezíveis no equilíbrio de forças, pois estas camadas praticamente não contribuem na resistência mecânica do mesmo (fig 2.10 (a) e (b)) :

- a) Tensão axial, (σ_L) ;
- b) Tensão circunferencial, (σ_θ) ;
- c) Tensão radial (σ_a) ;
- d) Tensão de cisalhamento, (τ_z) ;

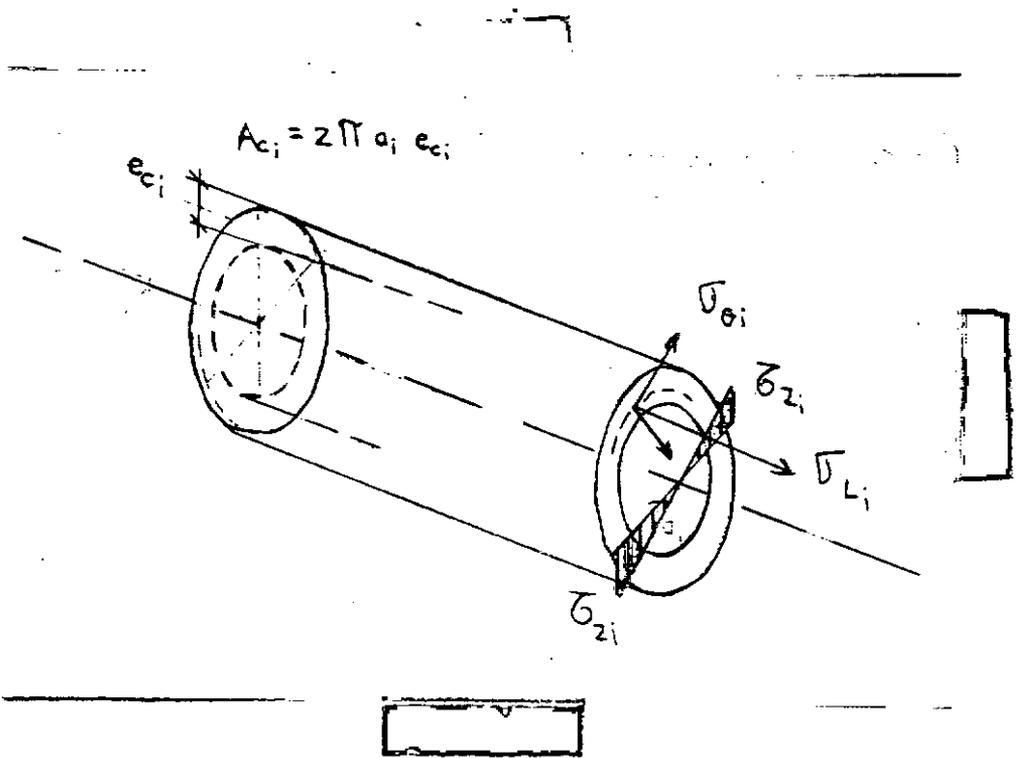
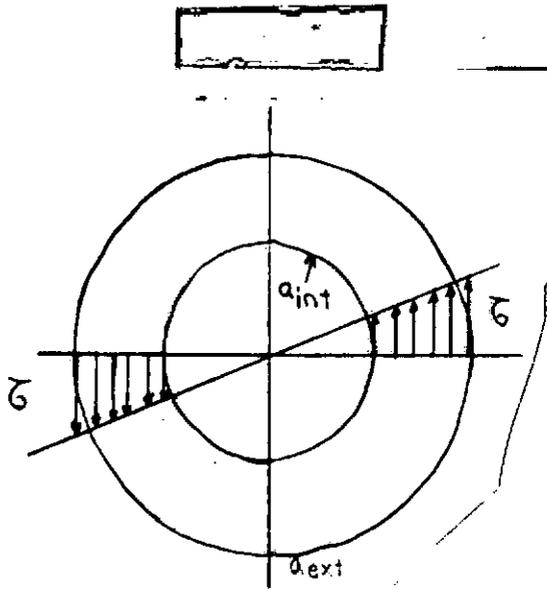
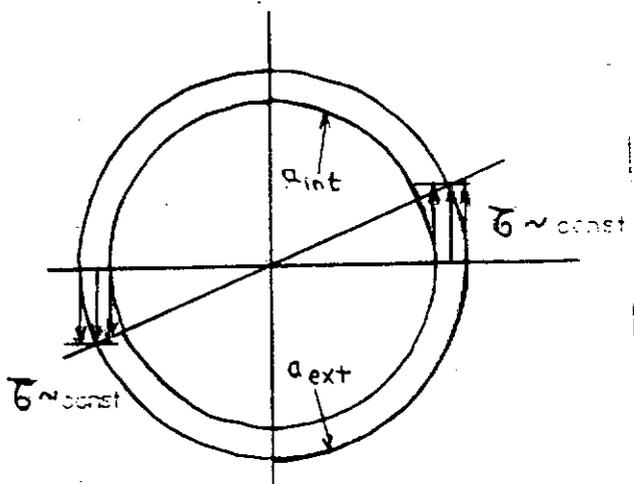


Figura 10 (a) : Tensões nas camadas plásticas



PAREDE ESPESA



PAREDE FINA

Figura 10 (b) : Tensões cisalhantes atuando na seção do tubo

II.5 Relação tensão-deformação nas camadas de armaduras

II.5.1 Deformações resultantes

Observando a superfície planificada de uma armadura helicoidal (fig 11(b)),pode-se chegar facilmente á expressão para a deformação específica na direção normal á seção transversal da mesma.

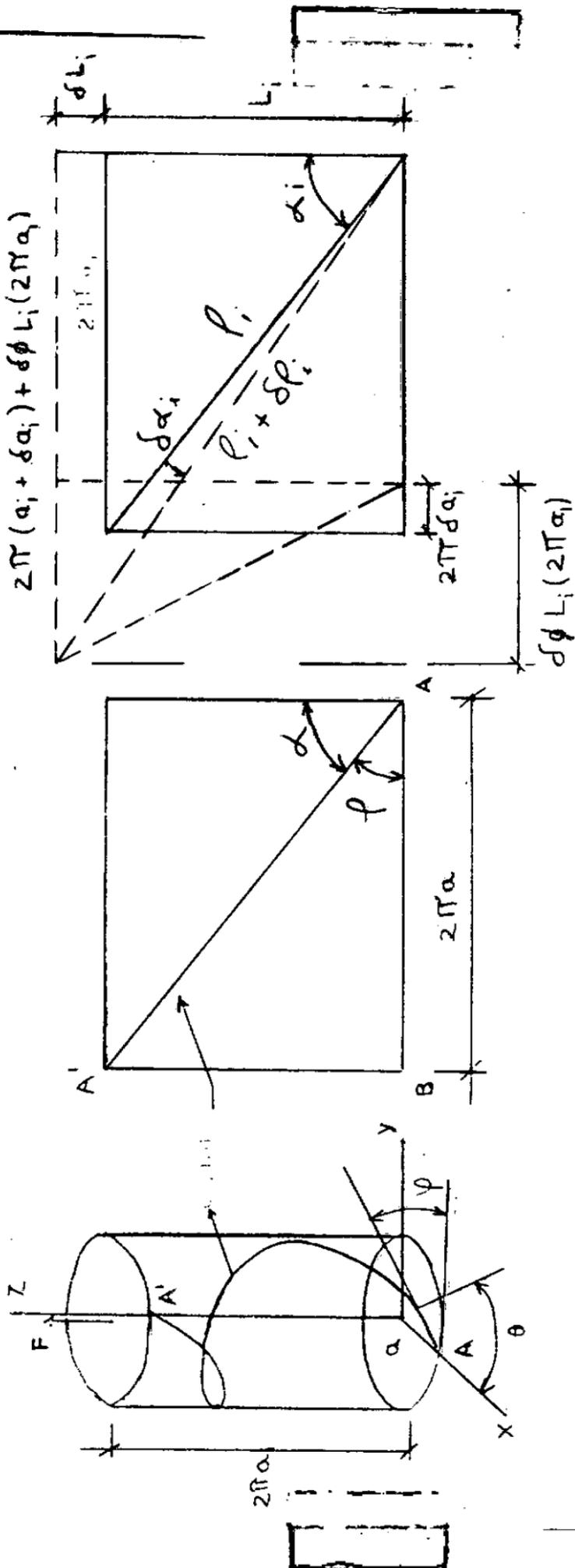
A (fig 11(c)) ilustra a situação deformada de uma das n espiras de uma camada i ,quando uma pequena deformação axial (δL) é imposta no riser.Observa-se que são levadas em conta tanto a variação de raio (δa) da hélice ,quanto a deformação por torção ($\delta \phi$).Sendo (l) o comprimento total de um passo de espira ,por relação trigonométrica obtemos a seguinte expressão :

$$(l + \delta l)^2 = (L + \delta L)^2 + [2\pi(a - \delta a) + L.\delta \phi.a]^2 \quad (\text{II.1})$$

Após manipulação algébrica e desprezando os termos de segunda ordem , a deformação axial de uma espira ,devido a um alongamento e torção causado pela componente axial das forças atuantes,pode ser re-escrita como :

$$\epsilon_t = \epsilon_z \cdot \cos^2(\alpha) + \epsilon_y \cdot \sin^2(\alpha) + 1/2 \cdot a \cdot \delta \phi \cdot \sin(2\alpha) \quad (\text{II.2})$$

onde ; $\epsilon_z = \delta L / L$;
 $\epsilon_y = \delta a / a$;



Figuras 11 (a), (b) e (c) : Planificação de uma espira

(A) Configuração helicoidal

(B) Espira planificada

(C) Espira deformada

Esta mesma expressão pode ser obtida em função da matriz de deformações globais do tubo ,onde a direção Z é paralela ao eixo do tubo e a direção t ,ao eixo da seção transversal da armadura de configuração helicoidal:

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_z & \varepsilon_{zy} & 0 \\ & \varepsilon_y & 0 \\ \text{sim} & & \varepsilon_x \\ & & & \end{bmatrix}$$

onde ,

$$\varepsilon_z = \delta L/L \quad ; \quad \varepsilon_y = \delta a/a \quad ; \quad \varepsilon_x = \delta e/e \cong 0 \quad ;$$

$$\varepsilon_{zy} = 1/2 \cdot a \cdot \delta \phi$$

A transformação dessas deformações das coordenadas globais (X,Y,Z) para as coordenadas locais (n,b,t) é dada pela seguinte matriz de rotação :

$$\underline{\underline{R}} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\text{sen}(\alpha) & 0 \\ \text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Com a transformação

$$\underline{\underline{\bar{\varepsilon}}} = \underline{\underline{R}}^T \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} \cdot \underline{\underline{R}} \quad (\text{II.3})$$

chega-se á matriz de deformações em uma camada i de

armaduras no sistema de referência local onde t é paralelo ao eixo da espira :

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_t & \epsilon_{tb} & 0 \\ \text{sim} & \epsilon_b & 0 \\ \sim & & 0 \end{bmatrix}$$

temos então,

$$\epsilon_t = \epsilon_z \cos^2(\alpha) + \epsilon_y \sin^2(\alpha) + a \cdot \delta\phi \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)$$

$$\epsilon_{tb} = \delta\alpha = (\epsilon_y - \epsilon_z) \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) + 1/2 a \delta\phi \cdot \cos(2\alpha)$$

$$\epsilon_b = \delta j / j = \epsilon_z \sin^2(\alpha) + \epsilon_y \cos^2(\alpha) - a \delta\phi \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)$$

II.5.2 Distribuição de tensões numa camada de armadura

a) Tensão axial na armadura:

$$\sigma_t = E \cdot \epsilon_t \quad (\text{II.4})$$

onde E é o módulo de elasticidade do aço.

b) Tensão cisalhante no elastômero:

$$\tau_L = G_m \cdot \delta\alpha \quad (\text{II.5})$$

Onde G_m é o módulo de elasticidade transversal do

elastômero confinado entre as armaduras de uma mesma camada
 1. No caso de tubos "Unbonded" não existe elastômero, podendo
 portanto as armaduras deslizar livremente, ou seja; $\tau_L = 0$.

c) Tensão transversal de compressão do elastômero entre
 espiras de armaduras de uma mesma camada:

$$\sigma_b = \varepsilon_b \cdot E_m \cong 0 \quad (\text{II.5a})$$

II.6 Relação tensão-deformação nas camadas plásticas

Considerando as camadas plásticas como sendo tubos de
 parede delgada teremos:

a) Tensão axial

$$\sigma_z = \sigma_L = E_c / (1 - \nu_c^2) \cdot (\varepsilon_z + \nu_c \cdot \varepsilon_y) \quad (\text{II.6})$$

onde, (E_c) é o módulo de elasticidade do material plástico e
 (ν_c) é o seu coeficiente de Poisson.

b) Tensão circunferencial

$$\sigma_y = \sigma_\theta = E_c / (1 - \nu_c^2) \cdot (\varepsilon_y + \nu_c \cdot \varepsilon_z) \quad (\text{II.7})$$

Para o caso específico de tubos do tipo "Bonded", onde
 as camadas de elastômero são reforçadas com fibras de
 material plástico embebidas no mesmo, teremos uma camada com
 comportamento ortotrópico. Não foi possível ainda, discretizar

uma matriz constitutiva ortotrópica para este tipo de camadas ,devido á complicada distribuição de tensões no mesmo, mas para uma aproximação inicial,e considerando que as mesmas quase não contribuem na resistência mecânica do tubo,podemos utilizar matrizes constitutivas ortotrópicas derivadas de modelos de análise de esforços das indústrias de materiais compostos convencionais,como pneus de automóveis.Outra variante de análise,seria considerar um módulo de elasticidade longitudinal equivalente ($E_c=E_m$)do elastômero composto -obtido com ajuda de resultados experimentais,e simplificar a relação tensão-deformação utilizando as expressões do modelo "Unbonded" dadas anteriormente.

Básicamente são estes dois tipos de aproximação que definem o modelo ortotrópico de análise ,e o isotrópico,utilizados na maioria dos programas conhecidos de análise de risers flexíveis "Bonded".No programa "TUBFLEX" utilizamos a aproximação isotrópica,unificando a análise ,onde a diferença fundamental entre ambos tipos de tubos flexíveis está nas tensões cisalhantes que devem ser consideradas no equilíbrio de forças para o caso "Bonded".

II.7 Equações de equilíbrio de forças

A- EQUILÍBRIO NA DIREÇÃO AXIAL

O equilíbrio de forças axiais atuando em uma seção transversal do riser flexível é dada por :

$$\sum_{i=1}^M \sigma_{L_i} \cdot A_{C_i} + \sum_{i=1}^N n_i \cdot \cos(\alpha_i) \cdot [A_i \cdot \sigma_{t_i} + e_i l_i \tau_{L_i}] = F_R \quad (\text{II.8})$$

onde :

$$F_R = F + \pi(P_{INT} \cdot a_{INT}^2 - P_{EXT} \cdot a_{EXT}^2)$$

$$\tau_{L_i} = 0 \quad (\text{UNBONDED})$$

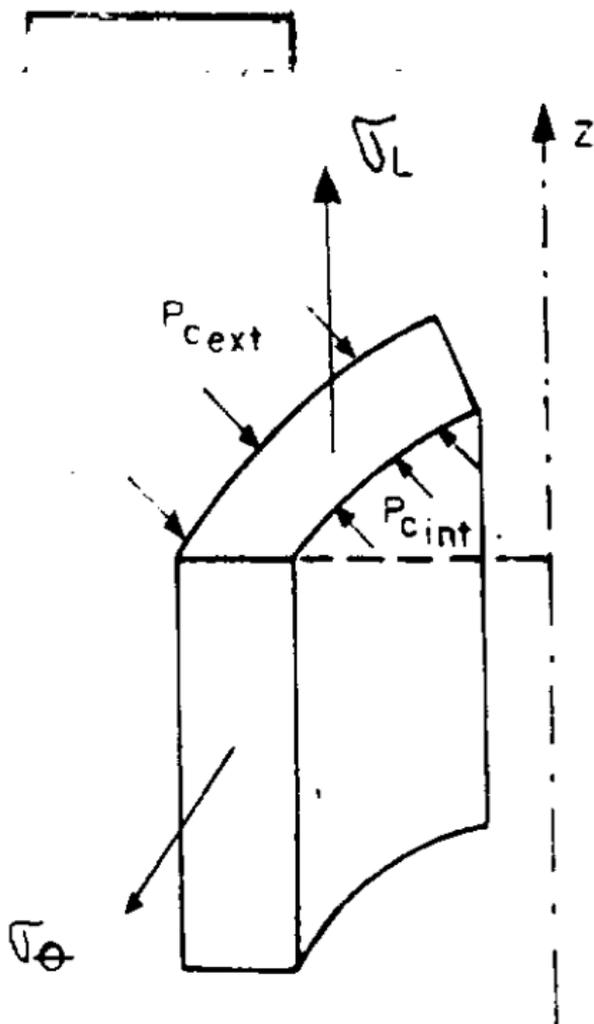
$$\tau_{L_i} = G_m \cdot \delta\alpha \quad (\text{BONDED})$$

B- EQUILÍBRIO NA DIREÇÃO RADIAL

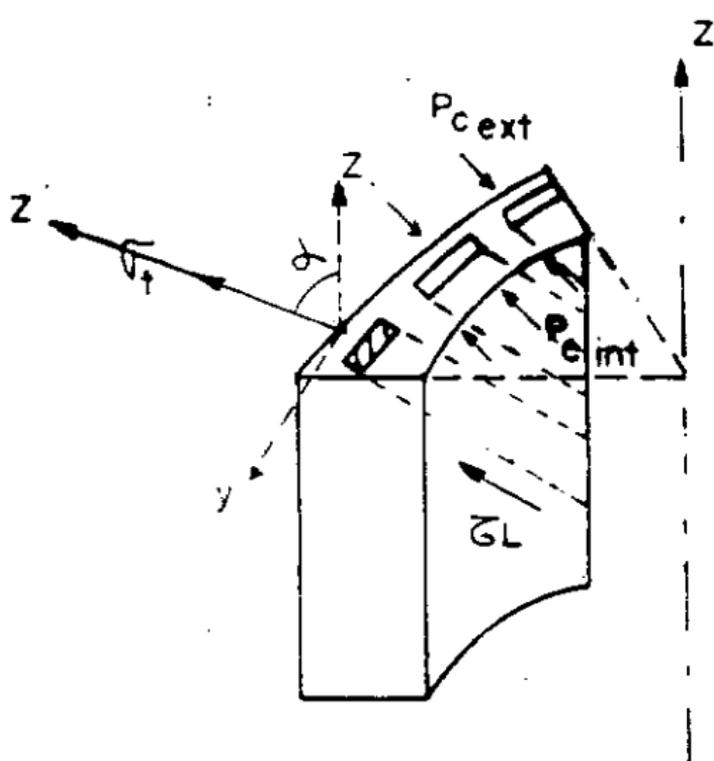
As tensões circunferenciais das camadas equilibram o diferencial de pressões ($\Delta P_{ci} = P_{ci_{INT}} - P_{ci_{EXT}}$) (fig 12). Teremos então para cada camada i :

$$\left[\begin{array}{l} n_i/a_i \cdot [\sigma_{t_i} \cdot A_i \cdot \text{sen}(\alpha_i)/L_i + \tau_{L_i} \cdot e_i \cdot \tan(\alpha_i)] = \Delta P_{ci} \quad (\text{aço}) \\ \sigma_{y_i} \cdot e_i/a_i = \Delta P_{ci} \quad (\text{Camadas plásticas}) \end{array} \right. \quad (\text{II.9})$$

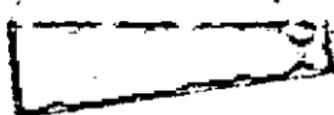
Nas figuras 12 (a) e (b) observamos o equilíbrio de forças internas e externas na direção radial referente às camadas plásticas e às camadas de armaduras :



(a) Equilíbrio radial na camada plástica



(b) Equilíbrio radial na camada de armadura



Figuras 12(a) e (b) : Equilíbrio Radial

C- EQUILÍBRIO Á TORÇÃO

O torque devido a ação da força axial resultante na espira de uma camada i de armadura é dado por ,

$$(\bar{m}_z^F)_i = (\sigma_{t_i} A_i \text{sen}(\alpha_i)) \cdot a_i \quad (\text{II.10})$$

Por outro lado, se o ângulo de torção por unidade de comprimento, devido a ação de um momento (T) axial é $(\delta\phi)$, a rotação por unidade de comprimento de uma espira em torno do seu proprio eixo é $(\delta\phi \cdot \cos(\alpha_i))$ (ver fig 13)

Assim, o torque devido á rotação de cada espira em torno do eixo Z do riser é :

$$(\bar{m}_z^M)_i = (J_i \cdot G_i) \cos(\alpha_i) \cdot (\delta\phi \cdot \cos(\alpha_i)) = J_i G_i \delta\phi \cdot \cos^2(\alpha_i) \quad (\text{II.11})$$

onde, (G_i) é o módulo elástico de cisalhamento do material da espira e (J_i) é o momento de inércia polar para a seção transversal das espiras correspondentes a camada i .

O torque devido á ação do momento torsor axial (T) em uma camada plástica é dado por :

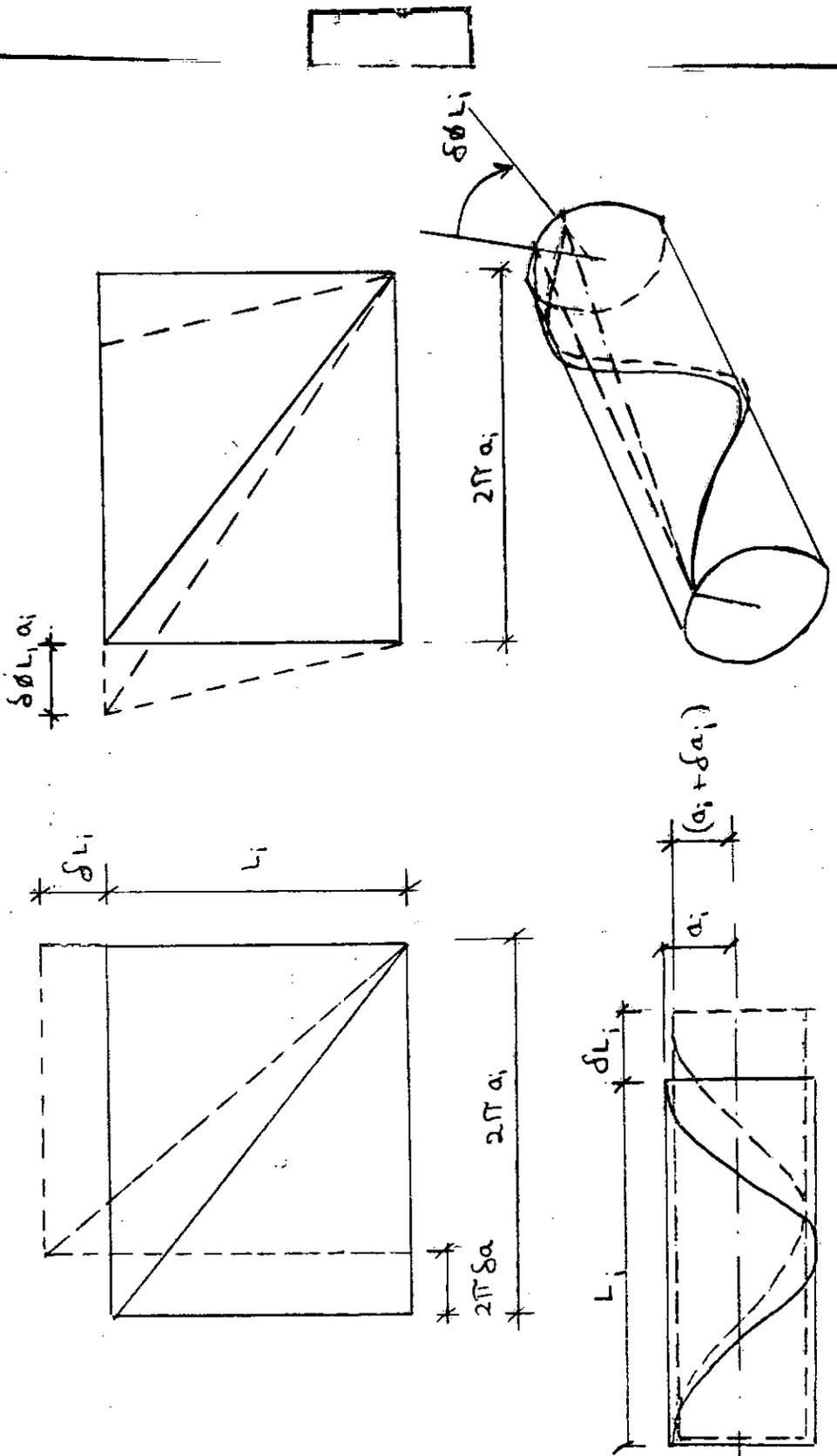
$$(\bar{m}_z^T)_i = \int_A (\tau_z a_i) \cdot dA_i = (J_{c_i} \cdot G_{c_i}) \cdot \delta\phi \quad (\text{II.12})$$

Onde, τ_{z_i} é a tensão de cisalhamento [ver fig ..], e (J_{c_i}) e (G_{c_i}) são respectivamente, o módulo elástico de cisalhamento e o momento de inercia polar das camadas plásticas.

Somando as contribuições para o torque devido aos diversos componentes do riser ,o equilíbrio de momentos de torção é dado por :

$$T = \sum_{i=1}^M (J_{c_i} G_{c_i}) \delta\phi + \sum_{i=1}^N n_i a_i \sin(\alpha_i) \cdot (A_i \sigma_{t_i} + e_i \cdot l_i \cdot \tau_{L_i}) + \sum_{i=1}^N \{n_i J_i G_i \cdot \cos^2(\alpha_i)\} \cdot \delta\phi \quad (\text{II.13})$$

Enfatiza-se aqui que a rigidez á torção dada pela expressão acima ,não leva em conta a variação de rigidez da seção devido á ação de uma força axial de tração (F).



TORSIONAL

LONGITUDINAL + RADIAL

Figuras 13(a) e (b) : Equilíbrio a torção

II.8 Equações de compatibilidade de deformações nas interfaces

Sendo o alongamento (δL) axial do tubo e a rotação ($\delta\phi$) constantes ao longo da seção de um tubo flexível, fornecemos a seguir a equação de compatibilidade na terceira direção (radial). Observamos que as interfaces de duas camadas adjacentes, tem a mesma deformação radial, por tanto podemos supor que na interface da camada (i) com a camada (i+1), a seguinte equação define a compatibilidade de deformações :

$$(\delta a_{i+1} + a_{i+1}) - (\delta a_i + a_i) = (e_i + \delta e_i) + (e_{i+1} + \delta e_{i+1})$$

(II.14)

II.9 Atrito entre camadas

Nos tubos flexíveis do tipo "Bonded" não existe o problema de atrito entre os diversos componentes de aço devido ao elastômero, que ocupa os vazios entre as armaduras de uma mesma camada, e das camadas plásticas intermediárias, que evitam o contato direto de duas camadas adjacentes de aço.

Para o caso específico de tubos "Unbonded" onde as diversas camadas, tanto de aço como de polímeros podem deslizar entre si, aparece uma força de atrito interno proporcional á pressão de contato entre duas camadas adjacentes qualquer. Esta força de atrito torna-se significativa em tubulações submetidas à flexão ou ação de

pressões interna ou externa, restringindo o deslizamento das espiras, induzindo tensões residuais de tração ou compressão. Estas tensões residuais são dadas por :

$$\sigma_{T_1} = \mu_1 \cdot P_{c_1} \cdot (a_1 + e_1/2) \cdot (\pi/2) \cdot 1 / (2b_1 \sin(\alpha_1)) \quad (\text{II.15})$$

onde, (μ_1) é o coeficiente de atrito entre a camada i de armadura e a camada $i+1$, sobre a ação de uma pressão de contato resultante (P_{c_1}) na sua interface.

II.10 Comportamento das armaduras submetidas à esforços de Flexão

Uma tubulação flexível tem como principal característica permitir ,durante seu manuseio, e durante a sua vida útil em operação, grandes variações de curvatura, as quais ocasionam momentos de flexão que, devido á estrutura interna da tubulação, são em geral de pequena magnitude quando comparados com risers do tipo "Rígido". As tensões que são induzidas nas armaduras dependem do raio de curvatura (R) , do raio interno da camada de armadura (a_1) , e da posição circunferencial θ da seção transversal considerada.

A essas tensões induzidas por flexão se somam ás tensões induzidas por atrito nos tubos "unbonded" e as tensões cisalhantes resultantes no elastômero confinado na caso "bonded".

Durante o processo de deformação por flexão, diversos mecanismos ocorrem e dentre os mais relevantes pode-se citar

:

- Deslizamento entre as camadas do tubo "unbonded"
- Novo posicionamento ou rearranjo de configuração das armaduras helicoidais, resultando numa mudança do ângulo de assentamento (α), que passa a ser varável ao longo da circunferência e do comprimento curvo da tubulação.
- Mudanças de curvatura e ângulo de torção dessas armaduras hélicas, causando variações de tensões.
- Com o acréscimo continuado de deformação por flexão, que provoca variação do ângulo (α), as armaduras de seção cheia de uma mesma camada chegam a se superpor uma com a outra. Nessa situação, surgem tensões elevadas, de contato ou longitudinais nas armaduras, principalmente com a combinação do efeito de flexão e cargas axissimétricas. Nos casos "Bonded" surgem também elevadas tensões cisalhantes no elastômero confinado, que podem comprometer a aderência do mesmo com as espiras de aço.

Cada um desses mecanismos levam, isoladamente, a tubulação flexível a uma situação indesejável que pode provocar fenômenos tais como desgaste, fadiga ou colapso dos componentes da sua estrutura interna. Por isso, as consequências desses mecanismos, juntamente com aqueles ocasionados por carregamentos axissimétricos, se constituem fatores de projeto, que devem ser verificados para a avaliação da segurança e da vida útil da tubulação.

II.10.1 Equação integral da flexão

Durante o processo estático ou dinâmico por flexão, as diversas camadas que constituem a estrutura interna da tubulação, deslizam entre si. Se o comportamento é dinâmico, e se a tubulação está sob diferencial de pressão, a variação de tensões provoca fadiga das armaduras, e o atrito interno, o desgaste das superfícies de contato dessas camadas.

Num espaço R^3 uma superfície de tubo fletido, é função de dois parâmetros independentes (ϕ) e (θ) , conforme ilustrado na (fig 2.14), sendo uma curva sobre essa superfície definida por uma relação entre esses dois parâmetros. A curva ilustrada na figura, corresponde a um trecho de armadura hélica sobre a superfície de um tubo de seção circular fletido. Sob a ação do carregamento imposto, as armaduras são tensionadas e se comportam elasticamente, mostrando uma tendência de se rearranjarem na forma de linhas geodésicas sobre a superfície do tubo. Por geodésica entende-se a linha de menor comprimento entre dois pontos sobre uma superfície. Definimos esta geodésica através da geometria diferencial, onde a normal principal é coincidente com a normal á superfície em todo ponto da curva. Chegamos assim, a seguinte equação integral :

$$\phi = C \cdot a \int \frac{d\theta}{(R + a \cdot \cos(\theta)) \cdot [(R + a \cdot \cos(\theta))]^{1/2}} + C1 \quad (II.16)$$

onde C representa a configuração helicoidal da armadura que define uma relação entre os parâmetros (ϕ) e (θ) .

A constante C_1 é calculada em função das condições de deslizamento das armaduras, pois elas deslizam livremente no caso "Unbonded", contrariamente aos tubos "bonded" onde o elastômero confinado acompanha o deslizamento das espiras de uma mesma camada de armadura. A figura 2.15 mostra o mecanismo de deslizamento entre as armaduras durante a flexão.

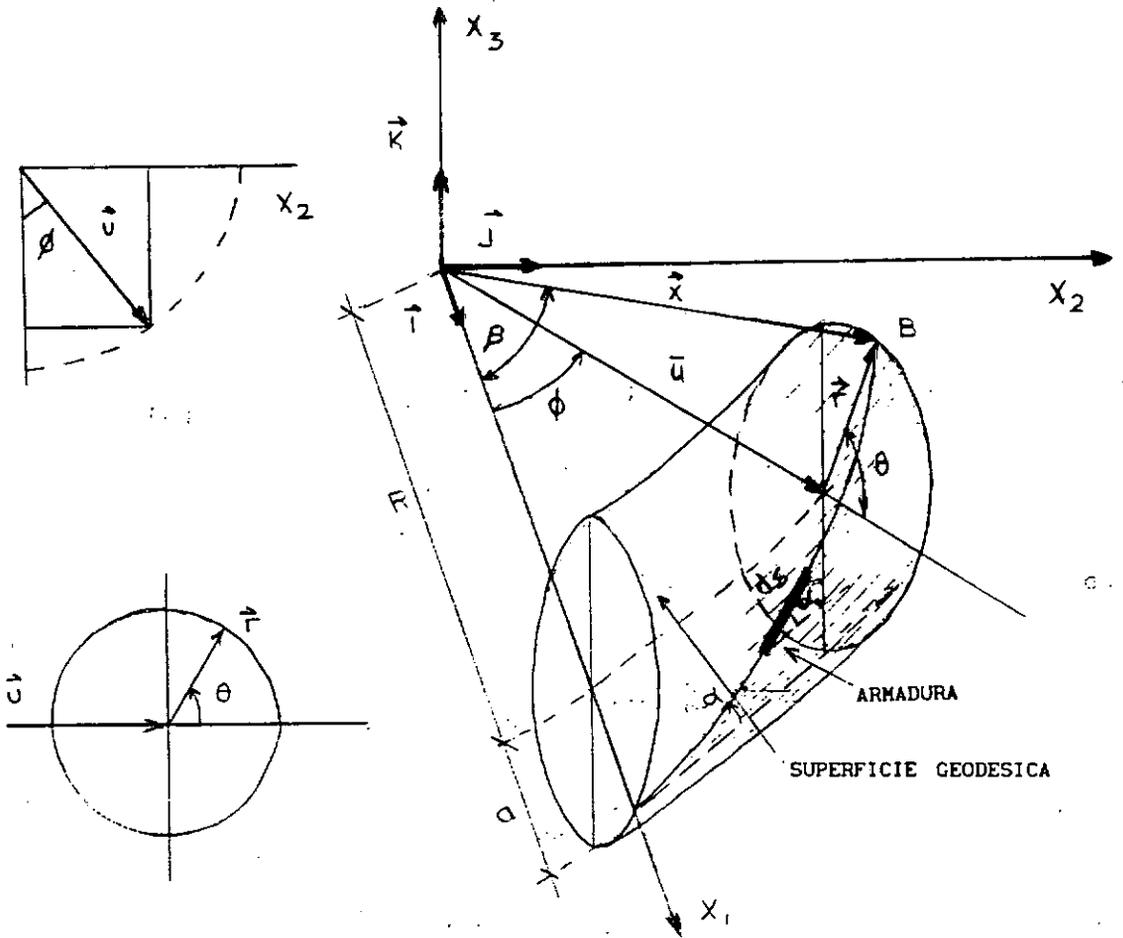
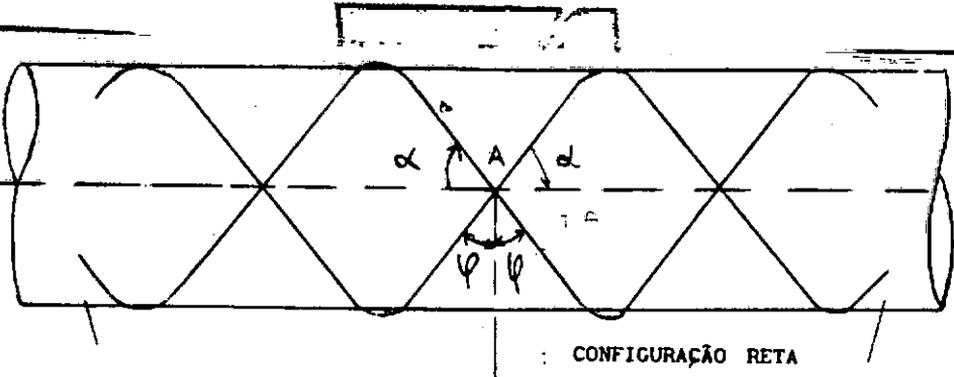
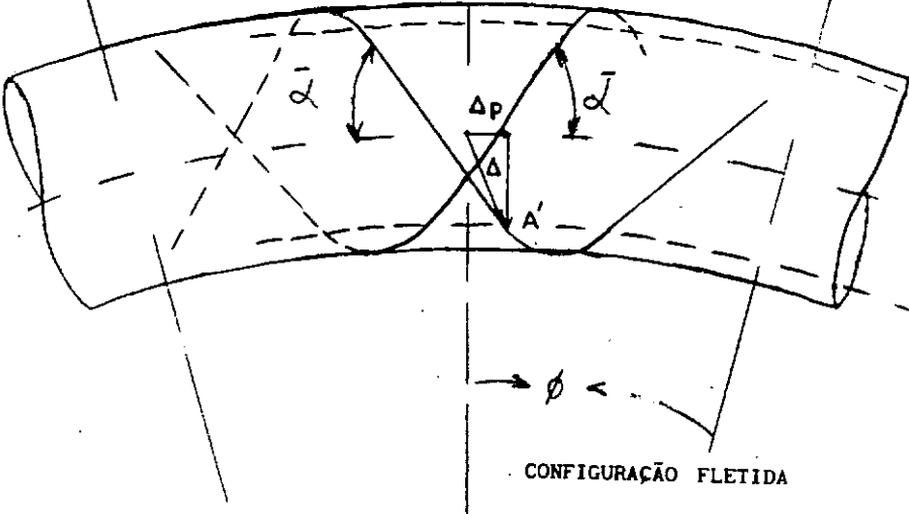


Figura 2.14 : Armadura helicoidal na flexão

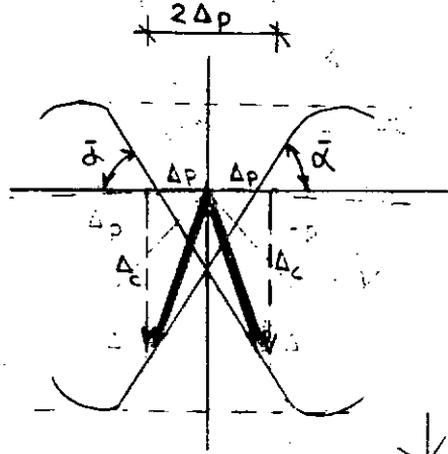


CONFIGURAÇÃO RETA



CONFIGURAÇÃO FLETIDA

DESLIZAMENTO Δ



COMPONENTES DE Δ

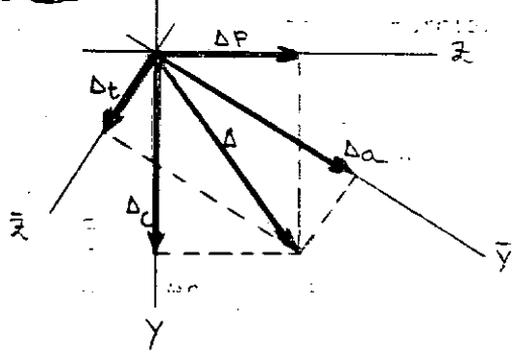


Figura 2.15 : Deslizamentos nas camadas de armaduras

II.10.2 Tensões induzidas por flexão em tubos
"UNBONDED"

Em função dos deslizamentos (Δ) obtidos com a equação integral (II.16), calculamos as tensões nas camadas de armadura, sendo que a camada crítica será a primeira camada de armadura de pressão :

a) Tensão normal na armadura devido à flexão pura (fig 2.16) :

$$\sigma_{N_i} = \sigma_{t_i} \Big|_{\xi = \pm e/2} = \pm E_1 (e/2) \cdot \delta(CN) \quad (II.17)$$

onde (δCN) é a variação de curvatura normal:

$$\delta CN = (\cos^2(\alpha)/R) \cdot [\text{SEN}(\theta) / (1 + \frac{a}{R} \cos(\theta))] \quad (II.18)$$

Observamos com o auxílio da (fig 2.16) que a variação de curvatura normal é mais forte na região de maior deslizamento, ou seja ($\theta = \pi/2$ e $\theta = 3\pi/2$)

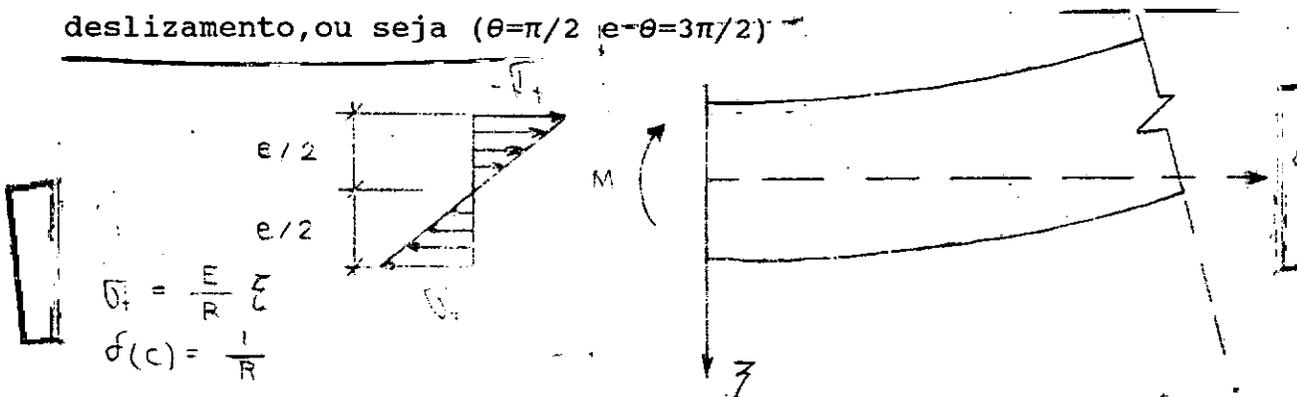


Figura 2.16 : Tensões nas armaduras devido a flexão

b) Tensão cisalhante (τ_1)

A variação de torção das armaduras, provocada por mudança de configuração durante a flexão, induz a seguinte tensão cisalhante nas mesmas :

$$\tau_1 = - \left(\frac{1}{4\pi^2} \right) \cdot \left(\frac{G \cdot b_1}{R \cdot \text{TAN}(\alpha)} \right) \cdot \left(\frac{\cos(\theta)}{1 + (a/R) \cos(\theta)} \right) \quad (\text{II.19})$$

c) Raio de curvatura mínimo para evitar o contato lateral entre armaduras de uma mesma camada :

$$R < \frac{b_1 a_1}{e_1 \text{SEN}^2(\alpha_1)} \quad (\text{II.20})$$

II.10.3 Flexão nos tubos "Bonded"

A flexão em tubos bonded torna-se importante na verificação de estado limite do mesmo quando combinado com cargas axissimétricas, principalmente nas camadas de armaduras de pressão de seção "retangular" ou "intertravadas", pois as tensões cisalhantes no elastômero confinado tendem comprometer a aderência do aço, podendo em condições extremas provocar uma superposição de espiras de uma mesma camada. Embora a determinação das tensões neste tipo de tubos seja obtida da equação II.16, não existe ainda um modelo específico, pois para o caso "Bonded" torna-se muito difícil a sua resolução, devido ao elastômero confinado que enrijece o tubo à flexão.

2.7.4.4 Rigidez à flexão

Assumindo que as armaduras com -hélicas se comportem análogamente a um cabo de os de aço ,enrolados,pode-se escrever que a rigidez à flexão de um tubo flexível é aproximadamente :

$$(EI)^* = \sum_{i=1}^M E_{c_i} I_{c_i} + \sum_{i=1}^N E_i n_i b_i e_i \cos(\alpha_i) \frac{b_i^2 + e_i^2}{2(2 + \nu \sin(\alpha_i))} \quad (II.21)$$

II.10.4 Conclusões do modelo resultante de Flexão

Os desenvolvimentos teóricos apresentados nos itens anteriores desta seção,se limitam a aproximações válidas para uma configuração de um trecho da tubulação fletida na forma de uma toro circular.Mesmo para essa configuração,em um certo plano e com curvatura constante,a determinação da geodésica apresenta grandes dificuldades,principalmente no que se refere a integração exata da equação II.16.

As expressões apresentadas para deslizamentos,mudanças de curvatura e torção ao longo das armaduras e tensões geradas nas seções transversais das marmas,devido ao mecanismo global de flexão proposto,são válidas apenas para trechos intermediários afastados dos extremos de tubos de grande comprimento,com grande raio de curvatura,i.e.,(R/a > 10).

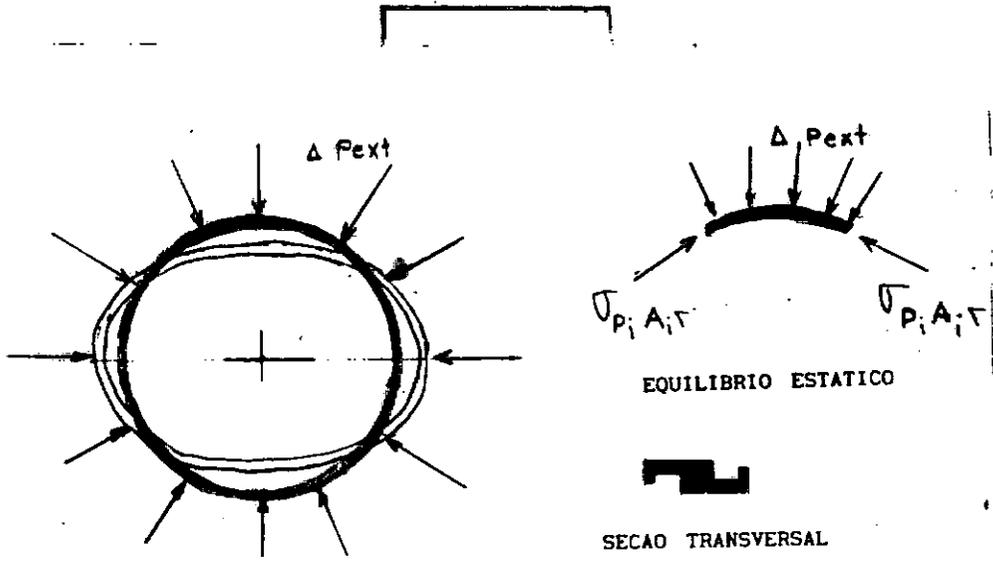
II.11 Verificação de tensões admissíveis e de colapso

Pode-se destacar as seguintes situações típicas de verificação da resistência mecânica do tubo sob ação de cargas combinadas:

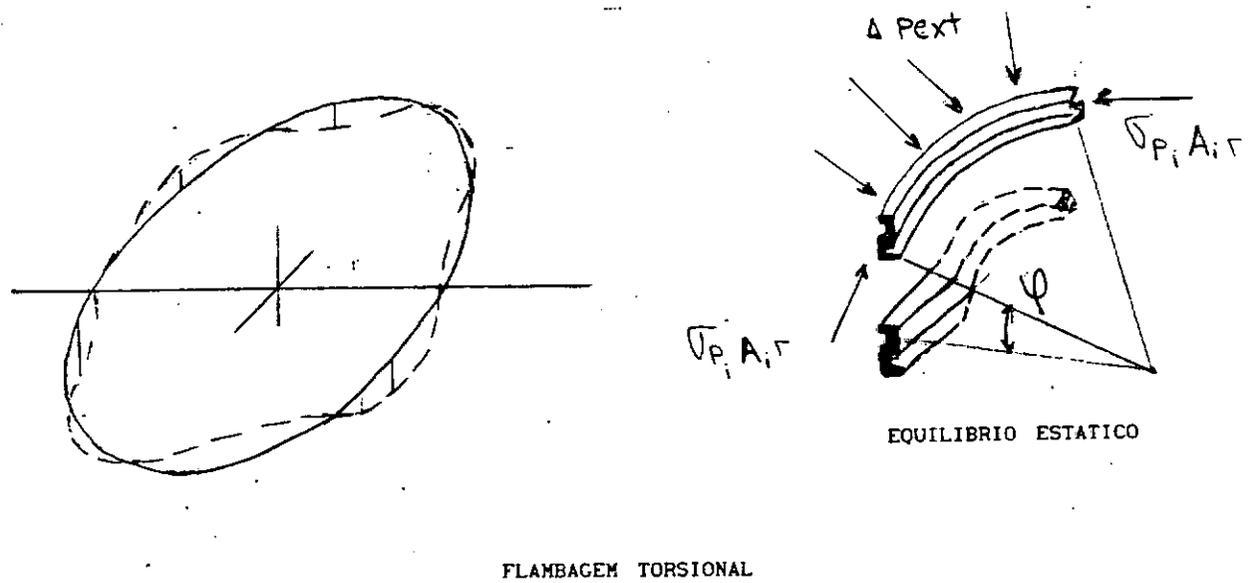
- Colapso por diferencial de pressão interna (para seções em pequena profundidade)
- Colapso por diferencial de pressão externa (para seções em grande profundidade)
- Colapso por esforços excessivos de tração axial e torção.

Essas verificações de colapso são feitas com base nos valores máximos de tensões nas armaduras nas seções onde ocorrem as situações mais desfavoráveis de combinação de esforços.

O modo característico de colapso do tubo é o colapso da armadura de pressão, devido à tração excessiva ou à pressão hidrostática atuante. Devido à grande esbeltez das armaduras de pressão ($\alpha \cong 90^\circ$), o colapso sob pressão externa de contato uniforme nesta camada ocorre : (i) na forma análoga à flambagem de um anel circular em seu próprio plano médio; (ii) na forma análoga à flambagem torsional de um anel circular com seção transversal do tipo aberta (fig 2.17 (a) e (b)):



FLAMBAGEM NO PLANO



FLAMBAGEM TORSIONAL

Figuras 2.17 (a) e (b) : Colapso da armadura de pressao

Para se evitar estes tipos de colapso, a tensão resultante ($\sigma_p = \sigma_t$) na direção do eixo da armadura de pressão deve satisfazer simultaneamente as seguintes desigualdades :

$$\sigma_p \leq \begin{cases} \lambda E_1 I_{x_1} \text{SEN}^6(\alpha_1) / (b_1 a_1^4) & \text{(FLEXÃO)} \\ \frac{E_1 I_{y_1} \text{SEN}^6(\alpha_1)}{b_1 a_1^4} \left(\frac{9}{4 + E_1 I_{y_1} / G_1 J_1} \right) & \text{(TORSIONAL)} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{(II.22a)} \\ \text{(II.22b)} \end{matrix}$$

onde, além dos parâmetros já definidos anteriormente (vide notação) aparecem as seguintes propriedades da seção transversal da armadura de pressão :

I_{x_1} , momento de inércia à flexão radial

I_{y_1} , momento de inércia à flexão transversal

$\lambda = (0.85K^2 - 1) \longrightarrow \{ 2 \leq K \leq 4 \}$

O coeficiente (λ) considera o comportamento da espira próxima ao anel ($K=2$) e o enrijecimento da armadura de pressão com as camadas mais externas. Para os tubos da COFLEXIP e da DUNLOP o modo de flambagem de projeto é o da flexão radial enquanto que em tubos da PAG-O-FLEX o modo de flambagem varia em função da carga predominante, i.e., se a carga for de tração ocorre a flambagem torsional, caso contrário o modo de flambagem costuma ser o de flexão radial. O valor da constante (K) para calcular a tensão de

colapso varia de produto para produto. Para um valor de $K=3$ por exemplo, obteve-se valores próximos aos fornecidos pelos fabricantes no caso de produtos da COFLEXIP e da DUNLOP. Isto se deve a que ambos utilizam a carcaça intertravada como armadura básica de pressão.

II.12 Algoritmo resultante de solução

Em função das equações de equilíbrio de forças e as de compatibilidade de deformações radiais montamos uma matriz $[K]$ de propriedades físicas e geométricas do tubo que relacionam o vetor $\{X\}$ de deformações globais do tubo com o vetor $\{Y\}$ de carregamentos externos axissimétricos no seguinte sistema de $(2k+1)$ equações com $(2k+1)$ incógnitas, a ser resolvido simultaneamente pelo método de GAUSS-JORDAN :

$$[K] \cdot \{X\} = \{Y\} \quad (\text{II.23})$$

onde,

$$K = \begin{cases} N+M & (\text{Tubos "unbonded"}) \\ N & (\text{Tubos "bonded"}) \end{cases}$$

$$\tilde{X} = \{ \delta L, \delta a_1 \dots \delta a_k, \delta \phi, P_{c_1} \dots P_{c_{k-1}} \}_{2k+1}$$

$$\tilde{Y} = \{ F, 0 \dots 0, T, P_{int} \dots P_{ext} \}_{2k+1}$$

O vetor $\{X\}$ de incógnitas básicas é utilizado a seguir para calcular as tensões e deformações resultantes em cada

camada, devido ao efeito de combinação dos carregamentos axissimétricos F, T, P_{INT} e P_{EXT} . As tensões resultantes devido à curvatura imposta de flexão são calculadas e superpostas com as obtidas na análise axissimétrica para a posterior verificação de estado limite de utilização do tubo.

II.12.1 Resumo das equações apresentadas

A seguir apresentamos um resumo das $(\kappa+2)$ equações de equilíbrio de forças nas camadas e as $(\kappa-1)$ equações de compatibilidade de deformações radiais. O equilíbrio de forças internas das diferentes camadas e as forças externas atuantes, é dado pela seguinte relação:

$$\tilde{R}_t(\sigma_t; \alpha) + \tilde{R}_c(\sigma_L; \sigma_\theta) + \tilde{R}_b(P_{c_i}; \tau_L) = \tilde{R}_{ext}$$

onde,

\tilde{R}_t , é a contribuição das armaduras de aço em função da sua tensão axial (σ_t) é o seu ângulo de assentamento (α) .

\tilde{R}_c , é a pequena contribuição das tensões axiais nas camadas plásticas, que no caso "Bonded", são desprezadas devido ao baixo módulo de elasticidade do elastômero em comparação ao do aço.

\tilde{R}_b , é a contribuição das forças internas que

impedem o livre deslizamento das espiras de uma mesma camada de armaduras : No caso "Unbonded" são as forças de atrito que dependem da pressão de contato (P_c) atuante. No caso "Bonded" são as forças resultantes das tensões de cisalhamento no elastômero confinado entre as espiras.

R_{ext} , é a combinação resultante de esforços axissimétricos atuantes na seção a ser analisada.

Temos então :

a) EQUILÍBRIO AXIAL (1 Equação) ;

$$\boxed{R_{s,z} + R_{c,z} + R_{b,z} = R_{ext,z}} \quad (II.24)$$

$$R_{s,z} = \sum_{i=1}^N n_i A_i \sigma_{t_i} \cos(\alpha_i)$$

$$R_{c,z} = \sum_{i=1}^M \sigma_{L_i} A_{c_i}$$

$$R_{b,z} = \begin{cases} \sum_{i=2}^N \mu_i P_{c_i} (a_i - e_i/2) \cdot \text{TAN}(\alpha_i) & (\text{unbonded}) \\ \sum_{i=1}^N n_i \tau_{L_i} e_i l_i \cdot \text{COS}(\alpha_i) & (\text{bonded}) \end{cases}$$

b) 1 EQUILÍBRIO A TORÇÃO (1 equação)

$$\boxed{R_{s,\phi} + R_{c,\phi} + R_{b,\phi} = R_{ext,\phi}} \quad (II.25)$$

$$R_{s,\phi} = \sum_{i=1}^N n_i \sigma_{t_i} A_i a_i \text{sen}(\alpha_i) + n_i J_i G_i \cos^2(\alpha_i) \delta\phi$$

$$R_{c,\phi} = \begin{cases} \sum_{i=1}^M G_{c_i} J_{c_i} \delta\phi & \text{(unbonded)} \\ G_m \cdot J_m \cdot V_m \delta\phi & \text{(bonded)} \end{cases}$$

$$R_{b,\phi} = \begin{cases} \sum_{i=1}^M n_i \mu_i P_{c_i} (a_i - e_i) \cdot (2\pi a_i l_i) / b_i & \text{(unbonded)} \\ \sum_{i=1}^N n_i e_i l_i a_i \tau_{L_i} \text{sen}(\alpha_i) & \text{(bonded)} \end{cases}$$

$$R_{ext,\phi} = T$$

c) EQUILÍBRIO RADIAL (κ equações)

$$\boxed{R_{s,y} + R_{c,y} + R_{b,y} = R_{ext,y}} \quad (\text{II.26})$$

$$R_{s,y} = n_1 A_1 \sigma_{t_1} \text{sen}(\alpha_1) / L_1$$

$$R_{c,y} = \sigma_{\theta_1} e_1 / 2$$

$$R_{b,y} = \begin{cases} n_1 \mu_1 P c_1 (a_1 - e_1) \cdot \text{sen}(\alpha_1) & (\text{unbonded}) \\ n_1 \tau_{L_1} e_1 l_1 \text{sen}(\alpha_1) & (\text{bonded}) \end{cases}$$

$$R_{ext,y} = \begin{cases} P_{int} & ; \text{ para } i=1 \\ P_{ext} & ; \text{ para } i=\kappa+1 \\ 0 & \end{cases}$$

d) COMPATIBILIDADE DE DEFORMAÇÕES ($\kappa-1$ Equações)

$$\boxed{(a_{i+1} + \delta a_{i+1}) - (a_i + \delta a_i) = e^*}$$

$$\text{onde, } e^* = \begin{cases} [(e_i + \delta e_i) + (e_{i+1} + \delta e_{i+1})] / 2 & (\text{unbonded}) \\ e_i + \delta e_i & (\text{bonded}) \end{cases}$$

assim, em função das $(2k + 1)$ incógnitas básicas calculamos as restantes com as relações tensão-deformação para cada camada específica.

Capítulo III

Inteligência artificial e suas aplicações

III.1 Introdução

Este capítulo define a terminologia básica usada no desenvolvimento de sistemas especialistas assim como as diferentes técnicas a serem utilizadas ao longo deste trabalho.

Sistemas especialistas (SE) constituem apenas um dos ramos da tecnologia de Inteligência artificial (IA). O objetivo principal da (IA) é fazer com que os computadores sejam capazes de desenvolver atividades consideradas "Inteligentes" , semelhantes as realizadas pelo homem, através da implementação das estratégias de resolução de problemas do ser humano em programas de computador, assim como todo o conhecimento envolvido numa determinada tarefa.

Básicamente podemos dividir a (IA) em quatro grandes grupos de investigação : Sistemas de visão , robótica , processadores de linguagem e sistemas especialistas .

Os chamados **Sistemas de visão** são sistemas programados para reconhecer formas , objetos ou imagens e processar este conjunto de informações de alguma forma específica. A **Robótica** tenta reproduzir os movimentos mecânicos do ser humano na máquina com o objetivo de realizar tarefas de risco ou de considerável esforço físico . Os **Processadores de linguagem** tem como objetivo básico codificar a sintaxe da linguagem com o intuito de fazer com que os computadores

escutem e falem. Já os Sistemas especialistas são programas de computador que codificam o Conhecimento humano de uma determinada área em bases de conhecimento (BC) ,a fim de resolver problemas que normalmente requerem Inteligência .

Dentro de uma equipe de trabalho existe sempre um número restrito de pessoas que são capazes de realizar tarefas que requerem especialização ,ou maior experiência, melhor do que as outras . Estas pessoas recebem o nome de "experts" ou "especialistas" da equipe pois sem o seu aval técnico não é possível resolver o problema.

Estes programas de computador encaram o problema dando a aparência de estar utilizando o conhecimento adquirido pelo especialista ,para interagir com o usuário analisando alternativas de solução, fornecendo explicações coerentes do raciocínio adotado, que ajudam o resto da equipe a executar tarefas que precisam do "know how" do especialista. Se este objetivo é alcançado com programas desenvolvidos em linguagens tais como PASCAL, FORTRAN, COBOL, C, etc , então os mesmos podem ser chamados de (SE) .

A construção de (SE); desde sua concepção até refinamento e testes, recebe o nome de Engenharia do Conhecimento. O estudo das técnicas utilizadas em cada uma das etapas de desenvolvimento dos sistemas é tópico de interesse dos analistas de sistemas especializados em (IA). Nós, engenheiros nos preocuparemos apenas em apreender os conceitos básicos e as técnicas utilizadas na implementação de bases de conhecimento nos diversos pacotes comerciais existentes, com o objetivo de executar tarefas referentes aos (EC) sempre que for preciso. Na maioria dos casos o nome

Sistemas Especialistas cria uma certa desconfiança, natural, entre os especialistas, os quais consideram que o desenvolvimento de um projeto de (SE) os tornará no futuro prescindível dentro da empresa, além de muitos considerarem o tópico complexo e fora da realidade.

Isto aconteceu também com outra área da (IA) no início dos anos 80, a robótica, onde a idéia da sua utilização comercial nas indústrias, principalmente de automóveis, não foi bem recebida pelos operários, com medo de perder o emprego para o computador!!!. Na verdade o que aconteceu foi que os mesmos passaram a executar tarefas menos cansativas, diminuindo consideravelmente o número de acidentes de trabalho, focalizando o monitoramento dos Robots. Hoje em dia, os mesmos operários se recusam a realizar tarefas que possam ser executadas com maior rapidez, precisão e segurança pelos respectivos "Robots"

Da mesma forma, (SE) não foram produzidos com o objetivo de suplantarem a computação convencional, o seu aproveitamento não representa uma revolução e sim uma evolução da informática, pois permite a combinação das decisões "qualitativas" dos especialistas com os resultados "quantitativos", obtidos com a programação convencional.

No Brasil, principalmente na área de engenharia, as empresas não tem ainda noção do potencial que os (SE) representam em termos de produtividade e organização. A falta de informação bibliográfica e de exemplos de aplicação no país se deve á Lei de Informática vigente, que dificulta em muito a importação de softwares de (SE) adequados que possibilitem o seu aproveitamento. Embora a comercialização

de (SE) seja recente (9 anos), o seu aperfeiçoamento ao longo do tempo tem feito com que as mais diversas organizações no mundo inteiro intensifiquem a sua utilização obtendo benefícios econômicos e ou tecnológicos com a sua implantação . Para se ter uma idéia da crescente demanda de (SE) , só o mercado americano cresceu de US\$ 4 milhões em 1981 para US\$ 400 milhões em 1988 ,e a projeção para 1990 é de US\$ 800 milhões .

III.2 Características do conhecimento humano

Bertrand Russel define o conhecimento como sendo:

"Alguma coisa que o ser inteligente possui e utiliza para resolver problemas"

Essa "Coisa" não tem uma definição trivial,mas pode ser interpretada pela análise das particularidades do ser humano no que se refere á aquisição e fixação do conhecimento que define a sua "Especialização". Para simular o comportamento humano ao resolver problemas que exijam inteligência, um bom sistema especialista deve possuir as características básicas utilizadas pelo ser humano durante o processo de aquisição de conhecimento. Definimos as principais :

- **HEURÍSTICA** : Raciocínio intuitivo que o especialista costuma usar para resolver problemas em função da sua experiência.

- **INCERTEZAS** : Além de raciocinar com resultados que sejam verdadeiros ou falsos o ser humano quantifica os resultados incertos com termos tais como "quase igual" ou então "mais

ou menos similar" ,entre outras,que o ajudam a determinar a solução de problemas mal condicionados.

- **DADOS DESCONHECIDOS** : Habilidade do ser humano de trabalhar com dados que ele desconhece,estabelecendo as possíveis alternativas de análise do problema,em função dos mesmos.Este é um dos principais fatores que diferencia um (SE) de programas convencionais.

- **EXPLICAÇÕES** : Habilidade de defender e explicar os procedimentos adotados para resolver problemas .O ser humano tem sempre uma resposta para perguntas do tipo Como? ou Porque? que o ajudam a defender o seu raciocínio.

- **CONCLUSÕES MÚLTIPLAS** : Ao contrário do computador ,que calcula "a resposta" do problema em função de um conjunto pré-determinado de dados , o ser humano tem a habilidade de resolver problemas "mal condicionados", que geralmente carecem de objetivos definidos e cujos resultados são imprevisíveis,i.e.,problemas que apresentem mais de uma resposta válida durante o processo de tomada de decisões .

Este tipo de problema, requer na maioria das vezes uma interação constante entre o especialista e a sua tecnologia , pois em certos casos existe uma enorme dificuldade em diferenciar uma resposta arbitrária da boa ,e a boa da melhor,principalmente em certas áreas de projetos dentro da engenharia,onde os critérios técnicos e econômicos devem atingir um ponto médio na sua convergência.

- **DEDUÇÃO** : Quando trabalhamos com algoritmos na programação convencional , é fácil atingir o resultado esperado pois "dois mais dois é sempre igual a quatro".O ser humano tem a habilidade de trabalhar com problemas do tipo não

procedurais, onde a solução é obtida atando cabos, e selecionando as melhores alternativas de análise, representando o conhecimento em forma de "regras", onde se a premissa for verdade, as conclusões são válidas. Estas regras permitem descartar a parcela de conhecimento que não será utilizada para resolver o problema específico em questão.

III.3 Importância de Sistemas Especialistas.

Porque usar (SE) se a programação convencional vem dando certo há mais de 30 anos?. Porque começar justamente agora?. Um projeto de (SE) é custoso e demorado, será que vale a pena ?.

Este tipo de pergunta , leva às pessoas a por em dúvida as vantagens na utilização de (SE)...

Em primeiro lugar temos que destacar que o domínio de aplicação dos mesmos é totalmente diferente da programação convencional (PC) e deve ser utilizado como um complemento e não um suplemento dos programas já existentes. Na indústria, por exemplo, a (PC) focaliza a automatização de tarefas repetitivas , bem definidas , em algoritmos de uma maneira mais veloz, reduzindo a margem de erros. O objetivo final é o aumento da produtividade e a ferramenta básica é o computador. Um (SE) não foi feito para substituir , por exemplo , vinte contadores e processar a contabilidade da empresa 150 % mais rápido, pois esta é uma tarefa de melhor desempenho com a (PC). Em compensação pode ajudar a corrigir erros teóricos de interpretação do departamento orçamentário

,evitando a confecção de orçamentos mal feitos na apresentação de propostas ou editais que gerem prejuízos financeiros consideráveis. É a ferramenta ideal para ajudar a tomar decisões certas, fornecer diagnósticos precisos e preservar a experiência dos especialistas, tarefas que são difíceis de representar em algoritmos, e que geralmente requerem uma interação constante entre o usuário e o computador ,quando se utiliza a programação convencional.O sucesso na sua utilização depende da escolha certa dos "problemas candidatos".

III.4 Diferenças básicas entre a programação convencional e sistemas especialistas.

A Programação convencional (PC), representada em linguagens conhecidas, tais como COBOL, FORTRAN, BASIC, controla o computador algorítmicamente passo a passo ordenando "O que fazer". Os (SE) utilizam a Programação declarativa ensinando ao computador "O que conhecer" , deixando que o mesmo, estabeleça a sequência de controle do processo, em função do conhecimento adquirido.

Por outro lado na (PC), o programador deve garantir a "Completude" i.e., que o programa funcione para todos os tipos de combinações projetadas, e a "unicidade de solução" i.e., que o output definido seja o mesmo para todas as variações possíveis de dados .Neste tipo de programação , o usuário está na frente de uma verdadeira "caixa preta" pois ele só tem acesso a entrada e saída de dados, não podendo determinar como, nem porque, o programa obteve certos

resultados , principalmente quando os mesmos são, de alguma maneira, inesperados. Este tipo de programação é recomendada para resolver problemas que não precisam raciocínio heurístico e sim de cálculos numéricos e algoritmos com o objetivo de reduzir a margem de erro de cálculo, e aumentar a velocidade de processamento.

$$\boxed{\text{Programa convencional} = \text{Estrutura de dados} + \text{Algoritmos}}$$

No seu conjunto, os (SE) atuam como um filtro entre o problema a ser analisado e o usuário, fazendo com que a parcela do problema que o usuário não tem condições de resolver, seja retida e resolvida no sistema , deixando por sua conta apenas a parcela que ele pode contornar, ou tem que resolver.

É recomendada em problemas que exijam entre outras coisas , muita interação dos especialistas com a sua tecnologia, no que se refere principalmente a qualidade do resultado obtido e que não podem ser realizados com precisão pelos não especialistas.

$$\boxed{\text{Sistemas especialistas} = \text{Conhecimento} + \text{Controle}}$$

Existem vários exemplos de sistemas especialistas , um dos mais comentados na bibliografia, e que faz parte da própria história dos (SE), é o MYCIN, desenvolvido por médicos com o objetivo de diagnosticar doenças.

As equipes de automobilismo na Fórmula I, utilizam (SE) para analisar o rendimento do carro durante a corrida, detectando possíveis falhas no motor e fornecendo aos pilotos e mecânicos uma lista de sugestões que permitam corrigir as mesmas a tempo.

Nos Estados Unidos, as normas de construção de pontes foram implementadas num (SE) com o objetivo de analisar os resultados de projeto obtidos com os programas de análise numérica disponíveis adotando a melhor solução dentro dos seus padrões restritivos.

A escolha do problema candidato requer muita atenção, pois existem problemas que seriam melhor representados utilizando a programação convencional. Se este for o caso, nem pense na utilização de (SE), pois tornaria a sua implementação improdutiva e desnecessária.

III.5 Parâmetros que determinam a viabilidade de construção de um (SE).

O que levaria uma empresa ou seus especialistas a desenvolver projetos de (SE)? :Existem varios motivos, vejamos os principais:

A empresa adquire o conhecimento dos seus especialistas : Quando uma empresa contrata um especialista, basicamente está alugando os seus conhecimentos e a sua especialidade pelo tempo de duração do contrato. É um investimento custoso e de risco, mas inevitável, pois caso o especialista seja

demitido, morra ou abandone a empresa por tempo indeterminado, o "Contrato de aluguel de conhecimentos" chega ao fim, perdendo-se anos de experiência acumulada e a produtividade diminui, caso o especialista não tenha deixado um sucessor capacitado e devidamente treinado. A empresa se vê então obrigada a contratar um outro especialista para suprir a sua necessidade de conhecimentos específicos.

Um projeto de sistema especialista pode ser visto do ponto de vista empresarial como uma forma de "adquirir" os conhecimentos dos seus especialistas, de tal forma a ter disponibilidade dos mesmos, a qualquer hora e em qualquer lugar, mantendo a produtividade dos "Não especialistas" constante, mesmo com a ausência do "Especialista" em questão.

(SE) não perdem a concentração : Os (SE) não tem doenças, não tem problemas em casa e o mais importante; não se desconcentram, realizando tarefas de uma maneira consistente e efetiva.

O especialista não pode estar em dois lugares ao mesmo tempo : Os (SE) sim, aumentando a produtividade dos diversos setores que trabalham em função do conhecimento do especialista. Analisando a necessidade do especialista em construir a base observamos que o mesmo classifica os problemas com a técnica do 80/20 i.e., 80 por cento dos problemas que ele resolve são fáceis de resolver e rotineiros. São os problemas com os quais ele não gostaria de estar perdendo tempo, mas como é o único capaz de

resolvê-los não pode fazer coisa alguma. Do outro lado ele tem 20 por cento de problemas que são um desafio pois são bastante complicados e a solução ainda é um mistério, até para o próprio especialista. Ele gostaria de dispor o seu tempo integral nestes 20 por cento, portanto a sua solução seria um protótipo de (SE) que tome conta dos rotineiros 80 por cento, liberando-o assim para analisar os complicados 20 por cento restantes.

Treinamento : Devido a sua habilidade de defender e explicar o raciocínio adotado, com interfaces gráficas e textos explicativos que tornam a consulta interessante e agradável, os (SE) são potentes ferramentas no treinamento de pessoal que consultando-os repetitivamente, melhoram a sua "performance" até atingir o nível desejado pelos empregadores.

Padroniza a solução de problemas : Existem áreas dentro da empresa que tem mais de um especialista sobre o mesmo assunto. Às vezes, esta situação gera problemas políticos devido aos conflitos frequentes entre os mesmos, gerando uma perda de produtividade que pode ser prejudicial. Por outro lado, existindo várias formas diferentes de analisar o problema, a qualidade dos resultados pode ser prejudicada. Neste caso, unificar o conhecimento num (SE) poderia ser a solução indicada.

Gerência utilitários disponíveis : Um (SE) tem facilidades de interface com programas convencionais. Montando um sistema de análise de resultados destes programas, pode-se melhorar a

qualidade deles, dando uma explicação lógica para os resultados inesperados que costumam paralizar a evolução do trabalho dos "não especialistas", principalmente durante a ausência do "especialista".

III.6 Objetivos básicos de um (SE)

Um bom (SE) deve aproveitar ao máximo as vantagens do software disponível. Os objetivos básicos de qualquer (SE) devem ser :

a- Dialogar com o usuário de uma maneira clara e objetiva , fornecendo , quando for o caso, explicações detalhadas sobre as decisões que foram tomadas para atingir o objetivo proposto. Selecionar as perguntas a serem feitas em função das respostas do usuário, de maneira similar ao especialista durante as consultas.

b- Aproveitar ao máximo a heurística do especialista durante a análise , obtendo respostas confiáveis e estabelecendo as diversas alternativas de análise a serem adotadas, principalmente em problemas de seleção ou classificação.

c- Em caso de ausência do especialista evitar que a produtividade dos usuários se paralizem ou diminua a patamares indesejáveis.

d- Montar a base de conhecimentos escrevendo regras que formem frases independentes de fácil interpretação, até para os não especialistas, com o objetivo

de facilitar a sua manutenção.

e- Resolver pelo menos 50 por cento dos problemas numerados no escopo.

III.7 Cuidados a serem tomados na implementação de (SE)

Um dos eventos críticos no desenvolvimento de (SE) é determinar com precisão o domínio de aplicação em função do escopo do sistema. Não esquecer nunca que o termo "Especialista" se refere a domínios específicos e não generalizados. Devemos tomar certos cuidados na definição do domínio, apontando, o que pode ser analisado e o que não pode ser analisado pelo sistema. Numeramos os principais :

- Programadores principiantes podem escolher problemas que seriam melhor representados na programação convencional: neste caso, a sua implementação em (SE) torna-se desnecessária.

- Existem vários tipos de ambientes de desenvolvimento de (SE). O ideal seria a escolha do mesmo em função do conhecimento específico a ser codificado. Caso contrário, o domínio pode se tornar tecnicamente inviável.

- Projetos de (SE) são encarados com desconfiança dentro dos diferentes grupos de uma organização que não participam do mesmo. O sucesso, principalmente dos primeiros projetos, é importantíssimo para o surgimento de novos projetos.

- Existem problemas que são como ICEBERGS ,pequenos acima da superfície,mas a medida que avançamos na sua implementação tornam-se complicados e trabalhosos.

Existem domínios que podem representar um retorno económico substancial,mas tecnicamente são muito complicados até para os especialistas.O ideal para programadores e engenheiros de conhecimento principiantes seria a escolha de domínios pequenos, que façam a média entre os critérios técnicos e económicos.

III.8 Critérios de seleção de problemas candidatos a Sistemas Especialistas.

Na avaliação de problemas candidatos , existem quatro critérios importantíssimos a serem analisados pela equipe encarregada da sua implementação:

- a) Retorno económico
- b) Disponibilidade do especialista
- c) Facilidade de implementação
- d) Número possível de usuários

Os dois primeiros são critérios importantes na especificação do domínio , o terceiro depende da disponibilidade de tempo e da escolha do software adequado.

O último item torna-se importante desde o momento em que um projeto de (SE) é dispensável caso não se tenha um número mínimo de usuarios que justifiquem a sua implementação.

A- Retorno econômico

O critério econômico é o mais importante, pois a tecnologia só é necessária quando aumenta a produtividade de uma empresa.

- O conhecimento representa vantagem sobre os competidores ? Geralmente as empresas tem grupos elite especializados cujo objetivo é eliminar a concorrência. Neste caso o lucro depende exclusivamente da experiência dos seus integrantes. Surge a necessidade da criação de um (SE) que mantenha o mercado já conquistado, liberando o grupo desta tarefa rotineira, para tentar conquistar novos mercados , ainda em poder dos seus concorrentes.

-Existe dependência de trabalho em equipe?. A ausência de um elemento da equipe pode ocasionar a paralização da atividade, principalmente quando a mesma requer a sua experiência.

-Erros custosos são frequentes devido a falha humana?. Operações sem sucesso representam dinheiro e tempo jogado fora para as empresas; mais ainda, quando o fracasso se deve a falha humana. Isto pode ter duas explicações lógicas : Empregados incompetentes ou problemas muito complexos. No segundo caso, um (SE) pode ajudar a diminuir ou eliminar as chances de falhas humanas em problemas do tipo decisoriais.

B- Disponibilidade de especialistas.

Uma vez analisado o critério econômico devemos analisar até que ponto o especialista é indispensável para resolver o problema:

- A tarefa só se resolve com "Know how"? Uma das principais características do especialista é que realiza a tarefa muito melhor do que os seus colegas. Esta habilidade faz com que seja frequentemente consultado para determinar os procedimentos a serem adotados na análise. Ele não precisa estar presente mas o seu conhecimento é fundamental para resolver o problema. Normalmente num grupo de trabalho existe só 1 ou 2 por cento de especialistas que demostram um acréscimo de competência elevado em relação ao resto dos empregados. Se o problema se resolve com experiência ou adotando alternativas de análise em função de decisões do especialista, o mesmo é candidato a (SE)

- A performance dos não especialistas é insatisfatória?. Diferente da incompetência do empregado, o problema pode ser tecnicamente complicado demais para ser resolvido por ele. Um exemplo clássico dentro da engenharia é a GERAÇÃO DE MALHAS em métodos de análise estrutural, tais como Elementos finitos ou Elementos de contorno, onde a performance dos especialistas é muito superior, e a dos não especialistas deixa a desejar.

- Existe muita demanda de especialistas na empresa?. O desenvolvimento de um projeto de (SE) não é possível sem a participação do especialista. A disponibilidade do mesmo para as entrevistas de aquisição de conhecimentos é requisito fundamental para dar continuidade ao projeto.

C- Facilidade de implementação.

Existem problemas que teóricamente são candidatos, mas durante a sua implementação, o programador encontra muitas dificuldades devido a má qualidade do software ou a complexidade do problema:

-O domínio foi bem discretizado?.Uma vez analisados os critérios econômicos e a necessidade do especialista estamos prontos para definir o escopo e determinar a seguir o domínio do problema.O Engenheiro de conhecimento pode encontrar dificuldades em selecionar os objetos principais durante as suas entrevistas com o especialista.Em outras ocasiões os problemas são do tipo ICEBERGS pois embora satisfaçam os critérios de escolha de candidatos sobre a superfície,determinar a relação entre os objetos fundamentais do conhecimento pode se tornar muito trabalhosa até para o próprio especialista sob a superfície do domínio, pondo em risco a viabilidade de sua implementação. Neste caso é preciso uma revisão detalhada do domínio.Se o mesmo não estiver bem definido,é melhor abandonar a idéia de criação do protótipo. Este problema acentua-se quando o próprio especialista faz o papel de engenheiro de conhecimento,pois sabendo resolver o problema,pode desprezar parcelas importantes de conhecimento na construção da base,que pode prejudicar a qualidade do resultado.Por exemplo,na expressão :

" Se a fissura na parede for pequena então o problema não é estrutural "

qualquer engenheiro civil tem condições de interpretar na sua totalidade o seu significado. Para ele ,que é um especialista no assunto, esta frase não parece muito importante dentro do contexto do seu conhecimento, mas para a implementação de um (SE) baseado nesta hipótese , surge uma pergunta importante: O que é uma fissura pequena?

Não devemos esquecer que termos que nos consideramos "evidentes" podem ser muito importantes para atingir o objetivo de uma análise.

- A solução do problema depende do bom senso?. Quando afastamos a mão do fogo processamos um conjunto de informações baseados na experiência e no conhecimento adquirido sobre "dor" e "queimaduras" que nos permitem executar os movimentos precisos para evitar contato direto com o fogo. Este conjunto de informações que nós estamos acostumados a processar mecânicamente recebem o nome de BOM SENSO.

Minsky, no seu livro "The society of mind" afirma que essa ilusão sobre a simplicidade do bom senso se deve ao acúmulo de camadas de conhecimento que nós adquirimos ao longo das nossas vidas e que começa na nossa infância, quando aprendemos nossas habilidades básicas. Com o correr do tempo, as camadas inferiores do conhecimento passam a fazer parte do nosso bom senso , e quando nos perguntamos como adquirimos tal conhecimento, a resposta acostuma ser a mesma: "Não lembro".

Problemas que se resolvam com bom senso não dependem de especialistas por tanto torna-se desnecessária a sua implementação em (SE)

- A solução do problema depende de algum dos nossos sentidos?.Cada ser humano processa os sinais obtidos pelos sentidos visuais ,auditivos e tácteis de uma maneira diferente é impossível de padronizar.Deve se evitar ao máximo a utilização dos mesmos nos procesos decisoriais da base de conhecimento.

- O domínio do problema é estável?.Se o conhecimento adquirido sofre modificações constantes não se recomenda a utilização de (SE)

- Domínios nos quais dependendo das decisões a serem tomadas pelo (SE) existe risco de vida ou de perda de grandes somas de dinheiro não devem ser implementadas em (SE).

Por exemplo,um investidor na bolsa de valores que dependa de um protótipo para aplicar o seu dinheiro corre o risco de perder tudo em questão de minutos.Lembrar que (SE) foram feitos para "ajudar" a resolver problemas e não para tomar decisões que possam ocasionar dano algum aos usuários ou a terceiros.

- Pode-se reduzir o domínio a um algoritmo?.Se o domínio tem um reduzido número de alternativas previsíveis ou o seu controle pode ser representado por números,então é um sinal positivo para encontrar um algoritmo que tome conta da situação.Neste caso,o problema é perfeitamente representado na programação convencional,devendo-se aproveitar as suas vantagens.

III.9 Como montar a base de conhecimentos com a técnica de prototipagem rápida

A construção de uma base de conhecimentos confiável e efetiva requer criatividade e paciência .O roteiro básico para a sua construção é :

a- Iniciar a programação com uma pequena base ,atacando uma parte do domínio.Nesta fase,os resultados incorretos ou indeterminados acusarão a falta de regras ou permitirá a correção de regras inconsistentes.

b- Gradualmente estende-se o domínio refinando os blocos independentes de conhecimento e definindo a sua interdependência.

c- Testar a base primeiro com os especialistas analisando todos os caminhos possíveis com o objetivo definido de detectar falhas de origem teórica.

d- Refinar a interação Usuário-base a fim de que o diálogo seja atrativo e interessante , utilizando uma linguagem que permita a interpretação dos conceitos a serem apresentados.Nesta fase a interação com mais de um usuário é importante para estabelecer as suas necessidades.

e- Lembrar que o "Know how" é mais qualitativo do

que quantitativo.É possível fazer cálculos aritméticos básicos e comparações numéricas,mas não se deve esquecer que os (SE) tem as suas limitações no que se refere á implementação de algoritmos.

Capítulo IV

Aspectos técnicos de Sistemas Especialistas

IV.1 Introdução

No Capítulo III definimos (SE) como sendo programas de computador que simulam o comportamento humano ao resolver problemas. Mostramos também as suas vantagens e limitações e definimos uma série de conceitos básicos que nos ajudarão a interpretar o aspecto técnico que será tratado a seguir.

Comentaremos neste capítulo a estrutura básica de um (SE), o seu funcionamento e numerando as diferentes técnicas de busca utilizadas pelo mecanismo de inferência e sobretudo procurando montar a base de conhecimentos da melhor maneira possível e obter o máximo de aproveitamento do "software" a ser utilizado.

Escolhemos para montar a nossa base, (SE) baseados em regras, pois acreditamos ser a melhor maneira de representar conhecimentos do tipo diagnósticos, seleção ou classificação para Engenheiros de Conhecimento principiantes, como é o nosso caso. Todos os (SE) baseados em regras tem a mesma estruturação, sendo que a maioria já tem interface com rotinas externas e conseguem realizar algumas operações aritméticas compensando assim, em parte, as deficiências do (SE) em representar algoritmos. Chamamos de rotinas externas os programas feitos em computação convencional que resolvem a parte algorítmica que não pode ser representada na base e

que são necessárias para obter certas informações que serão utilizadas pela mesma para obter a solução. Estas rotinas externas são chamadas pelo protótipo quando necessário, mas não fazem parte do mesmo, devendo ser "linkadas" junto com o (SE) para obter o módulo executável. As rotinas só serão chamadas caso a (BC) determinar que os parâmetros nela calculados, serão utilizados para resolver o problema.

IV.2 Arquitetura de Sistemas Especialistas baseados em regras

Um (SE) baseado em regras tem três componentes básicos que o identificam : a base de conhecimentos, o mecanismo de controle ou inferência e a interface com o usuário. A base de conhecimento é o conjunto de regras do tipo IF/THEN que representa o conhecimento. O mecanismo de inferência (MI) é o módulo de software programado que interpreta e processa as regras, desativa a parcela de conhecimento que não será utilizada durante a consulta, e é o encarregado de dar as instruções ao computador. A interface com o usuário torna as consultas agradáveis pois formula perguntas, fornece explicações com ajuda de gráficos ou texto e detecta erros na implementação da base simulando um diálogo entre o especialista e o usuário.

O conjunto formado pela interface do usuário e o mecanismo de controle ou inferência, recebe o nome de "SHELL DE (SE)" pois é o software a ser adquirido que nos permitirá montar a nossa (BC). A vantagem das "SHELL"(Casca) é que as mesmas não contem nenhum tipo de conhecimento no seu

interior,são "ocas".Cada vez que nós introduzimos um tipo de conhecimento na "Shell" montamos um Protótipo de (SE) sobre um determinado assunto.A implementação de (SE) torna-se tambem mais agradável para o programador,quando comparado com a (PC),pois a "Shell" ja foi programada a priori,e o Engenheiro de conhecimento (EC) precisa se preocupar apenas em montar a (BC) sobre o tópico do seu interesse,podendo rodar os vários protótipos disponíveis com a mesma ferramenta .A adaptação da (BC) a outras "shells" ,tambem não representa grande dificuldade pois a parcela do conhecimento representada na base continuará sendo a mesma ,adaptando apenas a sua sintaxe de acordo com as especificações do novo produto a ser utilizado.Para permitir esta flexibilidade devemos utilizar uma linguagem transparente e objetiva ao selecionar os "parâmetros" e "regras" que farão parte da (BC).

SHELL DE (SE)	=	MECANISMO DE INFERENCIA	+	INTERFACE DO USUARIO
------------------	---	----------------------------	---	-------------------------

PROTOTIPO DE (SE)	=	SHELL DE (SE)	+	BASE DE CONHECIMENTO
----------------------	---	------------------	---	----------------------

Figura No 4.1

O mecanismo de inferência(MI),evita tambem que o (EC)

se preocupe em controlar a execução do programa: em função do problema apresentado pelo usuário , o (MI) estabelece o caminho que nos levará a solução do problema em questão ,selecionando as regras que relacionam os parâmetros que devem ser conhecidos. A busca destas regras dentro do conjunto de regras e parâmetros que formam a (BC) se processa de duas formas diferentes :O "Backward Chaining" e o "Forward Chaining" .O "Backward Chaining" parte do objetivo final conhecido a priori,e numera em ordem todos os parâmetros e regras que precisam ser "disparados" antes de chegar ao valor final da solução,ou seja anda de trás para frente.O "Forward Chaining" faz exatamente o contrário pois em função dos parâmetros que são conhecidos ,sai "disparando" todas as regras e parâmetros que podem ser calculados.Existem "Shells" que permitem alternativamente a utilização de ambos mecanismos de busca,o que aumenta em muito a capacidade e a qualidade do produto.O ideal seria trabalhar com "shells" que utilizem alternativamente as duas técnicas de busca,o que melhora em muito a qualidade do protótipo a ser implementado.

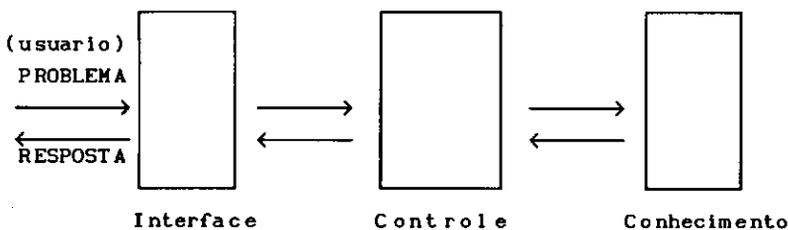


Figura No 4.2

IV.3 Objetos principais da base de conhecimentos

Uma base de conhecimento (BC) é um conjunto de **Parâmetros** que representam os fatos do domínio do problema, relacionados por **Regras** que definem o seu relacionamento com os demais, i.e., estes parâmetros podem ter nenhum, um ou mais valores conhecidos que representam o seu estado atual, e as regras indicam o que fazer com os mesmos se alguma coisa especificada a priori no seu contexto for verdade. Tanto os parâmetros como as regras são objetos independentes dentro da base e se diferenciam pelo nome e por um conjunto de propriedades que cada um possui. Quando o usuário consulta o protótipo, o mecanismo de inferência seleciona os parâmetros e regras a serem utilizadas em função do tipo de mecanismo de busca utilizado. Os objetos que não são importantes para a resolução do problema em questão, são desativados, permitindo que o (MI) formule só as perguntas necessárias, estabelecendo as restantes com ajuda das regras escolhidas. Na programação convencional, todas as variáveis do domínio devem ser conhecidas a priori, pois a estrutura de dados tem uma sequência prestabelecida pelo programador.

IV.3.1 Parâmetros

Na programação convencional, os símbolos usados no armazenamento de valores são as variáveis. Em (SE) são os **Parâmetros, atributos, fatos** ou **expressões** (a denominação depende do software utilizado) os encarregados de assumir

valores que serão utilizados durante as consultas. Existe uma diferença fundamental entre o parâmetro e as variáveis; analisemos a seguinte expressão:

COR = VERDE

Quem já trabalhou com FORTRAN, PASCAL, BASIC ou alguma outra linguagem utilizada na programação convencional, sabe perfeitamente que a expressão acima é um comando a ser executado pelo computador :

"Trocar o valor armazenado no endereço de memória representado pelo nome COR pelo valor armazenado no endereço de memória representado pelo nome VERDE"

Em (SE) a mesma expressão não representa um comando a ser executado e sim a definição de um atributo :

"Ao símbolo COR foi atribuído o valor VERDE formando o par conhecido (COR, VERDE)"

O parâmetro que foi utilizado na base para representar alguma coisa definida como 'c-o-r' foi dado o valor de 'v-e-r-d-e', um grupo de cinco caracteres fechando o conjunto (atributo, valor), o qual recebe a etiqueta de "Parâmetro conhecido". Outra diferença marcante entre a "variável" e o "Parâmetro" é que este último possui uma lista de propriedades que deve ser preenchida durante a sua especificação na (BC), i.e., um parâmetro só é definido quando

determinamos o seu nome e as propriedades que o caracterizam. A especificação desta lista de propriedades varia de acordo com o produto ,mas para se ter uma idéia ,definiremos um parâmetro listando as propriedades básicas de qualquer "shell" de (SE) do tipo comercial .Uma vez estabelecido o parâmetro no domínio,basta preencher a tabela correspondente,com ajuda do editor de texto da própria "shell", (após digitar o comando que permitirá a edição do mesmo).

Simulamos em seguida a especificação de um parâmetro numa "shell" de (SE) qualquer :

<COMANDO: Editar parâmetro >

1. Aparece a lista na tela a ser preenchida

Nome do parâmetro	:
PROPRIEDADES :		
Tipo	:
Restrições	:
Valores possíveis	:
Pergunta	:

2. O programador completa a lista e o parâmetro está definido ...

Nome do parâmetro	:	Estado_do_carro
PROPRIEDADES		
Tipo	:	String
Restrições	:	Só carros brasileiros
Valores possíveis	:	(Novo,Semi-novo Regular,Ruim)
Pergunta	:	Qual é o estado atual do

<COMANDO : Volta ao menù principal>

Esta lista de propriedades que ajudam a definir o parâmetro, são utilizadas pelo mecanismo de inferência para evitar que o usuário forneça ao sistema , informação incompatível com as especificações predeterminadas. Por exemplo, na tabela acima , a propriedade "Valores possíveis" faz com que o mecanismo rejeite qualquer outro valor diferente a (Novo;Semi-novo;Regular;Ruim) que o usuário ou a conclusão de uma regra possam determinar, por outro lado, a propriedade Restrição=carros brasileiros limita a análise a carros nacionais, i.e., os carros importados não serão

analisados com o atributo "Estado_do_carro".

Caso o usuário forneça alguma informação que não satisfaça alguma das propriedades definidas, ele terá duas opções : a primeira seria corrigir o erro repetindo a operação e fornecendo a resposta indicada ; a segunda seria abandonar a consulta em caso de dúvida.

Lembramos que na (PC) é muito mais difícil relacionar uma variável com uma lista de propriedades que o identificam, pois isto implica montar um conjunto de algoritmos com comandos condicionais (IF-THEN-ELSE) e de controle (GO TO) que dificultam a manutenção ou ampliação dos programas , onde qualquer alteração pode prejudicar o seu desempenho.

A vantagem de (SE) em representar fatos e atributos em função do nome e as propriedades que o definem se deve , em grande parte a sua arquitetura, onde o "conhecimento" é isolado do mecanismo de controle (já programado).

Em função desta arquitetura devemos procurar ao máximo codificar o conhecimento de acordo com as especificações do produto escolhido, esquecendo os conceitos que definem uma boa programação sequencial, pois a tendência dos (EC) que já trabalharam com (PC) é "algoritmizar " a base .

IV.3.1.1 Tipos de parâmetros

MULTIVALORES : Existem parâmetros dentro do domínio que dependendo da situação , podem possuir mais de um valor provável.

Estes possíveis valores que um parâmetro pode assumir, são numerados na sua lista de propriedades, e tem como objetivo básico unificar as expressões usadas pelo especialista que serão utilizados na sintaxe das regras que o relacionam com os demais parâmetros.

BOOLEANOS : São parâmetros que definem o estado atual de um fato ou atributo e que podem assumir dois valores predefinidos (VERDADEIRO/FALSO) ou (SIM/NÃO). São utilizados para definir as diversas alternativas válidas de análise, permitindo assim que o (MI) descarte a parcela de conhecimento que não será utilizada, em função do valor assumido durante a consulta.

NUMÉRICOS : Podem ser multivalores (vetores) ou não. Sempre que for possível deve se tentar relacionar os parâmetros do tipo numérico com outros não numéricos que serão utilizados para representar a consequência do valor numérico em questão. Exemplo:

Regra : Clima

```
"If Temperatura ≤ 20 then Sensibilidade térmica =
frio"
```

Observamos que o parâmetro numérico Temperatura foi relacionado com o parâmetro não numérico Sensibilidade térmica, na regra de nome Clima. Tanto o nome da regra como os nomes dos parâmetros devem ser definidos de tal forma montar unidades de texto fáceis de interpretar.

Neste caso, a regra possibilita que a temperatura seja representada pela sensação térmica do ser humano, a qual pode ser muito melhor aproveitada na base do que um simples número, que não representa conhecimento algum. Este tipo de parâmetros é utilizado na maioria dos problemas de engenharia, onde o sucesso depende da qualidade do resultado obtido. Em outros casos, os parâmetros numéricos podem representar expressões aritméticas conhecidas, que nos permitem economizar regras e dinamizar o trabalho de busca do (MI). Exemplo:

Regra : Círculo

"If PI is known and Diametro is known then

Area_do_circulo = PI.DIAMETRO²/4 "

Esta regra pode ser dispensada, utilizando um parâmetro numérico que represente a expressão numérica desejada, definindo a mesma na lista de propriedades:

Parâmetro : Area_do_circulo

Restrição : Area_do_circulo = PI.DIAMETRO²/4

Lembramos que a correta especificação dos parâmetros e as suas propriedades pode significar uma considerável economia de regras ou tempo de execução.

IV.3.1.2 Parâmetros desconhecidos

Muitas vezes o usuário não conhece a resposta a uma

determinada pergunta feita pelo protótipo. Neste caso, ele não precisa "mentir", fornecendo aleatoriamente informações que na verdade ele desconhece, pois o sistema deve estar preparado para aceitar um "não sei" como resposta.

Para cada parâmetro, o mecanismo de inferência determina o estado atual em que o mesmo se encontra, que pode ser: CONHECIDO, DESCONHECIDO, NÃO PROCESSADO. O estado inicial de um parâmetro é NÃO PROCESSADO pois o (MI) ainda não estabeleceu a sua importância dentro do problema a ser analisado. Caso o parâmetro precise ser conhecido para resolver o problema, o (MI) tenta de todas as formas possíveis obter um valor para o mesmo, assim após tentar a sua determinação com regras, rotinas externas e perguntas ao usuário, o (MI) chega a uma conclusão sobre o parâmetro em questão: CONHECIDO ou DESCONHECIDO. Após estas tentativas de atribuir valores ao parâmetro, o (MI) "etiqueta" o mesmo como sendo PROCESSADO, imitando assim o comportamento do ser humano ao trabalhar com fatos que ele desconhece a priori, onde a sua determinação é importantíssima para a resolução do problema apresentado.

Uma boa base deve estar preparada para trabalhar com dados desconhecidos, contando com um grupo de regras que tomem conta da situação atacando, se for o caso, outra parcela alternativa do domínio, que permita a posterior determinação dos parâmetros inicialmente avaliados.

Exemplo. A (BC) abaixo é utilizada para determinar a tensão admissível do concreto (FCK) em função do tipo de construção a ser executada.

Objetivo : Determinar o FCK...

Lista de regras :

```
R1 : IF FCK IS NOT KNOWN THEN FCK=135
R2 : IF TIPO_DE_CONSTRUCAO IS 'PONTES'
      THEN FCK=180
R3 : IF TIPO_DE_CONSTRUCAO IS 'RESIDENCIAL'
      THEN FCK=150
```

**Lista de parâmetros : FCK, TIPO_DE_CONSTRU-
-CAO.**

A primeira pergunta a ser feita pelo (MI) será o valor do FCK em questão...O usuário responde 'Não sei'...

A seguir,o (MI) escolhe dentro do domínio as regras que concluem o valor de tal parâmetro,neste caso ,as regras com nome R1,R2 e R3.Para que estas regras sejam "disparadas",o parâmetro TIPO_DE_CONSTRUCAO deve ser PROCESSADO,portanto outra pergunta é feita ao usuário para determinar o valor deste parâmetro auxiliar.Cabe observar que a determinação do parâmetro TIPO_DE_CONSTRUCAO não seria ativada ,caso o usuário digitasse o valor do FCK na primeira pergunta. Caso o usuário desconheça o valor do TIPO_DE_CONSTRUÇÃO ,a Regra R1 será disparada,pois realmente não foi possível determinar o valor deste parâmetro as regras analisadas a priori.

IV.3.1.3 Parâmetros incertos

Outra característica marcante dos (SE) é a habilidade de trabalhar com dados incertos,i.e.,parâmetros sem valores bem definidos.A maioria dos (SE) quantificam o grau de incerteza dos fatos com a ajuda de um fator de certeza (CF) que acompanha o par (Parâmetro,valor).

Este (CF) varia de -1.0 a 1.0 onde :

(CF = -1.0) , implica que o sistema tem certeza absoluta que o parâmetro não tem o valor indicado.

(CF = 0.0) , equivale a responder 'Não sei'.

(CF = +1.0) , Certeza absoluta de que o parâmetro em questão tem o valor indicado.

Os valores intermediários servem para quantificar expressões incertas tais como : 'ligeiramente parecido', 'quase-igual', 'muito-parecido', 'duvidoso' , 'provável'. Por exemplo, no Expert system environment (ESE) da IBM, o valor de um parâmetro é válido somente para CF superiores a 0.3, caso contrário, o mesmo recebe a etiqueta de "desconhecido". Para parâmetros "multivalores" é considerado como a solução o valor de maior (CF).

Exemplo: Qual é o valor a ser assumido pelo parâmetro?

Nome : Estado_do_carro	
Valores : NOVO	CF= 0.1
BOM	CF= 0.3
REGULAR	CF= 0.7
PRECISA REFORMA	CF=-0.2

R : ESTADO_DO_CARRO = (0.7) REGULAR

Os fatores de certeza podem ser utilizados tanto nas regras como na atribuição de valores via usuário ou rotinas externas. Deve se ter muito cuidado na sua utilização, pois a matemática utilizada para a sua determinação, varia de produto para produto, podendo para certos casos produzir resultados inesperados. O seu aproveitamento em protótipos requer um estudo mais aprofundado sobre a origem dos parâmetros incertos, os quais podem ser , probabilístico, estatístico ou heurístico.

IV.3.2 Regras

Um conjunto de informação representa 'conhecimento' quando conseguimos 'definir' o relacionamento ou dependência mutua que existe entre os fatos ou atributos que fazem parte do mesmo. Estes fatos ou idéias, nós representamos com ajuda dos parâmetros. O relacionamento e dependência entre os diversos parâmetros, representamos com REGRAS.

Estas regras são um conjunto bem definido de premissas e conclusões. A ação definida na conclusão é executada caso a expressão utilizada na premissa for verdadeira. Quando a conclusão é executada dizemos que a regra foi "disparada".

Para diferenciar o texto definido como 'premissa' da 'conclusão' dentro de uma regra, cada produto possui palavras-chave características. A palavra-chave (IF) define o início do texto que representa a premissa e a palavra (THEN)

palavras (AND) e (OR), entre outras, são utilizadas para relacionar parâmetros nas premissas e nas conclusões (Conclusões Múltiplas). Estes operadores AND (conjunção) e OR (disjunção) são conhecidos também na programação convencional.

Exemplos.

Regra : FRUTA_1 (Premissa simples)

Texto :

```
IF color = 'yellow ' THEN fruit = 'banana'
```

←——— PREMISSA ———→ ←—— CONCLUSÃO ———→

Regra : FRUTA_2 (Premissa composta)

Texto :

```
IF color = 'orange' AND fruit_type =citric
```

←——— PREMISSA ———→

```
THEN fruit = orange
```

←—— CONCLUSÃO ———→

Esta estruturação definida para as regras faz com que sejam rapidamente identificadas dentro do domínio da (BC) pelo seu nome e pela sua sintaxe, permitindo a sua manutenção ou correção de uma maneira mais clara e efetiva, quando comparados com a (PC). Por outro lado permite a avaliação da extensão do domínio por parte dos especialistas e usuários que não tenham participado na elaboração do projeto.

As regras dentro da (BC), são objetos independentes por tanto podem ser testadas individualmente, permitindo a montagem de protótipos com extrema facilidade e rapidez. Em outras palavras, as regras alteram somente a parcela de conhecimento a qual se refere, logo, qualquer modificação que seja feita nela não implica mudanças no restante da base, pois o protótipo continua fornecendo resultados corretos para problemas que se resolvam com a parcela não dependente da regra em questão.

IV.3.2.1 Tipos de regras

Existem dois tipos de regras a serem utilizados na base de conhecimentos: As regras de controle, e as regras de inferência. As chamadas regras de controle representam a ligação (MI)/(BC) pois as suas conclusões tem como objetivo determinar a ordem na qual os objetos serão analisados. São encarregadas também de desativar a parcela de conhecimento que não será utilizada durante a consulta. As regras de controle permitem por exemplo que o especialista corrija o

fluxo indevido de perguntas a serem feitas durante uma consulta com o objetivo de evitar perguntas desnecessárias ou feitas fora da ordem preestabelecida.

Independentemente das regras de controle, o mecanismo de inferência tenta chegar á solução adotando uma linha de raciocínio estabelecido pelo programador da "Shell" a priori e que varia em função da técnica de busca escolhida ("Backward Chaining"/"Forward Chaining").

A efetividade de busca do (MI) depende na sua totalidade das regras de controle, que são os únicos elementos de ligação permitidos entre o (MI) e a (BC). Cabe observar também, que dependendo do assunto escolhido para montar a base, um protótipo pode ser perfeitamente representado sem a utilização destas regras de controle, ficando a sequência de execução por conta exclusiva do (MI).

Exemplo de regra de controle :

Regra : Opção_1

Texto :

```
IF tipo_de_carro = NACIONAL THEN
DONT CONSIDER regra : Carros_importados
```

Tipo de regra : CONTROLE

Observamos também no exemplo acima que análogamente á definição de um parâmetro, especificar uma regra requer o preenchimento de uma lista de propriedades, entre elas o texto e o tipo de regra (controle), assim como a determinação do nome (Opção_1) que o identificará dentro da base.

As regras de inferência são as regras que contem o conhecimento propriamente dito, que permitem estabelecer os fatos ou parâmetros que nos levará á solução do problema. A conclusão de uma regra do tipo "Inferência" determina valores para os parâmetros desconhecidos em função de fatos conhecidos .Outra utilidade das regras de inferência é a construção de textos explicativos, que definem por exemplo, um diagnóstico em função dos resultados obtidos.

Exemplo de regra de inferência :

Regra : Diagnósticol

Texto :

```
IF Doença = "gripe forte" THEN
  Procedimento = "Repouso absoluto" AND
  Medicação = "Anador-comprimidos" AND
  Possologia = "de 4 em 4 horas"
```

Tipo : INFERENCIA

Observamos que tanto nos parâmetros como nas regras, os nomes utilizados para a sua identificação devem ter relação com a sua finalidade. Isto permite durante a leitura da base uma rápida identificação dos seus componentes.

IV.3.2.2 Montagem e organização de regras

O objetivo de uma boa (BC) é aproveitar ao máximo as vantagens que (SE) oferecem sobre a programação convencional. Quando na seção anterior pedimos para "esquecer" os conceitos e técnicas de programação utilizados na (PC) foi com o objetivo de evitar que montemos uma base com excessivo número de regras de controle e pouco

conhecimento, numa tentativa de "algoritmizar" o protótipo. As diferentes técnicas efetivas de organização de regras e parâmetros nos permitem :

- Minimizar o conteúdo procedural nas regras.
- Facilitar a leitura e interpretação da base
- Identificar erros de sintaxe ou teóricos com maior facilidade.

Estes fatores permitem que a interação USUARIO/SHELL/CONHECIMENTO seja dinâmica e transparente, inclusive para pessoas que não tiveram participação na implementação inicial do protótipo. A ordem de aparecimento das regras , não altera o resultado final do produto, mas pode agilizar a consulta caso as mesmas forem organizadas da seguinte maneira :

a) Agrupar regras em função das conclusões : Isto permite detectar os erros facilitando o "debugg" do protótipo.

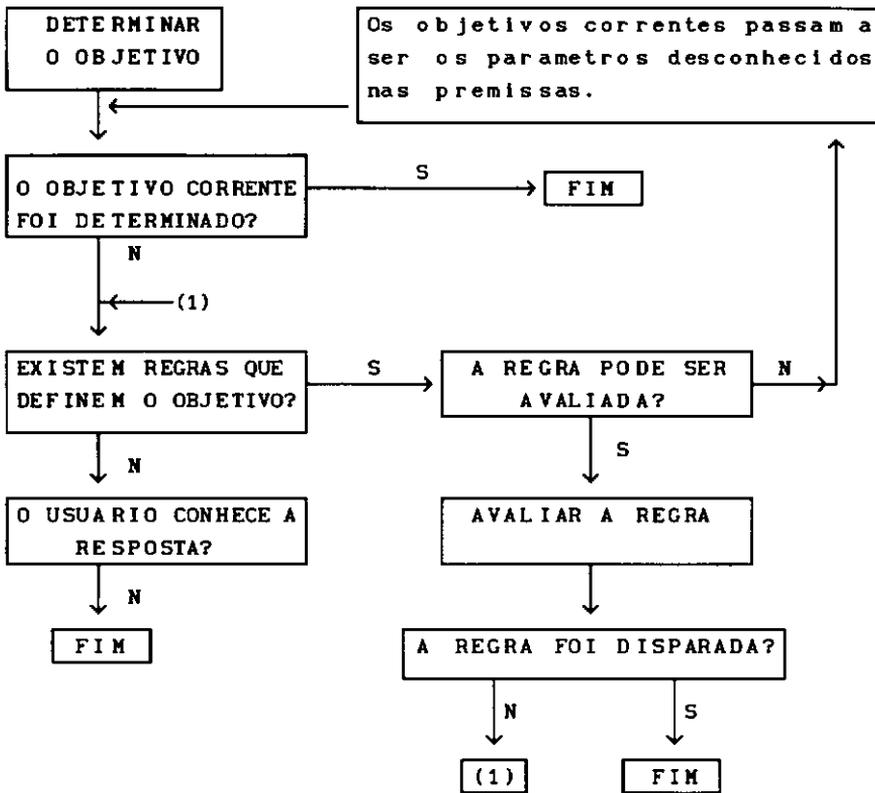
b) Colocar em primeiro lugar as regras que definem as alternativas de análise mais utilizadas pelo especialista ao resolver um problema , evitando assim, perguntas desnecessárias e reduzindo o número de regras que serão analisadas, melhorando conseqüentemente a performance da consulta.

c) Organizar as regras hierarquicamente: Montar grupos que concluem um determinado parâmetro antes dos grupos de regras que o utilizem nas suas premissas.

IV.4 Mecanismo de Inferência : Backward e Forward Chaining

Os mecanismos de busca utilizados nos (MI) de (SE) baseados em regras são o **Backward Chaining** e o **Forward Chaining** .Em função destas técnicas de busca ,o (MI) seleciona as regras que serão utilizadas e determina a ordem na qual as mesmas serão processadas durante a consulta.

O **Backward Chaining** parte do objetivo final -preestabelecido-,e vai estabelecendo de trás para frente as regras e parâmetros que deverão ser acionadas para atingi-lo (ver fluxograma) :



FLUXOGRAMA DO BACKWARD-CHAINING

O fluxograma mostra o funcionamento deste mecanismo de busca, que é muito utilizado quando o objetivo está bem definido. O (MI) desativa as regras que não colaboram para atingir o objetivo inicial, inclusive as que poderiam ser disparadas com os parâmetros já conhecidos, permitindo que o usuário responda somente às perguntas indispensáveis. Devemos evitar este tipo de mecanismo de busca em problemas que careçam de objetivos "definidos", pois o "Backward-Chaining" pode desativar parcelas importantes de conhecimento, prejudicando a qualidade do resultado final, e deve ser utilizado para problemas do tipo classificação, seleção, ou diagnóstico.

Como era de se esperar, o Forward Chaining se comporta de maneira inversa, i.e., em função dos dados iniciais que

podem ser conhecidos; o mecanismo sai disparando todas as regras possíveis, parando somente após a última ser executada; e devem ser usados em problemas do tipo projetos, planejamento, interpretações em geral.

A tabela 4.1 pode ser empregada na escolha do (MI) ideal em função das características gerais do problema candidato em questão.

TABELA 4.1 : COMO SELECIONAR O MECANISMO DE BUSCA

CARACTERISTICA	FORWARD	BACKWARD
.Soluções	não definidas	definidas
.Objetivo	não necessariamente conhecido	conhecido
.Dados iniciais.:	Alguns	Poucos
.Perguntas ao usuário necessárias	não	sim
.Quantidade de regras disparadas	muitas	poucas
.Procedimento utilizado	Constroi a solução	Detecta a solução
.Aplicações	Projetos, planejamentos, interpretações	Classificação, diagnósticos, seleção

IV.5 Como testar a base de conhecimentos

Outra vantagem dos (SE) sobre a (PC) é que não é necessário acabar de escrever o programa para testá-lo (Prototipagem rápida).

Sendo as regras e parâmetros unidades independentes entre si ,a sua participação efetiva dentro do domínio pode ser testada logo após a sua definição ,independentemente do resto,facilitando a correção de erros e o "debug".

É recomendado testar a base desde o início da sua implementação,para evitar o acúmulo de erros de sintaxe ou teóricos ,cuja detecção pode tornar-se complicada, quando as parcelas de conhecimento são muito extensas, podendo ocasionar problemas do tipo estouro de memória,ou de fluxo de perguntas indesejado.Por outro lado,testar a base desde o início nos garante a completitude das parcelas superiores ,concentrando a margem de erros nas parcelas de conhecimento em níveis inferiores.

Antes de liberar a sua utilização ,o produto deve ser testado primeiro pelos especialistas verificando caso a caso as respostas intermediárias e os resultados finais,e depois pelos usuários para garantir que a consulta seja atrativa e que desperte confiança nos mesmos durante as consultas. Nesta fase refinam-se as mensagens e as informações complementares que serão fornecidas durante a consulta pelo sistema,de tal forma que sejam facilmente interpretadas pelos usuários.

Capítulo V

Especificação do protótipo

V.1 Introdução

Nos capítulos anteriores observamos que o Engenheiro de Conhecimento codifica o conhecimento em símbolos, algoritmos, regras e outras estruturas de representação, que permitem que o software resultante imite o comportamento do ser humano ao resolver problemas.

É muito importante que os usuários e engenheiros de conhecimento entendam que o protótipo resultante é um resumo do resumo do conhecimento total disponível. Deste total, o especialista só consegue transmitir uma parcela nas entrevistas. Do outro lado da mesa, o (EC) absorve só uma parcela do conhecimento, pois a sua capacidade em reconhecer objetos e interpretar o conhecimento especializado é limitada (ver fig 5.1).

No conjunto de informação que define o domínio teórico do futuro protótipo existe porções de conhecimento que tecnicamente são impossíveis de representar e devem portanto ser desligadas do que chamaremos "domínio definido" do problema. No final desta cadeia de "filtragem e purificação" das informações disponíveis chega-se à implementação do protótipo, que é o produto resultante do processo de aquisição de conhecimentos.

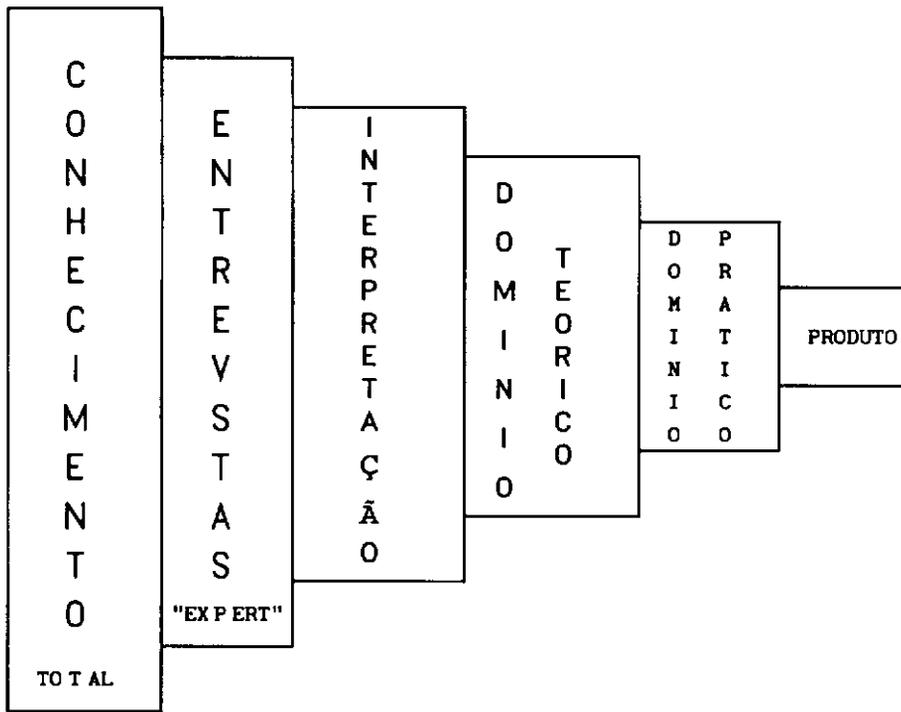


FIGURA 5.1 : Aquisição de conhecimentos

Cabe lembrar que em função do processo de aquisição de conhecimentos, o produto final fica sempre subordinado aos especialistas, tendo portanto as suas limitações. Podemos comparar o produto final a um não especialista que será treinado pelo especialista, com o objetivo de executar tarefas para ele rotineiras, visando o atendimento das pessoas que dependam exclusivamente da sua especialidade. Assim, análogamente ao treinamento de mão de obra especializada, o protótipo deve ser testado pelo especialista responsável antes de liberá-lo para o atendimento a clientes.

O processo de aquisição de conhecimentos do protótipo FRAES foi codificado pelo próprio especialista e adaptado à ferramenta disponível como veremos a seguir.

V.2 O problema

Durante a instalação do programa TUBFLEX na Petrobras, tivemos a oportunidade de constatar a dificuldade dos seus usuários não especialistas em obter bons resultados e interpretar e diagnosticar as suas consequências sem a ajuda efetiva dos especialistas.

Após processar os outros programas equivalentes disponíveis, verificamos que o problema se repetia de uma forma ou de outra, onde a obtenção de resultados satisfatórios depende do ajuste e calibração dos respectivos dados de entrada.

Enumeramos a seguir os principais problemas dos usuários não especialistas na análise local de risers flexíveis :

a) Existem seções dentro da empresa que carecem de um especialista em risers flexíveis.

b) Os programas disponíveis são verdadeiras caixas pretas, tanto para os usuários como para os especialistas, pois na maioria dos casos, os mesmos já foram calibrados para a análise de um determinado fabricante, o que impede a correta avaliação dos modelos matemáticos utilizados, e produz resultados imprevisíveis ao analisar os tubos de outros fabricantes, limitando assim o seu uso. O programa TUBFLEX é um programa genérico para análise de qualquer tipo de tubo flexível e apresenta muita sensibilidade no que se refere à qualidade do resultado. Um bom resultado é obtido através de uma interação

ESPECIALISTA/PROGRAMA principalmente no que se refere a dados de entrada os quais passam por um ajuste fino, obtido através da experiência do especialista em questão.

c) A maioria dos programas disponíveis carecem de manuais teóricos para o usuário completos, que permitam o melhor aproveitamento do software correspondente.

d) Os parâmetros referentes as características físicas e geométricas das diferentes camadas dos risers, nunca são fornecidos na sua totalidade pelos respectivos fabricantes (segredo industrial). Para garantir a completude dos dados necessários para a análise, é fundamental o uso da experiência e da heurística do especialista, principalmente no que se refere à definição dos dados desconhecidos.

e) Como consequência de (b), (c) e (d), processar o programa repetitivamente até encontrar os parâmetros aproximados torna-se uma rotina durante a análise.

f) A performance dos usuários não especialistas é insatisfatória.

g) Existe pouca referência bibliográfica no que se refere a resultados de ensaios. Isto dificulta a validação ou correção dos algoritmos apresentados, pois torna-se quase impossível isolar os erros derivados dos dados de entrada, dos erros decorrentes do próprio modelo matemático.

Em função dos problemas apresentados, a análise de risers flexíveis torna-se pelo menos na teoria um problema candidato a (SE). O objetivo principal do protótipo FRAES

deve ser montar uma base que funcione como um "Help desk" dos programas disponíveis ,atuando como um filtro no fluxo de informações entre os usuários e programas ,primeiro na aquisição e ajuste dos dados de entrada e depois na análise qualitativa dos resultados obtidos.(Ver fig. 5.2)

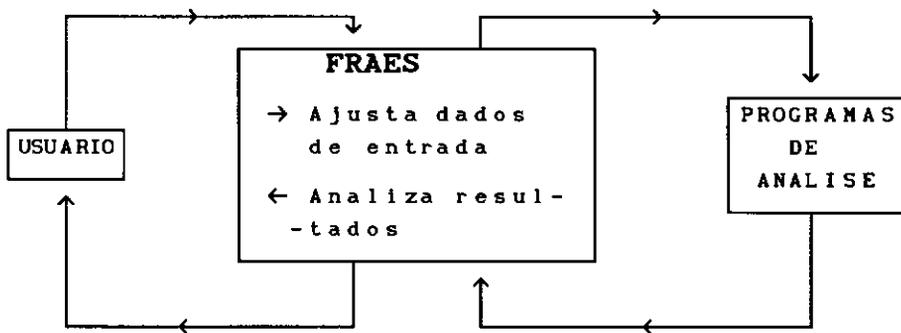


FIGURA 5.2 : Filtragem de informação com o FRAES

V.3 Definição do escopo

O protótipo FRAES busca aumentar a produtividade dos usuários, melhorando a qualidade dos resultados e diminuindo o tempo consumido na análise. No seu conjunto , o protótipo resultante deve :

a) Projetar as camadas que farão parte da estrutura interna do riser em função do fabricante escolhido e das características básicas do projeto.

b) Determinação das cargas limites e de trabalho do tubo proposto.

c) Unificar os conceitos de análise e tomada de decisões nos diversos setores da empresa, no que se refere a análise de risers flexíveis.

d) Permitir o aproveitamento de arquivos de dados

montados em consultas anteriores com sucesso, evitando assim a repetição desnecessária de trabalhos nos diversos setores da empresa.

e) Treinamento dos usuários não especialistas da empresa os quais rodando repetitivamente o protótipo absorvem parte do conhecimento, melhorando a sua performance em consultas posteriores.

f) Montar um sistema de interface com o usuário na forma de diálogo, simulando da melhor maneira possível a interação Especialista/Não Especialista visando tornar a consulta atrativa e agradável. Esta interface deve conter textos ou gráficos autoexplicativos que permitam que o usuário interprete COMO? ("HOW?") ou PORQUE? ("WHY?") foram tomadas as diversas decisões no decorrer da consulta.

g) Evitar a paralização temporária ou permanente de um projeto devido a ausência do especialista responsável na hora de interpretar os resultados obtidos.

h) Propor a construção de outra base de conhecimento que gerencie os programas disponíveis de análise dinâmica global de uma linha e que trabalhe interligada ao FRAES ,visando determinar com precisão absoluta o tempo de vida útil do tubo em operação, ou então colaborar com o dimensionamento das diversas camadas que compõem a sua estrutura interna ,que possibilite o aproveitamento dos tubos flexíveis em águas profundas, respeitando os critérios econômicos e de segurança estabelecidos pelas normas vigentes.

Lembramos aqui que devido à falta de disponibilidade de

tempo e equipamento adequado ,nos limitaremos a montar a primeira parte do conjunto que se refere a aquisição de dados necessários para a análise,sendo que o produto resultante estará pronto para receber as ampliações correspondentes.

V.4 Especificação do domínio

Dividiremos o domínio referente à AQUISIÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE DADOS DE ENTRADA em 3 subdomínios que podem ser implementados e testados isoladamente.

a) ESTAGIO No 1 : Projeto e dimensionamento das camadas do tubo

b) ESTAGIO No 2 : Colheita de todos os dados disponíveis e aproximação inicial dos não disponíveis.

c) ESTAGIO No 3 : Detecção e ajuste fino dos dados que apresentem determinados graus de incerteza.

As interfaces a serem utilizadas pelo sistema são :

a) USUARIO : Através de pergunta na tela

b) ROTINA EXTERNA TUBFLEX : Programa de análise estrutural das camadas internas de risers flexíveis.

c) ROTINA EXTERNA FLEXDAT : Programa que gerencia o arquivo de dados encarregado de armazenar arquivos de tubos flexíveis com confiabilidade de dados superior a 75%.

d) ROTINA EXTERNA FLEXGRAF : Saída grafica do tubo a ser analisado

e) ROTINA EXTERNA FLEXALGO : Parte algorítmica complementar do sistema.

Na figura 5.3 observamos a arquitetura do protótipo a ser implementado. As setas indicam que o fluxo de informação é de ida e volta, o usuário interage com o FRAES via tela, seja durante a consulta ou durante a codificação do conhecimento. A maioria das shells conhecidas, contem interfaces com facilidades de DEBUG e EDITORES DE TEXTO, o que facilita em muito a correção e manutenção dos protótipos a serem construídos. A base de conhecimento correspondente é montada e aprovada pelo (EC) e os respectivos especialistas, os quais são os encarregados da sua manutenção. Estando o conhecimento separado do mecanismo de controle, o protótipo desativa quando for o caso, a parcela da base que não será utilizada na resolução do problema proposto pelo usuário permitindo diversas alternativas de PERGUNTA/RESPOSTA durante a consulta, o que permite que o sistema demonstre algum tipo de capacidade de raciocínio em função do conhecimento adquirido. As rotinas externas do sistema FRAES foram implementadas em FORTRAN e a shell escolhida para montar o sistema é o Expert System Environment (E.S.E) da IBM Corporation.

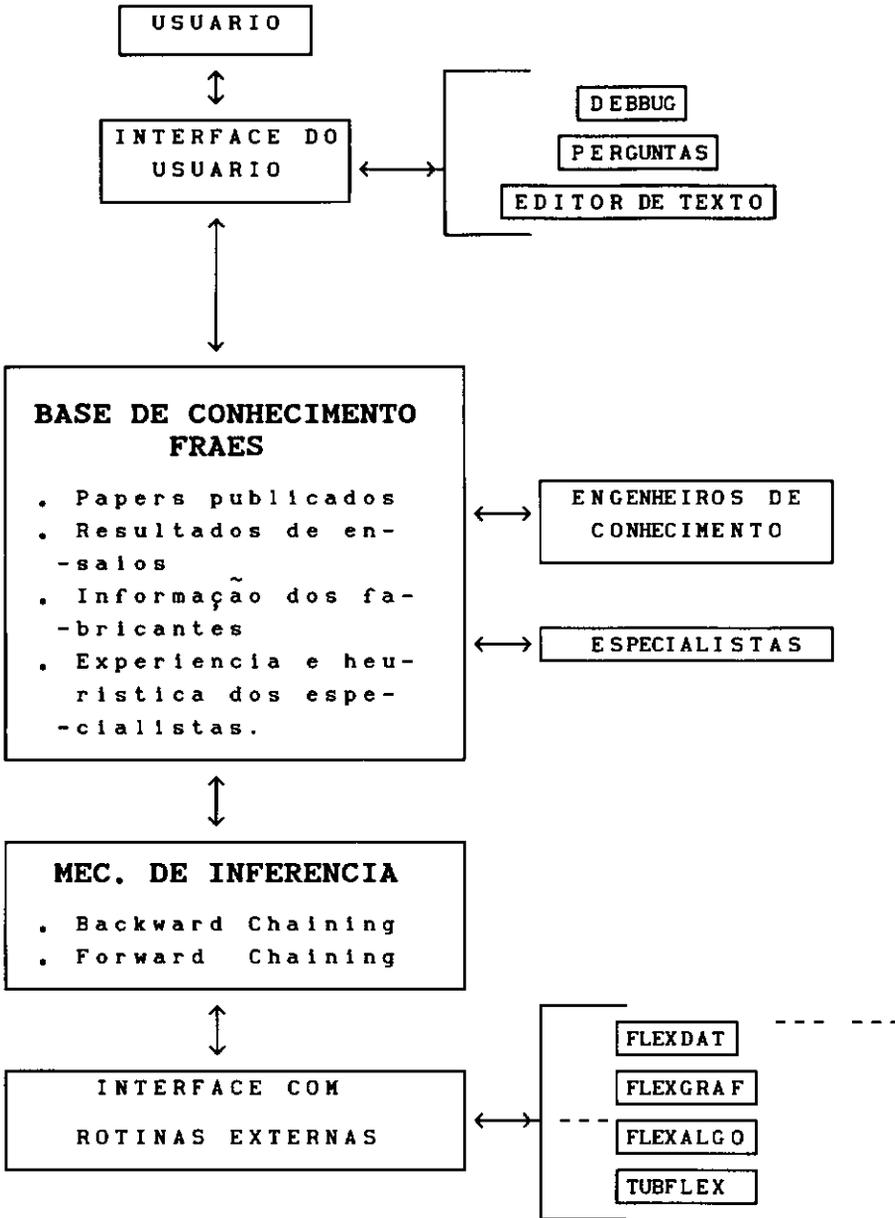


FIGURA 5.3 : Arquitetura do FRAES

V.5 Aquisição de conhecimentos

A seguir definiremos resumidamente o conhecimento a ser codificado nos diferentes estagios de análise:

V.5.1 Estagio No 1

As características básicas de projeto e dimensionamento das camadas internas de um riser flexível são :

- . Diâmetro interno
- . Pressão Interna de trabalho
- . Pressão externa de trabalho
- . Fabricante

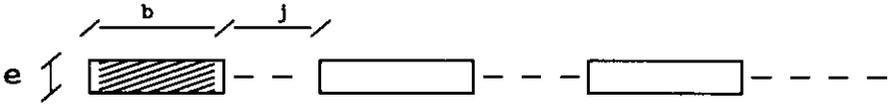
Para obter a combinação adequada de camadas que resista à combinação de carregamentos projetada, é muito importante a determinação do fabricante ,pois é em função do tipo de material patenteado por cada um deles que o sistema FRAES projetará o tubo flexível.Os principais fabricantes de tubos flexíveis conhecidos são :

- . COFLEXIP (França):Unbonded
- . TAURUS (Bélgica) :Bonded
- . PAG-O-FLEX (Alemanha):Bonded
- . DUNLOP (Inglaterra):Bonded
- . FURUKAWA (Japão):Unbonded

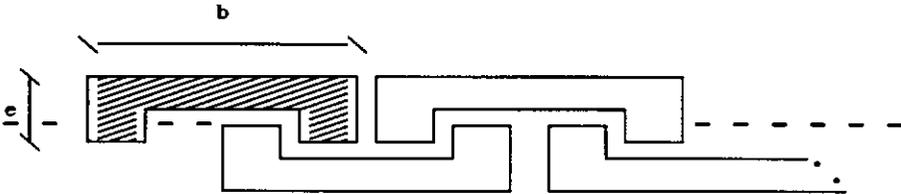
Estes fabricantes são facilmente identificados pelo tipo de tubo produzido (Bonded / Unbonded) e pelas características da seção transversal das espiras utilizadas para montar as camadas de armaduras.Os tipos de espiras de aço conhecidos que são utilizados pelos diferentes

fabricantes nos mais diversos arranjos são :

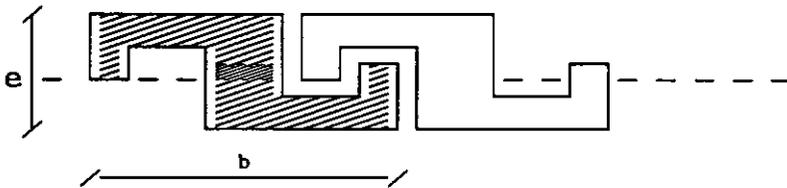
. RETANGULAR CHEIA



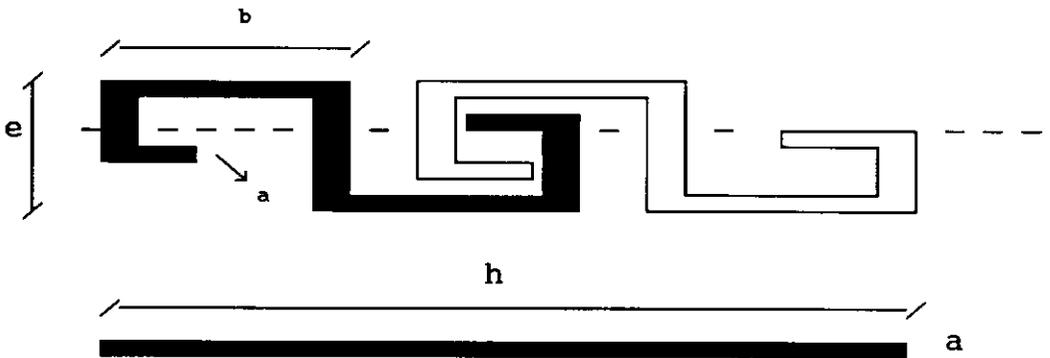
. SEÇÃO C CHEIA



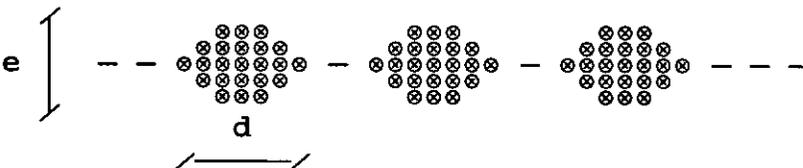
. SEÇÃO ZETA CHEIA



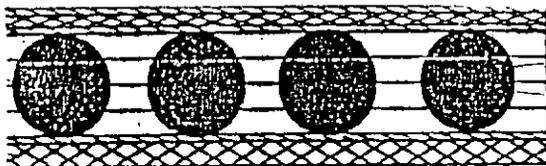
. CARCASSA INTERTRAVADA



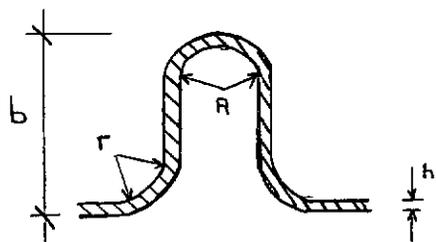
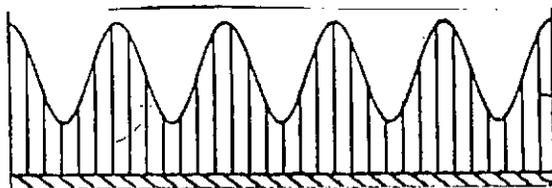
AREA DA CHAPA : $h \times a$

. CORDOALHAS DE AÇO GALVANIZADO ($e=d$)

. CIRCULAR CHEIA



. TUBO CORRUGADO



Caso o usuário não esteja em condições de estabelecer o fabricante, o sistema FRAES em função do tipo de combinação de armaduras do tubo a ser analisado, terá condições de identifica-lo.

COMBINAÇÃO DE ARMADURAS DE PRESSÃO

- . Intertravada (Dunlop, Coflexip, Furukawa)
- . Retangular (Pag-o-flex)
- . Intertravada + Zeta (Coflexip)

- . Intertravada + Zeta + Retangular (Coflexip)
- . Intertravada + C (Furukawa)
- . Tubo corrugado

TIPOS DE ARMADURAS DE TRAÇÃO

- . Retangular (Tubos unbonded)
- . Cordoalhas (Tubos bonded)

Estas armaduras são dispostas em 2,4,ou 6 camadas .Para manter a simetria,as camadas de armaduras adjuntas , são montadas com a mesma inclinação mas com sentido de rolamento oposto.

Fabricam tubos unbonded a COFLEXIP e a FURUKAWA ,os tubos bonded são fabricados pela PAG-O-FLEX , a TAURUS e a DUNLOP.

O processo de escolha da combinação de camadas da estrutura interna de um riser segue mais ou menos a seguinte linha de raciocínio:

a) As combinações de armaduras de pressão são função do diâmetro interno e a pressão interna para a qual foi projetada.

b) O dimensionamento das armaduras de pressão variam de acordo com a rigidez axial projetada e a pressão externa hidrostática de trabalho

c) São consideradas camadas opcionais as camadas que tem como função primordial a proteção das camadas adjacentes.Estas camadas são : carcaça externa

intertravada, camada interna plástica, camada antiatrito (só tubos unbonded).

Em função das respostas do usuário e do conhecimento a ser codificado no ESTAGIO No 1 ,podemos então personalizar a análise após determinar o fabricante e estabelecer as características básicas de projeto,com os quais temos condição de projetar a ordem e o número de camadas que serão aproveitadas na montagem do tubo.O usuário então dimensionará o tubo fornecendo as espessuras das diversas camadas.Este dimensionamento das espessuras ,só não será feito pelo sistema, para não sair da linha comercial de tubos flexíveis produzidos atualmente.

ROTINA EXTERNA FLEXDAT

Todo o trabalho de aquisição de dados de um tubo flexível pode ser evitado durante a consulta ,caso o usuário encontre o tubo a ser analisado no arquivo inteligente FLEXDAT.Esta rotina procede à leitura de todos os parâmetros necessários para a análise de risers no TUBFLEX , e a posterior visualização gráfica da seção na rotina FLEXGRAF.Para o aproveitamento do FRAES com outros programas similares ao TUBFLEX,basta montar uma rotina de conversão de dados de entrada,para relacionar os parâmetros da base com as variáveis utilizadas pelo programa em questão. Caso o nome do tubo procurado esteja no FLEXDAT o usuário não precisará se preocupar em montar o arquivo de entrada correspondente ao programa escolhido para a análise pois o

sistema o fará automaticamente, dispensando a leitura de manuais do usuário economizando tempo na preparação de dados de um tubo já testado e aprovado em consultas anteriores. Se o nome fornecido não for achado nesta rotina, o sistema ativará o ESTAGIO No 1 e no final da consulta estabelecerá um fator de confiabilidade de dados conhecidos.

Se o fator de confiabilidade for superior a 75% , o que indica a obtenção de resultados satisfatórios em consultas anteriores, a rotina FLEXDAT será chamada novamente , desta vez para gravar o conjunto de informações referentes ao tubo, obtidas pelo sistema. Por outro lado, se a confiabilidade for inferior a 75% será criado um arquivo temporário que será apagado na consulta seguinte, caso o usuário não o copie para um outro arquivo da sua escolha.

ROTINA TUBFLEX

É o programa disponível de análise mecânica de risers flexíveis. Maiores informações ao respeito podem ser procuradas em [2].

ROTINA FLEXGRAF

Esta rotina entra com as espessuras e tipos de camadas do tubo projetado pelo usuário e sai com o desenho da seção transversal em perspectiva do tubo, o que facilita em muito a rápida identificação dos tubos procurados. É acionada dentro da rotina FLEXDAT ou então diretamente pelo mecanismo de

inferência.

ROTINA FLEXALGO

Esta rotina resolve a parte algorítmica auxiliar do sistema. Basicamente tem as seguintes funções específicas :

- a) Cálculo dos diâmetros internos
- b) Cálculo do peso linear das diferentes camadas
- c) Cálculo das cargas limite teóricas
- d) Construção do arquivo de dados que possa ser reaproveitado pela rotina TUBFLEX ou programa similar.

Esta rotina é necessária devido à deficiência de sistemas especialistas no que se refere a algoritmos.

Uma vez dimensionado o tubo ,o sistema parte automaticamente para o ESTAGIO No 2 de análise, onde trabalharemos com dados incertos e as vezes desconhecidos, e posteriormente para o ESTAGIO No 3 ,onde será feito o ajuste fino dos parâmetros incertos com ajuda de resultados de testes de ensaio fornecidos pelos fabricantes.

V.5.2 ESTAGIO No 2

Todos os modelos de análise da estrutura interna de tubos flexíveis conhecidos até o momento, são baseados na seguinte hipótese :

" A resistência mecânica de um tubo flexível depende

quase na sua totalidade das camadas de armaduras "

Por tanto ,a qualidade numérica dos resultados está diretamente relacionada com a qualidade dos parâmetros conhecidos referente às camadas de armaduras de aço.

Neste ESTAGIO No 2 a análise personalizada em função do fabricante continua. Limitaremos a base de conhecimentos a dois fabricantes os quais são no momento os principais fornecedores da PETROBRAS : a COFLEXIP e a PAG-O-FLEX.

Para efeito de informação complementar são apresentadas duas listas de características físicas e químicas do material plástico utilizado nas camadas intermediarias, sendo que para o caso de elastômero composto, não existe bibliografia que permita conhecer as características da matriz e das fibras embebidas, parâmetros importantes para a determinação do módulo de elasticidade equivalente utilizado no TUBFLEX [2], e que serão fornecidos pelo usuário durante a consulta.

No que se refere às camadas de armaduras ,os parâmetros necessários para a análise são função das características geométricas e físicas de uma espira helicoidal e se dividem em :

a) Características Físicas do aço utilizado :

- Modulo de elasticidade (E)
- Coeficiente de Poisson (ν)
- Densidade (ρ)
- Peso Específico (γ)

- Tensão de ruptura da espira (σ_R)
- Tensão no limite elástico da espira (σ_Y)

b) Características Geométricas da espira

- Área da seção transversal (A)
- Número de espiras por camada (n)
- Passo da espira (L_1)
- Comprimento da espira no passo (l_1)
- Ângulo de assentamento em relação ao eixo do tubo (α)

c) Dados complementares da camada

- Espessura da camada (e)
- Diâmetro interno da camada (D_{Int})
- Peso linear da camada (ω)

Dentro deste conjunto , (A), (E), (n) e (α) , são parâmetros imprescindíveis, e os restantes só são utilizados , caso os primeiros não sejam conhecidos na sua totalidade pelo usuário. A determinação dos parâmetros desconhecidos será feita pelo sistema em função da heurística do especialista e da bibliografia disponível correspondente, os quais nunca receberão um fator de certeza superior a 0.75 (fig 5.3).



Figura 5.3 : Aquisição de dados no estágio No 2

Uma observação importante é que a maioria destes parâmetros são dependentes um do outro, ou seja, qualquer alteração de um deles implica a consequente correção dos demais.

O mecanismo de busca apropriado para o segundo estágio é o FORWARD CHAINING que será ativado cada vez que uma alteração seja necessária para os parâmetros considerados como "Incertos" ou "Desconhecidos" pelo mecanismo de inferência.

V.5.2.1 Especificação dos materiais utilizados pela COFLEXIP

Em função da bibliografia existente sobre este tipo de produto e da experiência adquirida processando repetitivamente exemplos de produtos COFLEXIP nos diversos programas de análise, estamos em condições de especificar as características de cada uma das camadas que compõem a sua estrutura interna, assim como o método utilizado pelos especialistas ao estabelecer as alternativas de cálculo dos parâmetros desconhecidos.

Os produtos COFLEXIP são montados com a combinação adequada das seguintes camadas:

- Camadas de polímero
- Camadas de carcaça intertravada
- Camadas de armaduras de seção ZETA
- Camadas de armaduras de seção RETANGULAR

a) POLÍMEROS

O polímero utilizado pela COFLEXIP para a construção das camadas intermediárias tubulares que tem como objetivo básico a impermeabilização e proteção dos componentes de aço é o NYLON 11 fabricado pela AQUITANE TOTAL ORGANICO com a marca registrada de RILSAN B. Existem 88 tipos de RILSAN B, sendo que os utilizados na confecção de tubos flexíveis são o BESN OP40 e o BESN OP40TL. O primeiro é utilizado em camadas impermeáveis à gases e líquidos em geral, enquanto o segundo é reforçado com o aditivo TL, que fornece uma proteção extra para suportar temperaturas elevadas. Este tipo de RILSAN é utilizado para risers projetados para transportar líquidos com temperaturas elevadas ou como camada protetora "Anti-fogo".

1. Propriedades físicas

Tipo de RILSAN	OP40	OP40TL
Viscosidade 25°C	180	170
Gravidade específica	1.05	1.06
Tensão de Ruptura (N/mm ²)		
→ (-40°C)	69	59
→ (+20°C)	59	49
→ (+80°C)	32	29
Alongamento Max. (%)		
→ (-40°C)	50	50
→ (+20°C)	260	230
→ (+80°C)	310	300
Elasticidade (N/mm ²)		
→ (-40°C)	1862	1862
→ (+20°C)	343	343
→ (+80°C)	167	167
Coefficiente de atrito	0.11	0.11
Taxa de desgaste	0.67	0.67

II Propriedades químicas

O RILSAN B resiste a bases e a soluções de sal e produtos derivados da exploração do petróleo em geral. Deve se evitar o contato com as seguintes substâncias : Ácidos nítrico e crômico, Ozono, Permanganato de Potásio, Fluor, Cloro

,Bromo,Anilina,Piridina,Fenois em geral,Tetracloroeto carbônico.

III Propriedades mecânicas

Do ponto de vista mecânico,as camadas de RILSAN B não oferecem muita resistência quando comparadas com o aço. Dependendo da temperatura do ambiente de trabalho,a tabela abaixo mostra as propriedades mecânicas do RILSAN no limite elástico.

TEMPERATURA (°C)	(-40)	(+20)	(+80)
Elasticidade (N/mm ²)	1862	343	167
Tensão limite (N/mm ²)	15	14	13
Deformação (%)	10	27	15
Atrito	0.13	0.11	0.08
Desgaste	0.67	0.67	0.67

b) Carcaça Intertravada

É utilizada exclusivamente como primeira camada de armadura de pressão para resistir o diferencial de pressão externa derivado da tração ou da pressão hidrostática aplicada na seção a ser analisada ou como camada externa protetora para evitar o rompimento da camada externa de polímero ,que tem função impermeabilizante. Caso o tubo a ser analisado possua uma camada interna protetora de

polímero, esta armadura colabora também com a resistência à pressão interna. A sua seção transversal é obtida a través da dobra de uma chapa retangular de dimensões (b x h). O tipo de aço utilizado é o aco INOX 314 de boa resistência à corrosão. As dimensões (b) e (h) da chapa estão padronizadas na linha comercial nas seguintes medidas : (0.4x20), (0.7x32), (0.8x32), (0.9x32), (1.0x40) , (1.0x48), (1.0x60) , (1.2x40) , (1.2x60) , (1.5x60) , (1.5x70) , (2.0x60) , (2.0x70), (2.0x80).

As características principais conhecidas são :

$$E = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$n = 1.0$$

$$e = 5 \times b \quad (\text{variável})$$

$$A = b \times h \quad (\text{variável})$$

$$\sigma_Y = 500 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_R = 540 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\alpha = 88 \text{ a } 85 \text{ graus} \quad (\text{variável})$$

O parâmetro a ser determinado pelo usuário com maior frequência , em função dos dados disponíveis de tubos COFLEXIP é o ângulo de assentamento (α). Em função dos dados disponíveis o ângulo (α) pode ser calculado com as seguintes expressões :

$$\cos (\alpha_I) = \frac{n_i \cdot A_i}{\pi \cdot D_{int} \cdot e_i} \quad ; \quad \alpha \approx \alpha_I - 0.7^\circ \quad (5.1)$$

$$\cos (\alpha_{II}) = \frac{n_i A_i \cdot \gamma_i}{\omega_i} \quad ; \quad \alpha \approx \alpha_{II} \quad (5.2)$$

O parâmetro a ser ajustado caso a carcaça intertravada seja a camada com problemas, será a dimensão (h) da chapa. Os testes do fabricante necessários para ajuste fino são : Tração de Colapso e Pressão externa hidrostática de colapso.

c) Armadura ZETA

Estas armaduras reforçam o tubo na rigidez radial à pressão hidrostática e ao efeito de confinamento devido ao diferencial de pressão transmitido pelas armaduras de tração submetidas à esforços distribuídos de tração axial.

Ajudam também a resistir pressões internas transmitidas pelo polímero impermeabilizante, situado após a carcaça intertravada e geralmente são as primeiras a romper.

Não existe na bibliografia disponível uma descrição detalhada da sua seção transversal , mais a COFLEXIP nas suas fichas técnicas fornece para todos os tubos da sua linha comercial com o reforço ZETA a mesma seção transversal de (6.2x14), que definem a sua área de seção transversal (A). Existe um outro tipo de armadura ZETA de e=8.0 mas a sua dimensão (b) não é conhecida, portanto caso a espessura

desta camada seja 8.0 mm ,será feita uma análise interativa de ajuste do parâmetro (b) até a obtenção de resultados confiáveis.O teste necessário para o ajuste fino deste tipo de armadura é o teste de pressão interna.

$$E = 2.1 \times 10^5 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$n = 2.0$$

$$e = 6.2$$

$$b = 14.0$$

$$A = e \times b$$

$$\sigma_Y = 700 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_R = 785 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\alpha = 87 \text{ a } 84 \text{ graus (Variável)}$$

Lembramos que as expressões (5.1) e (5.2) podem ser utilizadas para qualquer tipo de camada de armadura de pressão da linha COFLEXIP, caso o usuário desconheça o passo das armaduras que compõem tais camadas.

d) Armaduras retangulares de pressão

Estas armaduras são utilizadas para prevenir a superposição de espiras na camada de armaduras ZETA durante curvaturas excessivas. Apresenta também boa resistência à Pressão Interna. Ela só é utilizada em combinação com uma camada de INTERTRAVADA e outra camada do tipo ZETA , ambas enroladas no sentido de inclinação positiva. Para manter a

simetria, esta camada de armadura retangular é enrolada no sentido negativo, i.e. no sentido contrário à primeira armadura, que no caso da COFLEXIP é sempre a carcaça intertravada. Análogamente à armadura do tipo ZETA, só é conhecido um tipo de armadura retangular de pressão de dimensões (7.5x11). O aço utilizado é o FM 75-3, de resistência um pouco superior ao FM 18-3, utilizado nas armaduras ZETA.

$$E = 2.1 \times 10^5 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$n = 2.0$$

$$e = 7.5$$

$$b = 11.0$$

$$A = e \times b$$

$$\sigma_Y = 1400 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_R = 1580 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\alpha = 85 \text{ a } 80 \text{ graus (Variável)}$$

e) Armaduras retangulares de tensão

O aço utilizado é o FM-75-3, sendo que para manter a simetria na distribuição de tensões e deformações, estas armaduras são dispostas em camadas pares de 2 4 ou 6 pliegues. A primeira camada é enrolada no mesmo sentido da primeira armadura de pressão, e o seu par correspondente no sentido contrario.

Estas camadas de armaduras tem como objetivo básico

resistir as forças axiais e podem deslizar livremente entre si. O espaçamento entre as armaduras de tração (j) é variável, podendo em certos casos se reduzir a zero.

A área real destas espiras é função da espessura das camadas e fica sempre em torno a 90% da área nominal. As seções conhecidas de armaduras de tração utilizadas por este fabricante são (1x3), (2x5), (3x6), (3.1x6). Um detalhe importante é que o número de espiras por camada deve ser calculado juntamente com o ângulo de assentamento, o que diminui a certeza nestes dois parâmetros, caso os mesmos sejam desconhecidos pelo usuário durante uma consulta.

$$n_1 = 0.9 \cdot \frac{\pi \cdot D_{int} \cdot \cos(\alpha)}{b_1} \quad (5.3)$$

Caso (α) não seja conhecido, estipulamos um valor de partida para o mesmo em função das seguintes afirmações :

- As armaduras de tração são sempre $(\alpha \leq 55^\circ \text{C})$
- Caso não existam armaduras ZETA ou RETANGULAR de pressão reforçando a carcaça, $(\alpha = 55^\circ \text{C})$;
- Caso ZETA faça parte da sua estrutura interna, teremos então $(\alpha \leq 35^\circ \text{C})$
- Os ângulos (α) das armaduras de tração variam de 5 em 5 graus até o seu limite superior.
- Caso (n_1) seja conhecido, a melhor maneira de determinar (α) é com ajuda da expressão (5.3). Para efeito de verificação utilizar também (5.2).
- A melhor maneira de testar a certeza do ângulo estipulado é rodar o programa de análise com a força axial

atuante equivalente à força axial de colapso nominal, as vezes fornecida nos relatórios técnicos. Caso a carcaça esteja muito longe da tensão de colapso, mudar o ângulo (α) até obter o valor certo.

V.5.2.2 Especificação dos materiais utilizados pelo fabricante PAG-O-FLEX

As armaduras utilizadas pela PAG-O-FLEX na sua linha de tubos flexíveis comerciais são :

- Armadura de pressão de seção circular
- Armadura de pressão de seção retangular
- Tubo corrugado
- Armadura de tração : Cordoalhas de aço revestidas com cobre.
- Camadas de elastômero composto
- Camadas de elastômero homogêneas

Em função da bibliografia disponível para deste fabricante as armaduras mais utilizadas são : Cordoalhas e espira retangular.

a) Espira retangular de pressão

A finalidade desta armadura já foi comentada anteriormente. As características específicas do aço são:

Identificação : DIN 17140 D63-2

$$\sigma_R = 1320 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\epsilon_Y = 1.2 \quad \%$$

$$A = 6.5 \times 10 \quad \text{mm}^2$$

$$e = 6.5 \quad \text{mm}$$

$$n = 1.0$$

$$\alpha = 88 - 85 \quad \text{graus (variável)}$$

$$L = 13 \quad \text{mm}$$

b) Cordoalhas

As cordoalhas são característica particular dos tubos do tipo "BONDED" ,geralmente são dispostas em pares contrapostos em torno do ângulo neutro.No caso específico da PAG-O-FLEX , estes ângulos variam de 48 a 53 °C,e o seu número de armaduras por camada pode ser obtido com (5.3).

Tem a função específica de resistir os esforços de tração axial ,torsão axial e pressão interna.O revestimento de cobre melhora a aderência entre as cordoalhas e o elastómero embebido entre as mesmas.Para evitar que as armaduras contínuas entrem em contato,uma fina camada de elastómero composto é montada entra as mesmas.O cálculo da área metálica das cordoalhas é dado por :

$$A = 127 \cdot \omega \quad (5.4)$$

$$A = \frac{n^* \cdot d^* \cdot \pi^2}{4} \quad (5.5)$$

onde ;

n^* = No de fios / cordoalha

d^* = Diâmetro do fío

$$A = C1 \cdot d^2 \quad (5.6)$$

onde ;

C1 = Fator de multiplicação

d = Diâmetro da cordoalha

Os dois tipos de cordoalhas padrão utilizados na linha comercial da PAG-O-FLEX são :

Especificação	TIPO 1	TIPO 2
Fabricante	NV BEKAERT SA	G. WOLF
Tipo de construção	7x7x0.25	(3x0.6 + 6x0.45) + 12x0.7
Passo do fíos (mm)	12.5/20	18/32.4
Diâmetro nominal (mm)	2.25	3.62
Força de ruptura (N)	5400	18350
Densidade linear (g/m)	19.7	61.3

c) Elastômeros compostos

Não existe na bibliografia disponível uma descrição bem detalhada do tipo de compostos usados pela PAG-O-FLEX para montar as suas camads plásticas. O módulo de elasticidade equivalente é calculado no TUBFLEX para o cálculo das tensões cizalhantes longitudinais (τ_L), no elastômero confinado entre as armaduras de uma mesma camada, as quais tem uma participação importante nas equações de equilibrio

apresentadas no capítulo II.

Os parâmetros necessários para o cálculo deste módulo equivalente deverão ser fornecidos pelo usuário :

- Elasticidade da matriz de elastômero (E_c)
- Elasticidade das fibras (E_f)
- Coeficiente de Poisson da matriz (ν_c)
- Coeficiente de Poisson da fibra (ν_f)
- Passo das fibras (L_f)
- Densidade da matriz e das fibras (γ_c, γ_f)
- Parcela volumétrica das fibras (V_f)

Caso estes valores não possam ser determinados a priori pelo usuário ,o sistema tentará a sua determinação aleatória no terceiro estágio da base.

Capítulo VI

Comparação de Resultados

A comparação de resultados do sistema FRAES será feita avaliando o rendimento dos usuários especialistas e não especialistas com e sem a utilização do mesmo ,com o objetivo de verificar se os objetivos propostos foram alcançados.

Dentro do conjunto de possíveis usuários, escolhemos para efeito de validação do critério de aceitação do sistema por parte do usuário, tres pessoas com diferentes níveis de conhecimento de risers flexíveis. Sendo o FRAES um protótipo de aquisição de dados ,serão avaliados os seguintes conceitos : Qualidade do resultado e Tempo gasto na sua obtenção.

Nas tabelas 6.1 e 6.2 apresentamos as fichas técnicas que os fabricantes COFLEXIP e PAG-O-FLEX costumam fornecer aos seus clientes. Em ambos casos observamos a falta total de uma descrição detalhada da seção transversal de cada tipo de armadura que compõe a estrutura interna do riser flexível, tais como área de seção transversal, número de armaduras por camada, ângulo de assentamento entre outros, que se constituem parâmetros importantes na análise estrutural dos mesmos.

LAY	DESCRIPTION	K/MM2	K/M	ID. mm	TH. mm
1	INNER INTERLOCKED CARCASS	54	6.26	101.6	4.0
2	PRESSURE POLYAMIDE SHEATH		1.87	109.6	5.0
3	CROSSWOUND TENSILE ARMOURS	140	10.97	119.6	4.0
4	ADHESIVE TAPE		0.16	127.6	0.5
5	EXTERNAL POLYAMIDE SHEATH		2.18	128.6	5.0

THEORETHICAL CHARACTERISTICS		ENGLISH	METRIC
DIAMETER	inside	4.00 in	101.60 mm
	outside	5.46 in	138.60 mm
VOLUME	internal	0.087 cf/ft	8.11 l/m
	external	0.162 cf/ft	15.09 kg/m
WEIGHT	in air empty	14.4 lb/ft	21.4 kg/m
	in air full of sea water	19.9 lb/ft	29.7 kg/m
	in sea water (empty)	4.0 lb/ft	6.0 kg/m
	in sea water (full)	9.6 lb/ft	14.30 kg/m
STIFFNESS A 20° C (EI)		6353 lb*ft ²	267 daN*m ²
TORSION A for -10 m*kg and 1T (F)			0.022 °/m
TORSION A for +10 m*kg and 1T (F)			0.022 °/m
INTERNAL DAMPING COEFFICIENT			0.05
DRAG COEFFICIENT			1.20
FRICTION FACTOR STRUCTURE/SEA-BOT.			0.70
FRICTION FACTOR PLASTIC/STEEL			0.10
LIFT COEFFICIENT			0.92

TABELA 6.1 : Ficha tecnica de produto COFLEXIP

No.1 Pipe Code : 0201134 - Date: 02.08.89
 Inner Diameter : 50 mm Outer diameter : 129 mm

Elastomer liner (SE) : 4.0 mm	}	(Anti-Abrasion layer)
Adhesion layer (HA) : 0.7 mm		
Fabric (GE) : 2.4 mm		
Adhesion layer (HA) : 0.7 mm		
Spiral (SP) : 15 mm x 3 mm x 18 mm		
Adhesion layer (HA) : 0.7 mm	}	(Anti-Extrusion lay.)
Fabric (GE) : 1.2 mm		
Adhesion layer (HA) : 0.7 mm		
Steelcord (ST) \varnothing : 3.62 mm / $\alpha = 53^\circ$ / LZ=2 / FPL=38		
Adesion layer (HA) : 1.4 mm		
Cover (DE) : 8.0 mm		

Em função da bibliografia disponível processamos interativamente o TUBFLEX com arquivos de entrada de dados confeccionados pelos usuários que chamaremos de (U1), (U2) e (U3). Uma observação importante é que independentemente do tipo de tubo, os usuários não especialistas, devido á falta de conhecimento especializado, não conseguem obter resultados satisfatórios e a qualidade dos mesmos é diretamente proporcional ao número de consultas feitas ao especialista. Na figura 6.1 analisamos as curvas de rendimento dos usuários referentes á QUALIDADE DE RESULTADOS/TEMPO CONSUMIDO. Nos primeiros intervalos observamos que os usuários não especialistas ,i.e., (U1), (U2) e (U3) apresentaram em diferentes níveis ,um comportamento similar onde os parâmetros de análise explícitos nos diversos relatórios disponíveis são estabelecidos num tempo relativamente curto. Após esta primeira etapa de aquisição de parâmetros de análise, os usuários não especialistas apresentam grandes dificuldades em reconhecer e melhorar a qualidade dos resultados obtidos e em certas ocasiões até em determinar os parâmetros desconhecidos, ocasionando uma considerável perda de tempo sem aumento substancial de produtividade.

Quando analisamos o rendimento do especialista, observamos que bons resultados são obtidos em um curto espaço de tempo. Constatamos também que o mesmo tem condições de estabelecer alternativas de análise imprevisíveis que fatalmente produzem melhoras nos resultados, assim como a facilidade de detectar os parâmetros incertos que devem ser corrigidos até a obtenção de

resultados satisfatórios.

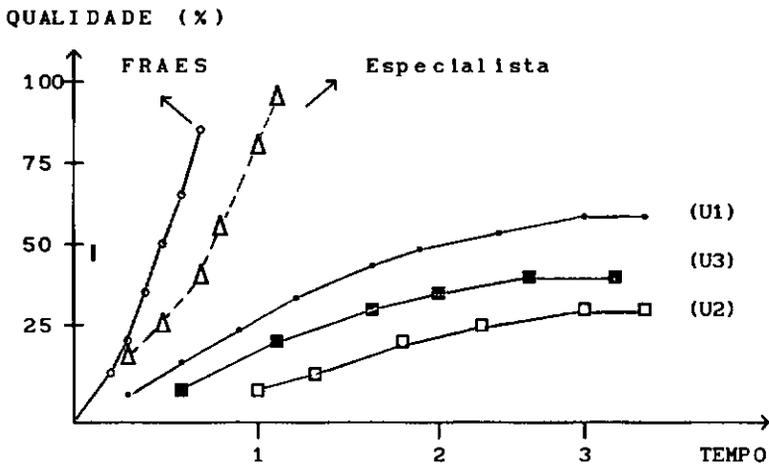


FIGURA 6.1 : Qualidade de resultados vs. tempo consumido

Por outro lado, sendo o FRAES um (SE) cuja (BC) contém apenas uma parcela do conhecimento do especialista observamos que o mesmo atinge como era de se esperar um coeficiente de rendimento inferior, mas em compensação proporciona um ganho de tempo considerável, pois o conhecimento codificado é processado com maior velocidade.

Deve-se ressaltar que o aparecimento de novas combinações de camadas ou tipo de material dentro da linha comercial de tubos flexíveis conhecidos, requer a prévia manutenção do sistema e a posterior aprovação dos especialistas e dos usuários num processo que não interfere no funcionamento normal do conhecimento codificado a priori.

Lembramos também que no FRAES não foram feitas modificações no modelo matemático de Análise de Risers apresentado no capítulo II, por tanto, a parcela de erro nos resultados decorrente das hipóteses simplificadoras e das

tensões residuais nas diversas camadas ,comentado em [2],continúa existindo.

ERRO		ERRO DO		ERRO DE
TOTAL	=	MODELO	+	DADOS DE
(Tubflex)		MATEMATICO		ENTRADA

ERRO		ERRO DO
TOTAL	=	MODELO
(FRAES)		MATEMATICO

Capítulo VII

Conclusões

Foi constatado no decorrer deste trabalho, que um dos problemas crônicos de um projeto de (SE) é o tempo consumido na aquisição de conhecimentos durante as entrevistas dos engenheiros de conhecimento com os especialistas. Este tempo é reduzido consideravelmente caso os especialistas participem mais ativamente na elaboração da base, após adquirir os conhecimentos básicos sobre a arquitetura e funcionamento de um (SE).

No que se refere ao tempo de processamento do sistema FRAES até atingir os objetivos propostos, verificamos que o mesmo não ultrapassa 5 minutos, sendo que o conhecimento nele representado é fruto de um trabalho de pesquisa de dois anos, nos quais a principal dificuldade encontrada foi a obtenção de informação por parte dos fabricantes, interessados como era de se esperar, em vender os seus produtos, evitando fornecer informações que permitam à PETROBRAS avaliar a qualidade e tempo de vida útil dos mesmos.

A heurística codificada no (SE) resultante, se deve em grande parte ao estudo paramétrico realizado durante a etapa de validação do modelo matemático utilizado no programa TUBFLEX, onde a dificuldade encontrada para a obtenção de resultado de testes também foi grande devido à complicada composição da sua estrutura interna que impede a medição de tensões e deformações nas diversas camadas de

armaduras. Estes testes não foram feitos no Brasil devido ao alto custo dos tubos e principalmente dos conectores, os quais só podem ser utilizados uma vez.

No que se refere á implementação computacional do sistema, encontramos inúmeras dificuldades devido ás limitações da versão do ambiente disponível ,o ESE (Expert System Enviroment) da IBM. A falta de recursos tais como interface com rotinas externas e processadores gráficos, ocasionou um aumento substancial no número de regras e parâmetros utilizados para atingir os objetivos propostos.

Do ponto de vista acadêmico, constatamos que a utilização de sistemas especialistas na engenharia torna-se prioridade ,pois com o avanço da tecnologia criam-se áreas de desenvolvimento cada vez mais específicas e de difícil acesso para os engenheiros "não especialistas" que desejem utilizar estas parcelas especializadas de conhecimento no decorrer de um projeto, ou de uma pesquisa.

O aproveitamento de (SE) na nossa área, torna-se realidade desde o momento em que aparecem os primeiros pacotes de software produzidos especificamente para aplicações de engenharia. Assim, paralelamente á pesquisa direcionada a resolver problemas crônicos no âmbito da análise estrutural tais como redução do tempo de resolução de algoritmos ou controle e armazenamento de estruturas de dados ,podemos agora pensar em codificar a parte qualitativa da análise numérica abrindo um novo campo de investigação no que se refere á ajuste fino de parâmetros antes e durante a análise, projeto e dimensionamento de peças estruturais em função das normas vigentes, diagnóstico e detecção de falhas

estruturais, tomada de decisões em análises probabilísticas e outros tipos de problemas que precisem de uma ou de outra forma, de interpretação dos resultados numéricos obtidos com os programas de análise convencionais.

Esperamos com este trabalho ,contribuir para esta nova área de pesquisa,desmistificando assim o conceito do Engenheiro sobre a matéria, e evidenciando o quanto que o desenvolvimento de um (SE) pode ser útil em problemas que independentemente dos diversos algoritmos perfeitamente representados na computação convencional,exista uma constante interação entre o usuário e a tecnologia correspondente.

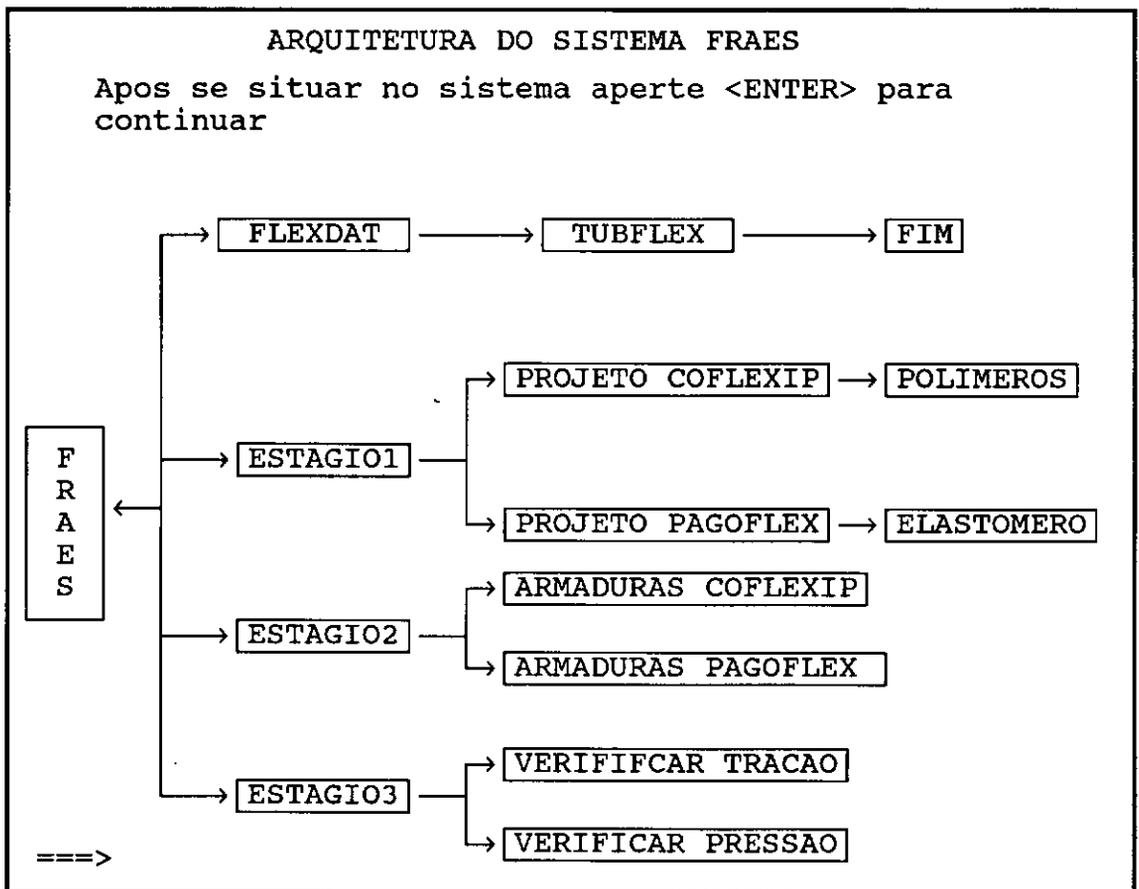
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BATISTA, R. C.; EBECKEN, N. F. F (1988), "Análise do Comportamento Mecânico local de Risers Flexíveis", COPPE/Engenharia Civil, U.F.R.J.
- [2] BATISTA, R. C.; EBECKEN, N. F. F; BOGARIN, J. A. G (1989), "Implantação de Procedimentos Computacionais para Análise do Comportamento Mecânico Local de Risers Flexíveis", COPPE/Engenharia Civil, U.F.R.J.
- [3] FERET, J. J; BOURNAZEL, C. L.; RIGAUD, J. (1986). "Evaluation of Flexible Pipes Life Expectancy under Dynamic Conditions", 18th Annual O.T.C., Houston, Paper No 5230, pg 83-90.
- [4] FERET, J. J; BOURNAZEL, C. L. (1987), "Calculation of Stresses and Slips in Structural Layers of Unbonded Flexible Pipes", Journal of OMAE, August-vol. 109, pg 263-269.
- [5] MC NAMARA, J. F. and HARTE, A. M. (1989), "Three Dimensional Analytical Simulation of Flexible Pipe Wall Structure", 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, The Hague, 1989.
- [6] OLIVEIRA, J. G.; GOTO, Y.; OKAMOTO, T. (1985), "Theoretical and Methodological Approaches to Flexible Pipe Design and Application", 18th. Annual OTC, Houston, paper No 5021, pg 517-526.
- [7] TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N., "Theory of

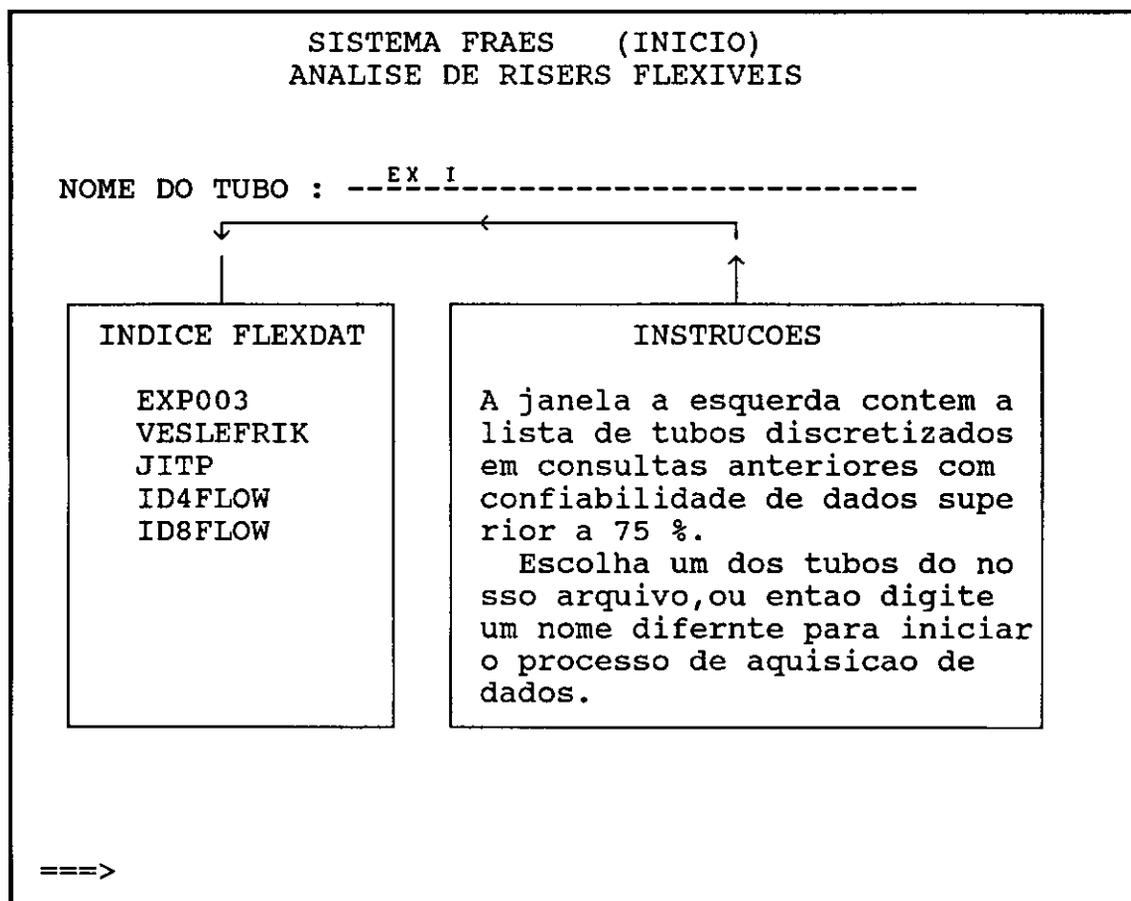
- Elasticity", McGraw-Hill; Kogakusha, Tosho Printing Co. Ltd. Tokyo, 1970.
- [8] TIMOSHENKO, S. P.; WOINOSKY, S.; KRIEGER "Theory of Plates and Shells", McGraw-Hills, Kogakusha, Yosho Printing Co. Ltd, Tokyo 1975.
- [9] TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M., "Theory of Elastic Stability", McGraw-Hills, Kogakusha, Yosho Printing Co. Ltd, Tokyo 1975.
- [10] PENDERSEN, K, "Expert System Programming: Practical Techniques for rule-based Systems", Jonh Willey and sons, Inc, New York, 1989.
- [11] "Expert System Applications : EXPERSYS-89" IITT-International Advisory Committee, Gournay-Sur, Marne-France, 1989.
- [12] PAYNE E. C; MCARTHUR R. C, "Developing Expert Systems : A Knowledge Engineer's Handbook for Rules and Objects", John Wiley and sons, 1990, New York, USA.
- [13] IBM Corporation 1986c., "Expert System Development Enviroment User' Guide", SC38-7006-02, IBM Corporation, Cary, North Carolina, USA.
- [14] IBM Corporation 1986c., "Expert System Consultation Enviroment User's Guide", SC38-7005, IBM Corporation, North Carolina, USA.
- [15] IBM Corporation 1986c., "Expert System Enviroment Reference Manual", SC38-7004, IBM Corporation, North Carolina, USA.

APÊNDICE

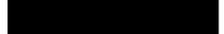
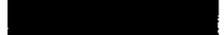
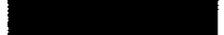
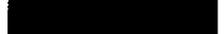
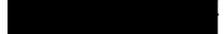
Um mapeamento é feito no início da consulta para situar ao usuário dentro do sistema. Com a árvore, o mesmo tem condição de determinar as diferentes parcelas de conhecimento da versão atual sem se preocupar com a leitura dos manuais do usuário correspondentes.



A primeira pergunta do FRAES define o objetivo do usuário. Caso ele deseje partir para a análise deverá escolher um dos nomes de tubos disponíveis no arquivo FLEXDAT. Para ativar a parcela de conhecimento referente a aquisição de dados, o usuário deve fornecer um nome diferente aos reservados na janela "INDICE FLEXDAT"



A rotina gráfica é ativada ,mostrando a seção transversal do tubo escolhido.Procede-se tambem á leitura integral de todos os parâmetros referentes ao tubo em questão.

FRAES (Rotina grafica)		
Analise de risers flexiveis		
Nome do Tubo	:	VESLEFRIK
Fabricante	:	PAG-O-FLEX
Tipo de tubo	:	BONDED
Diametro Interno	:	8 (Polegadas)
Pressao de Trabalho .	:	10000 (Psi)
Confiabilidade	:	83 %
1- Camada interna de elastomero <SE>		190.7
2- Camada interna de elastomero <HA>		200.7
3- Camada interna de elastomero <GE>		203.1
4- Camada interna de elastomero <HA>		206.9
5- Armadura de pressao RETANG. <SP>		208.3
6- Camada impermeavel de elast. <HA>		221.3
7- Camada impermeavel de elast. <GE>		222.7
8- Camada impermeavel de elast. <HA>		225.1
9- Cordoalha No 1 $\alpha=50$ $\phi = 3.62$ <ST>		226.5
10-Cordoalha No 2 $\alpha=-50$ <ST>		235.2
11-Cordoalha No 3 $\alpha= 50$ <ST>		243.9
12-Cordoalha No 4 $\alpha=-50$ <ST>		252.5
13-Camada externa de elastomero <HA>		259.8
14-Camada externa de elastomero <DE>		262.6
APERTE < E N T E R > PARA CONTINUAR		

Caso o usuário identifique positivamente o tubo , apertando <ENTER> ativará o mecanismo de interface com o programa TUBFLEX ,pois o arquivo de dados necessários para a análise mostrou ter uma confiabilidade superior a 75 %

A continuação apresentamos os resultados obtidos durante uma consulta do FRAES para produtos COFLEXIP.

Focus : Estagio 1

-What-- O objetivo e personalizar a analise em funcao das caracteristicas de cada fabricante.

Qual e o fabricante do tubo EX I ?

(Choose one of the following)

COFLEXIP
 FURUKAWA
 PAGOFLEX
 TAURUS
 DUNLOP

PF1 Help
PF2 Review
PF3 End
PF4 What
PF5 Question
PF6 Unknown
PF7 Up
PF8 Down
PF9 Tab
PF10 How
PF11 Why
PF12 Command

Os parâmetros de multipla escolha podem ser selecionados marcando um " X " e apertando < ENTER >. Na janela no canto superior direito temos a lista de facilidades do FRAES. Escolheremos então um tubo da COFLEXIP.

Os comandos mais utilizados durante uma consulta são :

- WHAT : O sistema fornece mais informação sobre o parâmetro em questão.

- HOW : O sistema apresenta o conjunto de regras que serão consideradas para tentar determinar o valor do parâmetro, justificando assim a escolha do procedimento adotado. Esta opção permite que o usuário tenha conhecimento do raciocínio utilizado nos diversos estágios, a diferença da programação convencional, onde só se tem acesso à entrada e saída de resultados.

Focus : Estagio 1	
-What-- Sem o valor do diametro interno e impossivel pro jetar o tubo para voce	PF1 Help
	PF2 Review
	PF3 End
	PF4 What
	PF5 Question
	PF6 Unknown
	PF7 Up
	PF8 Down
	PF9 Tab
	PF10 How
	PF11 Why
	PF12 Command
Qual e o diametro interno do tubo ?	
(Choose one of the following)	
---- 2 Polegadas = 50.8 mm	
---- 3 76.2 mm	
---- 4 101.6 mm	
---- 6 152.4 mm	
-x-- 8 203.2 mm	
---- 12 304.8 mm	
---- 16 406.4 mm	
---- 20 508.0 mm	

Antes de escolher o diâmetro perguntamos WHAT para o sistema e tivemos a resposta correspondente.

Outra característica fundamental de projeto do tubo é a pressão interna de trabalho, pois junto com o valor do DIÂMETRO INTERNO e do FABRICANTE o sistema tem condições de projetar as camadas para você.

Focus : Estagio 1

```
HOW -- If diametro_interno < 4
      and pressao_de_trabalho
      < 10000 then retira_camada
      is 'Armadura de pressao ZETA'
```

Qual e a Pressao de trabalho
do tubo ?

(Choose one of the following)

PF1	Help
PF2	Review
PF3	End
PF4	What
PF5	Question
PF6	Unknown
PF7	Up
PF8	Down
PF9	Tab
PF10	How
PF11	Why
PF12	Command

----	1000	Psi	=	68.67	bar
----	1500		=	103.0	
----	2500		=	171.7	
----	3000		=	206	
----	5000		=	343	
----	8000		=	549	
-x---	10000		=	686.7	
----	12000		=	824	

Antes de escolher o valor da pressão de trabalho , apertamos "HOW" e o sistema mostra a parcela de conhecimento para a qual a determinação da PRESSAO_DE_TRABALHO torna-se necessaria.

Em função das características básicas definidas , é ativado o mecanismo de BACKWARD CHAINING com o objetivo de determinar o parâmetro "DESCRIÇÃO_DAS_CAMADAS" que contem a lista de camadas que o usuário deseja discretizar.A determinação desta lista segue uma linha de raciocinio heurístico em função da lista de produtos comerciais da COFLEXIP.

Focus : Estagio 1

-What-- Projetaremos o tubo para voce,em funcao da combina cao das armaduras de press ao.

Qual e o tipo de combinacao de armaduras utilizado no tubo EX I Lembre-se que as armaduras de pre ssao sao caracterizadas pelo seu angulo com o eixo do tubo inferior a 55 graus ???

(Choose one of the following)

- | | |
|------|----------|
| PF1 | Help |
| PF2 | Review |
| PF3 | End |
| PF4 | What |
| PF5 | Question |
| PF6 | Unknown |
| PF7 | Up |
| PF8 | Down |
| PF9 | Tab |
| PF10 | How |
| PF11 | Why |
| PF12 | Command |

- INTERTRAVADA
- ^x---- INTERTRAVADA + TIPO Z
- INTERTRAVADA + TIPO Z + RETANGULAR

Caso o usuário saiba esta combinação ,são desprezadas ou não as camadas opcionais no projeto em questão.Lembramos que o usuário a qualquer instante durante a consulta pode responder "Não sei" apertando a tecla <PF6>.Existe uma parcela de conhecimento preparada para trabalhar com parâmetros desconhecidos.

As camadas protetoras opcionais não podem ser representadas com regras ,pois a escolha depende das características particulares de cada projeto.

Sendo camadas Opcionais ,a escolha fica por conta do usuário.

Focus : Estagio 1

A CARCASSA INTERTRAVADA INTERNA
esta protegida com uma camada
plastica ???

(Answer YES / NO)

---- SIM
-x-- NAO

PF1	Help
PF2	Review
PF3	End
PF4	What
PF5	Question
PF6	Unknown
PF7	Up
PF8	Down
PF9	Tab
PF10	How
PF11	Why
PF12	Command

Focus : Estagio 1

-What-- O objetivo da carcassa externa e proteger a camada plastica impermeabilizante

Esta o tubo recoberto com uma carcassa externa intertravada ?

(Answer YES/NO)

---- SIM
-x-- NAO

PF1	Help
PF2	Review
PF3	End
PF4	What
PF5	Question
PF6	Unknown
PF7	Up
PF8	Down
PF9	Tab
PF10	How
PF11	Why
PF12	Command

Após aproximadamente 5 segundos o sistema chega a um resultado final determinando a lista de camadas que compõem a estrutura interna do tubo e pedindo para o usuário dimensionar as espessuras das mesmas.

O ESTAGIO I da análise está completo pois o objetivo principal que era projetar as camadas foi cumprido, após o usuário fornecer as espessuras.

*** F.R.A.E.S. (Estagio No 1) ***
DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA INTERNA DO RISER

FABRICANTE : COFLEXIP
DIAMETRO INTERNO : 8 (POLEGADAS)
PRESSAO DE TRABALHO : 3000 (Psi)
TIPO DE TUBO : UNBONDED
Dimensione o tubo com as espessuras de cada camadas
Aperte < ENTER >

DESCRICAO DAS CAMADAS	ESPESSURA
1- Carcaca interna intertravada de ACO INOX	-----
2- Camada impermeabilizante de RILSAN B	-----
3- Armadura de pressao ZETA de aco especial	-----
4- Camada Antitrito de RILSAN B	-----
5- Armaduras de tracao RETANGULAR de aco esp.	-----
6- Fita adesiva	-----
7- Camada externa plastica de RILSAN B	-----

==>

Sendo o tubo da COFLEXIP o sistema procura as características específicas das camadas plásticas, que variam de fabricante em fabricante, personalizando desta maneira a análise do tubo, principalmente no ESTAGIO II durante a determinação dos parâmetros das armaduras de reforço.

A tabela abaixo fornece toda a informação necessária para a discretização de uma camada plástica de um tubo COFLEXIP.

**ANALISE DE RISERS FLEXIVEIS
TABELA DE POLIMEROS DA COFLEXIP**

1- IDENTIFICACAO

- A- Tipo : Nylon 11
- B- Codigo do fabricante : Rilsan B OP40
- C- Fabricante : Aquitania Total Organico
- D- Identificacao no TUBFLEX : "POL"
- E- Identificacao no FLEXPIPE : "1"

2- DADOS IMPRESSINDIVEIS

- A- Densidade : 1038 k/m³
- B- Elasticidade : 343 N/mm²
- C- Poisson : 0.3
- D- Tensao Ruptura: 59 N/mm²
- E- Tensao Escoam.: 14 N/mm²
- F- Alongamento R.: 260 %
- G- Alongamento E.: 27 %

3- DADOS COMPLEMENTARES

- A- Viscosidade : 180 a 25°
- B- Gravidade esp : 1.05
- C- Atrito / ACO : 0.10
- D- Atrito / Pol : 0.07
- E- Taxa de desgaste : 0.67
- F- Sustancias Nocivas :
acidos nitrico/cromico,
ozonio, permang. potasio,
Cl, Br, Anilina, Piridina,
Fenois, Tetracl carbonico.

====>

A opção "WHY" foi acionada nesta tela antes de resolve-la onde o sistema apresenta para o usuário a regra que fez com que o mecanismo de inferência acione a pergunte em questão.

Focus : Estagio 2

--Why?-- If Peso_especifico is known
then there is 0.8 evidence
that angulo_carcaca is
ACOS (7850* carcaca_area /
peso_especifico)

Qual e o peso especifico em k/m
da Carcaca Intertravada ???

(Is a number)

PF1	Help
PF2	Review
PF3	End
PF4	What
PF5	Question
PF6	Unknown
PF7	Up
PF8	Down
PF9	Tab
PF10	How
PF11	Why
PF12	Command

Esta pergunta responderemos com a tecla <PF6> para analisar como o sistema trabalha com dados desconhecidos. Este parâmetro em particular terá influência na determinação do ângulo de assentamento da armadura.

Focus : Estagio 2

Qual e o peso especifico em K/m
da armadura de secao ZETA ???

(Is a number)

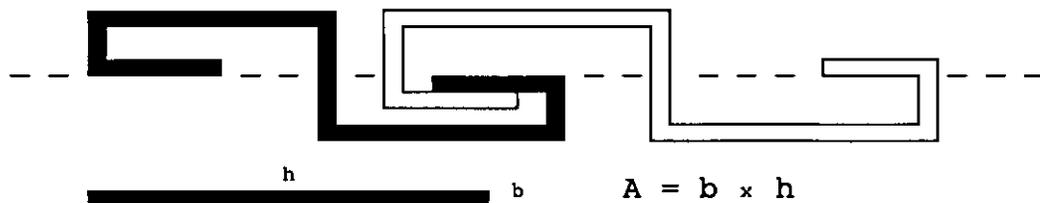
PF1	Help
PF2	Review
PF3	End
PF4	What
PF5	Question
PF6	Unknown
PF7	Up
PF8	Down
PF9	Tab
PF10	How
PF11	Why
PF12	Command

====>

No ESTAGIO II , a base de conhecimento tem condições de determinar as características físicas e mecânicas dos diferentes tipos de armadura utilizados no tubo em questão, pois em função da complexidade da montagem ,a empresa fabricante utiliza armaduras de seção transversal padrão, escolhidas em função das resistências desejada.

As tabelas de armaduras apresentam um corte da seção transversal das mesmas , assim como também toda a informação necessária para a análise estrutural de risers flexíveis.

CARCACA INTERTRAVADA
SECAO TRANSVERSAL APROXIMADA



PARAMETROS DE ANALISE

- 1- Angulo (α) : 87.68 (.8) °C
- 2- Area : 160 mm²
- 3- Numero de espiras : 1
- 4- Elasticidade : 2.1E+5 N/mm²
- 5- Coeficiente de Poisson : 0.3
- 6- Tensao de Escoamento : 490 N/mm²
- 7- Tensao de Ruptura : 540 N/mm²
- 8- Peso linear : 31 K/m
- 9- Dimensoes : 2 x 80
- 10- Posicao : Camada No 1 (de dentro para fora)

==>

No caso da armadura do tipo ZETA , observamos que o sistema determinou o ângulo com um fator de certeza de 70 % em função dos dados conhecidos a priori.

CARCACA INTERTRAVADA
SECAO TRANSVERSAL APROXIMADA



PARAMETROS DE ANALISE

- 1- Angulo (α) : 86. (.7) ° C
- 2- Area : 86.8 mm²
- 3- Numero de espiras : 2
- 4- Elasticidade : 2.1E+5 N/mm²
- 5- Coeficiente de Poisson : 0.3
- 6- Tensao de Escoamento : 750 N/mm²
- 7- Tensao de Ruptura : 784 N/mm²
- 8- Peso linear : 33.7 (.7) k/m
- 9- Dimensoes : 6.2 x 14
- 10-Posicao : Camada No 3 (de dentro para fora)

==>

CARCACA INTERTRAVADA
SECAO TRANSVERSAL APROXIMADA



PARAMETROS DE ANALISE

- 1- Angulo (α) : 35 (.7) °C
- 2- Area : 18.6 mm²
- 3- Numero de espiras : 100
- 4- Elasticidade : 2.1E+5 N/mm²
- 5- Coeficiente de Poisson : 0.3
- 6- Tensao de Escoamento : 1400 N/mm²
- 7- Tensao de Ruptura : 2500 N/mm²
- 8- Peso linear : 71.3 (0.7) K/m
- 9- Dimensoes : 3.1 x 6
- 10-Posicao : Camada No 5 (de dentro para fora)
- 11-Numero de Plieques : 4

===>