

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Estudo das características do escoamento em um
sistema arterial e método de simulação numérica de
“compliance” de uma artéria**

**Carolina Tiemi Morisawa
Magali Assenço Nunes de Siqueira**

**Orientador: Jayme Pinto Ortiz
Co-orientador: Raul Gonzalez Lima**

**São Paulo
2003**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Estudo das características do escoamento em um
sistema arterial e método de simulação numérica de
“compliance” de uma artéria**

**Trabalho de formatura apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para a obtenção do
título de Graduação em Engenharia**

**Carolina Tiemi Morisawa
Magali Assenço Nunes de Siqueira**

**Orientador: Jayme Pinto Ortiz
Co-orientador: Raul Gonzalez Lima**

**São Paulo
2003**

AGRADECIMENTOS

À nossas famílias, que nos apoiaram durante esses longos anos.

Ao Dr. Jorge Roberto Buchler, pela assessoria médica.

Ao Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz, que nos ofereceu a oportunidade de ter contato com a Bioengenharia e nos estimulou a realizar um trabalho nessa área inovadora.

Ao Prof. Dr. Raul Gonzalez Lima, pela paciência e constante dedicação, fundamental para o sucesso desse estudo.

Carolina Morisawa
e
Magali Assenço

ÍNDICE

1	Introdução	2
2	Conceitos médicos	2
2.1	Contexto histórico	2
2.2	Stent	3
2.3	Um problema real	6
3	Método de Elementos Finitos	7
3.1	Hipóteses adotadas	8
4	Análise Fluídica	8
4.1	Embasamento Teórico	8
4.2	Instalação do programa	10
4.3	Utilização do FEATFLOW	12
4.4	Resultados obtidos	21
5	Análise Estrutural	23
5.1	Instalação do Calculix	23
5.2	Breve Teórico	26
5.3	Utilização do CALCULIX	27
5.3.1	Obtenção da malha	27
5.3.2	Condições de Contorno	35
5.3.3	Entrada de Dados no Calculix	40
5.4	Resultados Obtidos	58
6	Conclusão	63
7	Bibliografia	64
8	Anexo	65
8.1	Anexo 1 – “St – Express 2” [6]	65

1 Introdução

O principal objetivo deste trabalho é estudar as características do escoamento em um sistema arterial humano obstruído e desenvolver um método de simulação numérica da “compliance” do sistema vascular.

Inicialmente será feita uma apresentação de conceitos médicos importantes para a compreensão geral do tema e o contexto atual nesse campo da medicina.

Além disso, serão apresentados os softwares utilizados e a descrição dos procedimentos adotados para a obtenção dos resultados finais.

Assim, foram realizadas modelagens de uma artéria obstruída sob o aspecto estrutural e o fluídico para a análise das características do escoamento, a qual será a base fundamental para futuros estudos que poderão trazer melhorias nas técnicas de stents.

2 Conceitos médicos

2.1 Contexto histórico

Para se ter uma noção, no biênio 1992/93, 16.429 pacientes foram submetidos ao procedimento percutâneos cardiovasculares, todos por meio do balão. A análise do biênio 1996/97 demonstra um crescimento de 33% na realização deste procedimento. Foram, então, tratados 24.667 pacientes no Brasil, sendo 44% dos procedimentos já com o implante dos stents coronarianos. No biênio seguinte, 1999/2000, o crescimento foi ainda maior, de 37%, com 39.469 enfermos submetidos à revascularização miocárdica percutânea, tendo a maioria dos procedimentos empregados stents [n=27.502 (69,7%)]. Já em 2001/2002, 11.744 pacientes ainda utilizaram apenas o balão e, em apenas 223 (0,6%) dos casos restantes, foi necessário outro dispositivo percutâneo (aterótomos ou laser). A supremacia dos stents coronarianos fica assim bem caracterizada. [1]

2.2 Stent

O stent é um tubo de aço expansível com poucos centímetros de comprimento, que é implantado na porção obstruída da artéria, geralmente nas regiões torácica ou abdominal, onde há risco de rompimento.

Existem vários tipos de stents no que diz respeito à forma estrutural, comprimento, diâmetro e pressão de insuflação. Seguem em anexo alguns catálogos de diferentes fornecedores para melhor visualização.

As artérias podem sofrer obstrução por causa do acúmulo de gordura e formação de placas no interior dos vasos com oclusão total ou parcial dos mesmos, de grau e extensão variáveis e de modo temporário ou definitivo. O crescimento da placa, reduzindo a luz coronária, é lento e gradual na maioria das vezes, com apresentação clínica estável. Tendo em vista que num estágio mais avançado pode ocorrer o infarto agudo do miocárdio, quando o estreitamento é acentuado, há, provavelmente, a necessidade de se realizar uma angioplastia.

O uso de stents vem sendo muito ampliado nas técnicas de angioplastia coronariana e muitas pesquisas vêm sendo realizadas sobre o assunto.

A angioplastia coronária é um tratamento intervencionista não cirúrgico e consiste na dilatação, com balão, de placas responsáveis pela manifestação clínica da insuficiência coronária. O balão, inicialmente, é introduzido através de uma artéria periférica e posicionado no local da lesão, onde é insuflado para dilatá-la, e retirado logo a seguir.

A primeira angioplastia percutânea com balão foi realizada pelo Dr. Andréas Gruentzig, em 16 de setembro de 1977, em Zurich, revolucionando a abordagem das lesões obstrutivas coronarianas e constituindo-se a partir deste momento numa alternativa ao tratamento clínico e cirúrgico dos pacientes.[2]

A angioplastia com balão mostrou-se um tratamento promissor na época, embora apresentasse índices elevados de oclusão aguda do vaso tratado. E também a chamada reestenose tardia: aproximadamente 50% das artérias com lesão voltavam a se obstruir, cerca de seis meses depois.

Em 1987, foi descrito pela primeira vez o uso de stents em seres humanos.

Nesse procedimento (vide figura abaixo) um cateter balão é passado pela artéria (1) e depois inflado para alargar o vaso (2). A parede coronária fica segura, então, pelo stent (3).



Figura 1 – Inserção de um stent

A utilização do stent determinou a drástica diminuição dos fenômenos oclusivos agudos e da reestenose (reobstrução) tardia do vaso tratado, que caiu para percentuais de 25 a 30%, após seis meses do implante da prótese (comparativamente com a angioplastia coronariana).

No entanto, a novidade do stent, trouxe também uma complicação denominada trombose sub-aguda, que aparecia no local do implante, em até 30 dias. Esse problema foi sanado com alguns procedimentos básicos, dentre eles o ajuste otimizado da endo-prótese, a utilização de drogas antiadesivas plaquetárias, como o AAS e derivados da Ticlopidina (Clopidogrel), e mais recentemente o abciximab, com potente efeito sobre o mecanismo plaquetário.

Além disso, em 20% dos casos de angioplastia com o implante, surge uma cicatriz muito grande, através da estrutura de metal, levando a um novo estreitamento da artéria (reestenose tardia) [3].

Portanto, o descobrimento de novas tecnologias para a melhoria desses stents evitaria a necessidade de novas incisões cirúrgicas.

Uma alternativa atualmente já utilizada é a implantação de stents recobertos por Rapamicina, a qual vai sendo liberada para a parede do vaso. Essa substância (também conhecida como Sirolimus ou Rapamune) foi isolada pela primeira vez em 1975, na Ilha de Páscoa, num microorganismo do solo, o *Streptomyces higroscopicus*. O composto levou o nome de Rapamicina, em homenagem à Rapa Nui, nome nativo da Ilha de Páscoa. A substância obtida, além de sua atividade antibiótica e antifúngica, também possui potente propriedade antiproliferativa, imunossupressora e comprovadamente inibidora do ciclo de proliferação celular.

Pesquisas vêm mostrando que a Rapamicina parece também ser útil contra a reestenose coronária na utilização via oral juntamente com stent sem droga.

No Congresso da Sociedade Européia de Cardiologia 2002, foram apresentados resultados preliminares do estudo "Oral Rapamycin to Inhibit Restenosis". Os autores mostraram que a rapamicina oral administrada ao mesmo tempo que a realização da angioplastia coronária com stent, foi bem tolerada e associada com baixas taxas de reestenose.[4]

Um desses autores, Dr Ron Waksman (Washington Hospital Center, Washington, DC), afirmou que os efeitos antiproliferativos da rapamicina liberada no próprio stent foram avaliados nos estudos RAVEL e SIRIUS. Tais estudos demonstraram taxas significativas de redução de reestenose, relata o autor. Contudo, nas doenças mais difusas, os stents com rapamicina tiveram menos sucesso conforme mostrou o estudo SIRIUS.

Além disso, os stents com liberação de droga têm um custo muito elevado, especialmente quando usados em pacientes com doença de múltiplos vasos. Considerando o custo elevado destes stents, os pesquisadores têm procurado encontrar uma forma mais custo efetiva para redução da reestenose coronária pós angioplastia.

Este procedimento via oral seria muito interessante, especialmente em pacientes que requerem múltiplos stents, posto que não se imagina implantar seis ou sete stents com droga em um mesmo paciente.

Portanto, a pesquisa de melhorias na tecnologia deste tipo de dispositivo será de grande valia para a sociedade e um importante avanço na medicina.

2.3 Um problema real

Para o desenvolvimento desse estudo foi acompanhado, pessoalmente, um processo de angioplastia coronariana, realizado pelo cardiologista Dr. Jorge Roberto Buchler o qual contribuiu com fornecimento de informações médicas e permitiu que se utilizassem dados de um de seus pacientes.

Nas figuras a seguir, pode-se visualizar imagens da artéria coronária direita obstruída e a mesma após a inserção do stent.

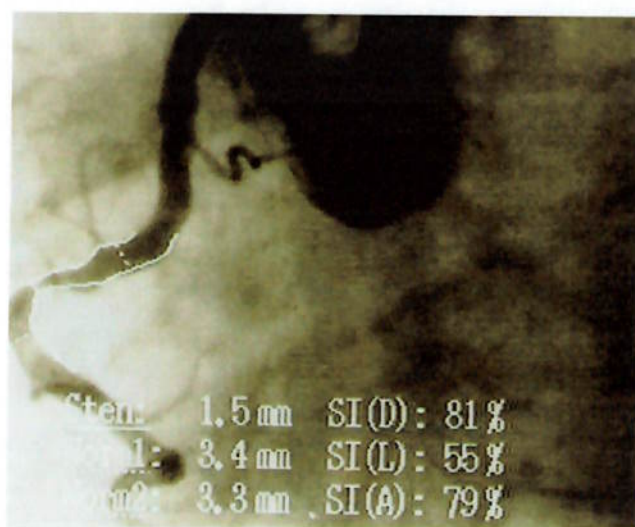


Figura 2 – Artéria obstruída

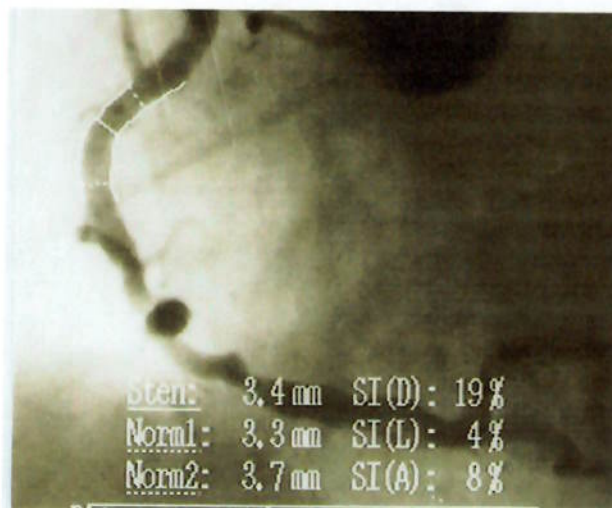


Figura 3 – Artéria desobstruída

Nesse paciente, especificamente, o stent inserido foi do tipo “St-Express 2” (vide anexo), cujas dimensões nominais são: 3,5mm de diâmetro e 21mm de comprimento. A pressão nominal de insuflação do balão, no caso, é de 15 atm.

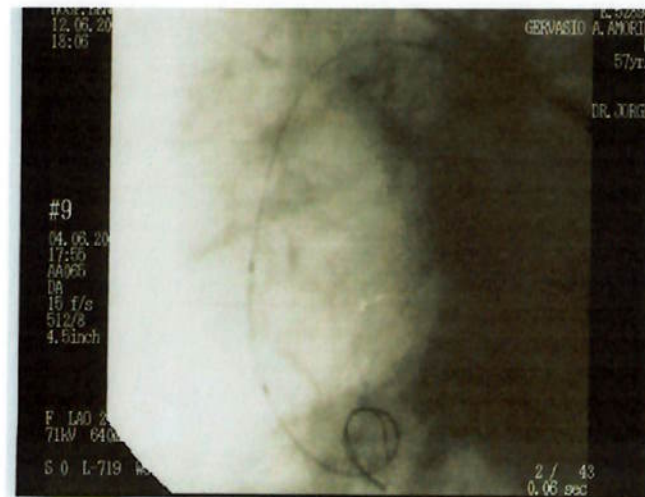


Figura 4 – Imagem do stent

Para acelerar o desenvolvimento da tecnologia de stents, além de simulações em vitro e estudos de casos, é necessário desenvolver a metodologia de simulação numérica de sistemas vasculares, incluindo a “compliance” dos vasos.

3 Método de Elementos Finitos

Esse estudo foi realizado através do Método de Elementos Finitos, sendo que o primeiro passo dado foi a obtenção de informações no que diz respeito à elaboração de “malhas” que auxiliem nas simulações das duas partes em que foi dividido o problema:

- Estrutural – que irá analisar o comportamento da parede do vaso através de dados de tensões e deslocamentos obtidos;
- Fluídica – referente à análise do fluxo sanguíneo, e, conseqüentemente, diz respeito aos campos de pressão e velocidade obtidos.

3.1 Hipóteses adotadas

As hipóteses adotadas para a realização do presente estudo estão listadas a seguir:

- Escoamento do sangue: incompressível, viscoso e newtoniano;
- Desprezadas as matrizes de viscosidade e massa referentes ao material que recobre a parede da artéria;
- Axissimetria: o que permite a elaboração de uma malha 2D para a parte fluídica, e da representação de apenas um quarto da malha para a parte estrutural;
- Regime quase estático, já que será considerada uma sequência de regimes permanentes;
- Desprezada a pressão dos tecidos que envolvem as artérias.

4 Análise Fluídica

Para a análise fluídica foi feito uso do FEATFLOW, sendo esse um software de Elementos Finitos usado para resolver equações de Navier- Stokes em escoamentos incompressíveis.

4.1 Embasamento Teórico [6]

O pacote de programas Featflow contém sub-rotinas que geram soluções numéricas para problemas que envolvem a equação de Navier-Stokes em espaços bidimensionais, como é o caso do presente estudo, e tridimensionais. A estrutura do software está dividida em 3 partes: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

A equação de Navier-Stokes para problemas incompressíveis e permanentes, (ou não permanentes, sem o termo u_t) para uma dada força f e viscosidade ν , com condições de contorno quaisquer em $\partial\Omega$ e como condição inicial $t = 0$ está exibida a seguir:

$$u_t - \nu \Delta u + u \cdot \nabla u + \nabla \cdot p = f$$

onde $\nabla u = 0$

no domínio:

$$\Omega \times (0, T)$$

Solucionar este problema numericamente, seria uma tarefa que levaria um longo período de tempo.

A correspondente discretização em sistemas não lineares de equações pode se tratar por uma aproximação em u e p , o que traz o comportamento de maior estabilidade, no entanto, acarreta o maior esforço numérico. Outra opção, conhecida como método da projeção, acoplado à pressão e velocidade, reduz a questão para uma solução de uma sequência de problemas simples (escalares).

Essas diferentes aproximações levam a grande variedade de esquemas, sendo que todos eles já vêm sendo utilizados há alguns anos. Considerações teóricas podem gerar algumas idéias, levando-se em conta a estabilidade desses esquemas, taxas de convergência para subproblemas, períodos de tempo necessários, ou comportamento qualitativo para altos valores de Reynolds, no entanto, uma análise completa ou prognóstico quantitativo ainda não é possível hoje. Por isso, a única maneira de se chegar a um resultado é realizando testes numéricos, pelo menos para algumas classes de problema.

O que foi alcançado é uma discretização em elementos finitos, e o procedimento para solução deve seguir as seguintes premissas:

- o espaço de elemento finito para u e p deve ser estáveis;
- existência de um solucionador robusto e eficiente disponível;
- existência de um solucionador de projeção robusto e eficiente;
- existência de uma estratégia para solução não linear eficiente disponível;

- existência de um controle eficiente de tempo.

O método que parece satisfazer todos esses requisitos consiste em um esquema de projeção discreto com não-conformidade linear ou elemento finito rotacionado multilinear para u e aproximações para p . Com essa aproximação, pode-se desenvolver um esquema de soluções bastante eficiente em ambos os tipos de projeção, com um tratamento especial linear ou não-linear de advecção. As soluções resultantes são coincidentes, desde que os intervalos de tempo sejam pequenos o suficiente, e não haja oscilações repentinas de pressão.

4.2 Instalação do programa

O procedimento de instalação usual é realizado da seguinte maneira:

Passo 1: Descomprimir e Desconcatenar ("Un -Tar")

Criação de um diretório chamado featflow ou similar, o qual conterá todos os dados do FEATFLOW. Normalmente tem-se a pasta featflow.tar.gz ou levi_file.tar.gz, a qual deve ser movida para o diretório criado e descomprimida:

gunzip featflow.tar.gz

Em seguida, deve-se tarrear:

tar ~xvf featflow.tar

Esse passo gera a estrutura completa do FEATFLOW e nesse ponto, a pasta featflow.tar pode ser removida.

Normalmente, todos os "makefiles" já estão preparados se está se trabalhando em uma plataforma "normal" (SUN, IBM, SGI, DEC, PC+LINUX, etc), de tal forma que os próximos passos tornam-se bastante simples.

Passo 2a: Instalação automática

Leitura do arquivo README e execução do seguinte script:

install_feat

Após a seleção da plataforma a ser utilizada, o procedimento de instalação é iniciado. Pode-se então avançar para o passo 3.

Caso se esteja trabalhando em uma plataforma não convencional, deve-se manualmente seguir os seguintes passos:

Passo 2b: Edição dos “makefiles” e scripts de instalação

O próximo passo é acessar **featflow/object/makefiles**. Existem diferentes subdiretórios correspondentes a vários tipos de computador e opções de compilação. Na não existência destes, deve-se copiar um para criar o próprio ou modificar os do exemplo. Assumindo-se que se está no diretório **featflow/object/makefiles/example**, os próximos passos são os seguintes:

- 1) Edição dos scripts **make_copy** e **make_lib**, e mudança das variáveis **FEATFLOW** contendo a localização correta e da variável “makefiles” no presente local.
- 2) Edição dos “makefiles” e modificação, se necessário, das opções de compilação. Essas linhas iniciam-se com **COMPT=**. Isso pode ser feito manualmente ou utilizando-se o **make_change**. Analogamente, as variáveis **FEATFLOW** devem ser definidas corretamente.

Passo 2c: Instalação

Assumindo-se que se está em **featflow/object/makefiles/examples**. A seguir deve-se proceder da seguinte maneira:

- 1) Certificar-se de estar utilizando um **C-shell/bin/csh**.
- 2) Certificar-se que o caminho **featflow/object/libraries/ligen** existe.
- 3) Certificar-se que a pasta correta **ztime.f** em **featflow/source/feat2d/src** está disponível.
- 4) Executar o comando **make_copy**
- 5) Executar o comando **make_lib**

Esse próximo passo deve levar de 10 a 60 minutos. Todas as bibliotecas são geradas e todos os "makefiles" necessários são copiados para **featflow/application/user_start**, **featflow/application/example** ou **featflow/application/comp**.

Passo 3: Teste e aplicação

Estando em **featflow/application/user_start**, **featflow/application/example** ou **featflow/application/comp**, pode-se iniciar uma aplicação ou criar um novo diretório.

4.3 Utilização do FEATFLOW

O primeiro passo nesse software é construir uma malha que represente o segmento obstruído da artéria. Para tanto, realizou-se um estudo dos arquivos de entrada de dados através de um exemplo contido no próprio programa, o que possibilitou, posteriormente uma adaptação para o caso em questão.

A seguir estão exibidas cópias dos arquivos mencionados com as respectivas explicações dos principais parâmetros.

"Arquivo .prm"

NBCT
1
IBCT
1
NCOMP

→ nº de contornos

→ parágrafo onde se inicia a curva de contorno

12 → nº de segmentos
 ITYP NSPLINE NPAR

1 1 2
 1 1 2
 1 1 2
 1 1 2
 1 1 2
 1 1 2
 1 1 2
 1 1 2
 1 1 2
 1 1 2
 1 1 2
 1 1 2

→ essa seqüência indica que se trata somente de segmentos de retas

PARAMETERS

0.00E-3 0.00E-3
 7.00E-3 0.50E-3

→ modo como variam os ptos. do contorno, sendo que cada segmento é representado por 2 linhas. A 1ª representa o pto.referido do segmento e a 2ª, a respectiva variação em x e y (unidade em metro)

7.00E-3 0.50E-
 7.00E-3 0.00E-3

14.00E-3 0.50E-3
 7.00E-3 -0.50E-3

21.00E-3 0.00E-3
 0.00E-3 1.00E-3

21.00E-3 1.00E-3
 0.00E-3 1.00E-3

21.00E-3 2.00E-3
 0.00E-3 1.00E-3

21.00E-3 3.00E-3
 -7.00E-3 -0.50E-3

14.00E-3 2.50E-3
 -7.00E-3 0.00E-3

7.00E-3 2.50E-3
 -7.00E-3 0.50E-3

0.00E-3 3.00E-3
 0.00E-3 -1.00E-3

0.00E-3 2.00E-3
 0.00E-3 -1.00E-3

0.00E-3 1.00E-3
 0.00E-3 -1.00E-3

"Arquivo .tri"

Coarse mesh

modified by trigen2d

9 16 0 4 1

→ da esquerda para a direita: nº de elementos, nº de nós, dígito que sempre vale 0, nº de vértices do elemento e nº de contornos

DCORVG

→ enumeração de 0 a N-1, sendo N o nº de nós

0. 0.
 1. 0.
 2. 0.
 3. 0.

6.99999993E-3 0.99999999E-3 → esses 4 elementos são calculados pelo próprio programa se refere aos nós que formam o elemento central, o qual será mais refinado, pois se trata da região onde será colocado o stent

14.00000001E-3 0.99999999E-3

14.00000001E-3 2.00000001E-3

6.99999993E-3 2.00000001E-3

4. 0.

5. 0.

6. 0.

7. 0.

8. 0.

9. 0.

10. 0.

11. 0.

KVERT → listagem dos nós que formam cada elemento

5 6 7 8

1 2 5 16

2 3 6 5

4 9 6 3

9 10 7 6

11 12 7 10

12 13 8 7

14 15 8 13

15 16 5 8

KNPR → aqui o nº "1" representa os pontos do contorno de fora e o "0" representa o contorno interno

1

1

1

1

0

0

0

0

1

1

1

1

1

1

1

1

KMM

1 16 → o nº da esquerda se refere ao menor nó e o da direita, o maior

A partir desses dois documentos tornou-se possível obter a malha requerida e o esboço de seu contorno pode ser visualizado abaixo.

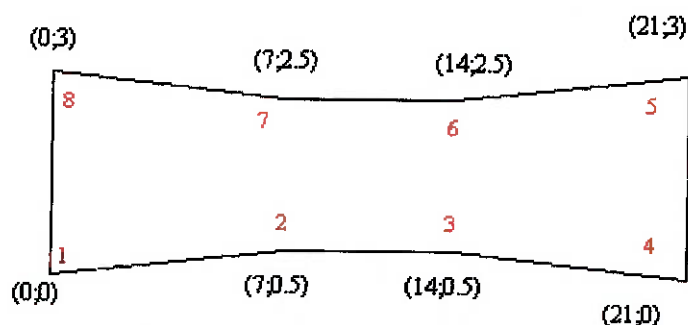


Figura 5 - Esboço da malha fluídica

No próximo passo, foi efetuado o refinamento de tal contorno através do seguinte arquivo:

“Arquivo para refinamento”

```
=====
File for input data for trigen2d
=====
2          M
1          MT
1          ICHECK
1          IMESH (0=FEAT-parametrization,1=OMEGA)
'#pre/teste.prm' CPARM (name of parametrization file) → nome do
7          IBDCHK (>0 check with #points=IBDCHK) arquivo .prm
3          IGMV (level for GMV-output)
3          IAVS (level for AVS-output)
3          NLEV (number of refined levels-1)
-0         IFMT (level of output,<0=unformat.,>0=format.)
'#adc/teste0.tri' CFILEI (name of input file) → nome dos arquivos
'#adc/teste1.tri' CFILEO (name of output file) .tri
1          IYPEL (0=no,>0=type of modification)
1          NELMOD (number of modified elements) → 1 elemento
0.33333333D0 DELMA (distance od first line) mais refinado
0.50D0      DELMB (distance od second line)
1
```

Posteriormente, aplicaram-se as condições de contorno, e o arquivo correspondente encontra-se explicado adiante. Foi suposto um perfil de velocidades parabólico na entrada com o valor máximo de 0,3 m/s, que corresponde à velocidade na aorta. Além disso, foram estipuladas faixas de pressão para a plotagem de gráficos de saída, sendo adotada pressão atmosférica à jusante, ou seja, pressão relativa igual a 0.

“Arquivo indat2d”

```
*****
****
      DOUBLE PRECISION FUNCTION FDATIN(ITYP,IBLOC,X,Y,TIMENS,RE)
*
*   Prescribed data for files coeff.f and bndry.f
*****
****
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A,C-H,O-U,W-Z), LOGICAL(B)
      PARAMETER (PI=3.1415926535897931D0)
```

```

C
C
C
      FDATIN=0D0 → no caso "0"

```

```

C
C
C
C=====

```

```

C *** Case 1: Velocity boundary values and/or exact solution
C=====

```

```

C

```

```

      IF (ITYP.EQ.1) THEN

```

```

C

```

```

        IF (IBLOC.EQ.1) THEN

```

```

          IF (X.EQ.0D0) FDATIN=0.3D0*Y*(3D-3-Y)/(1.5D-3*1.5D-3) → para
                                velocidade máxima do campo igual a 0,3 m/s

```

```

        ENDIF

```

```

C

```

```

        IF (IBLOC.EQ.2) THEN

```

```

          IF (X.EQ.0.0D0) FDATIN=0D0

```

```

        ENDIF

```

```

C

```

```

      ENDIF

```

```

C

```

```

C

```

```

C=====

```

```

C *** Case 2: Velocity x-derivative of exact solution
C=====

```

```

C

```

```

      IF (ITYP.EQ.2) THEN

```

```

C

```

```

        IF (IBLOC.EQ.1) THEN

```

```

          IF (X.EQ.0.0D0) FDATIN=0D0

```

```

        ENDIF

```

```

C

```

```

        IF (IBLOC.EQ.2) THEN

```

```

          IF (X.EQ.0.0D0) FDATIN=0D0

```

```

        ENDIF

```

```

C

```

```

        ENDIF
C
C
C=====
====
C *** Case 3: velocity y-derivative of exact solution
C=====
====
C
C      IF (ITYP.EQ.3) THEN
C
C          IF (IBLOC.EQ.1) THEN
C              FDATIN=0D0
C          ENDIF
C
C          IF (IBLOC.EQ.2) THEN
C              FDATIN=0D0
C          ENDIF
C
C      ENDIF
C
C
C
C=====
====
C *** Case 4: Exact pressure solution
C=====
====
C
C      IF (ITYP.EQ.4) THEN
C
C          FDATIN=0D0
C
C      ENDIF
C
C
C
C=====
====
C *** Case 5: Right hand side for momentum equation
C=====
====
C
C      IF (ITYP.EQ.5) THEN
C

```

```

        IF (IBLOC.EQ.1) THEN
          FDATIN=0D0
        ENDIF

```

```

C

```

```

        IF (IBLOC.EQ.2) THEN
          FDATIN=0D0
        ENDIF

```

```

C

```

```

        ENDIF

```

```

C

```

```

C

```

```

C

```

```

=====

```

```

C *** Case 6: Right hand side for continuity equation
C

```

```

=====

```

```

C

```

```

        IF (ITYP.EQ.6) THEN

```

```

C

```

```

          FDATIN=0D0 → no caso "0"

```

```

C

```

```

        ENDIF

```

```

C

```

```

C

```

```

C

```

```

=====

```

```

C *** Case 7: Mean pressure values
C

```

```

C

```

```

=====

```

```

C

```

```

        IF (ITYP.EQ.7) THEN

```

```

          DPAR=X

```

```

          INPR=IBLOC

```

```

F ((DPAR.GT.3D0).AND.(DPAR.LT.6D0).AND.(INPR.EQ.1)) THEN
  FDATIN=0D0

```

```

ENDIF

```

→ escolhe-se o trecho do contorno para impor
Condição de contorno de pressão relativa=0
à jusante

```

C

```

```

IF ((DPAR.GT.9D0).AND.(DPAR.LT.12D0).AND.(INPR.EQ.1)) THEN
  FDATIN=0D0

```

```

        ENDIF
C
        ENDIF
C
C
C
99999 END
C
C
C
*****
****
        SUBROUTINE NEUDAT(INPART, INPRN, DPARN1, DPARN2, TIMENS)
*
*   Neumann-boundary part
*****
****
        IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A,C-H,O-U,W-Z), LOGICAL(B)
C
C
C
C=====
====
C *** Case 0: Set number of Neumann-boundary parts
C=====
====
C
        IF (INPART.EQ.0) THEN
            INPART=1
        ENDIF
C
C
C=====
====
C *** Case <>0: Specify Neumann-boundary parts
C=====
====
C
        IF (INPART.GT.0) THEN
C
            IF (INPART.EQ.1) THEN
                DPARN1=3D0
                DPARN2=6D0

```

```

        INPRN =1
    ENDIF
C
    ENDIF
C
C
C
99999 END

```

```

*****
****
    SUBROUTINE PTSDAT(TIMENS,DNU)
*
*   Data for Point-output (for fpost and bdpres and bdforc)
*****
****
    IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A,C-H,O-U,W-Z), LOGICAL(B)
    COMMON /NSPTS/ KPU(2),KPP(4),KPX(4),KPI(2),DPI(2,2),DPF(2)
    SAVE
C
    EXTERNAL UE
C
C
C=====
=====
C   ***   Points   for   velocity,   pressure   and   flux-tracing
C=====
C
    KPU(1)=9      → nós correspondentes de onde se quer obter os
                  resultados para cada parâmetro
    KPU(2)=10
C
    KPP(1)=14
    KPP(2)=13
    KPP(3)=12
    KPP(4)=11
C
    KPX(1)=11
    KPX(2)=10
C
C

```

```

C=====
====
C *** Parameters for 2 integral pressures in bdpres.f
C=====
====
C
      KPI(1)  =1
      DPI(1,1)=0D0
      DPI(2,1)=3D0
C
      KPI(2)  =1
      DPI(1,2)=6D0
      DPI(2,2)=9D0
C
C=====
====
C *** Parameters for lift (DFW) and drag (DAW) in bdforc.f (INPR=2)
C ***
C *** dfw=2 int_s [dpf(1) dut/dn n_y - p n_x] ds / dpf(2)
C *** daw=2 int_s [dpf(1) dut/dn n_x + p n_y] ds / dpf(2)
C ***
C=====
====
C
      RHO  =1.0D0
      DIST =0.1D0
      UMEAN=0.2D0
C
      DPF(1)=RHO*DN
      DPF(2)=RHO*DIST*UMEAN**2

```

Cabe ressaltar que a malha utilizada é uma representação bastante simplificada, posto que o objetivo principal do trabalho é gerar ferramentas que sirvam de exemplo para um posterior refinamento do problema, com o intuito de se aproximar mais da realidade.

4.4 Resultados obtidos

A partir do último arquivo apresentado obtiveram-se as distribuições de pressão e velocidade para a malha sugerida.

Distribuição de velocidade

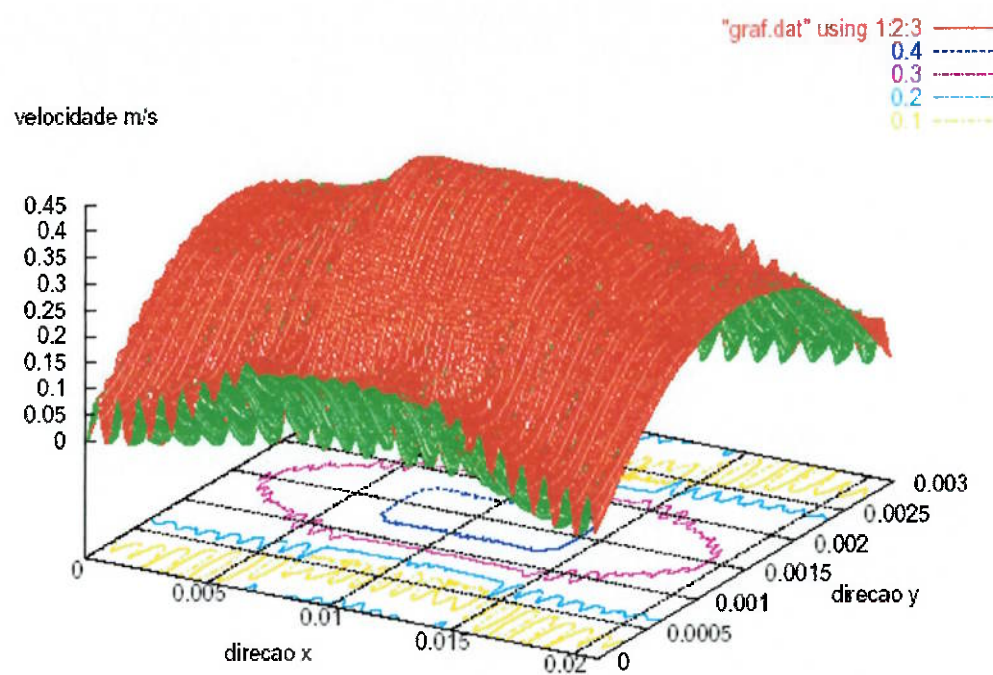


Figura 6 – Distribuição de velocidade

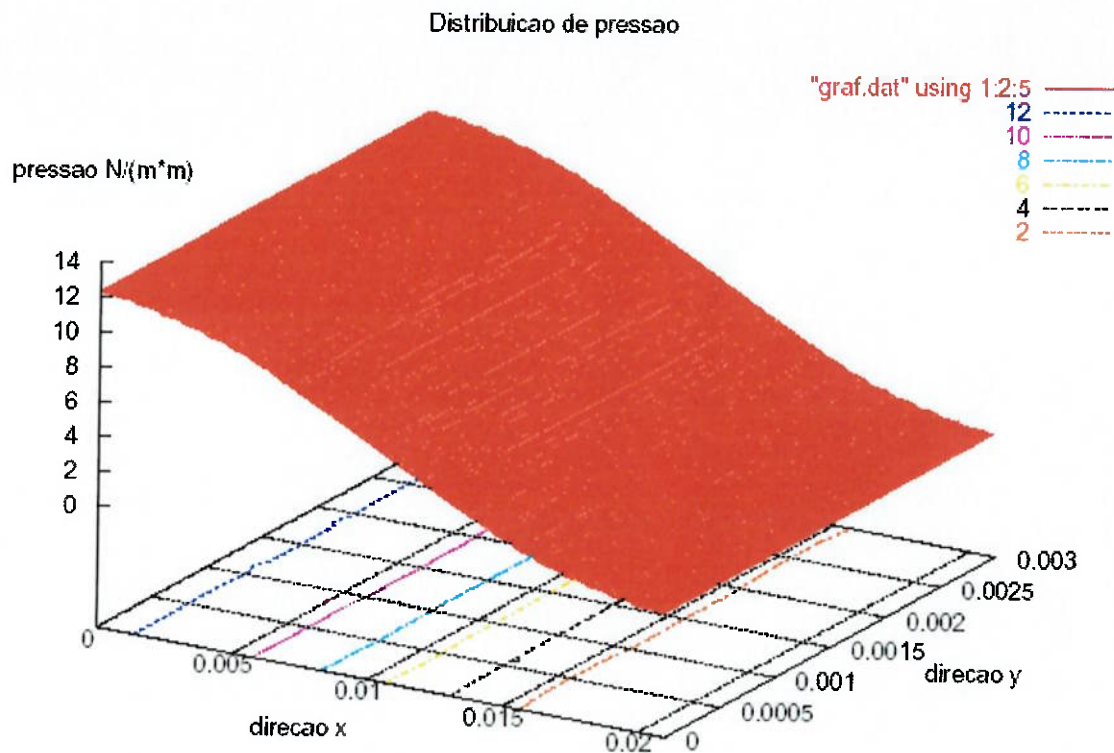


Figura 7 – Distribuição de pressão

5 Análise Estrutural

Para a parte estrutural foi utilizado o software Calculix, no qual, diferentemente do programa anterior, foi realizado um estudo 3D.

Por se tratar de uma versão mais atualizada, o primeiro desafio a ser vencido foi a compilação. Assim, o processo de instalação que será descrito no item seguinte servirá como base para futuras pesquisas envolvendo esse software.

5.1 Instalação do Calculix

Abaixo segue a rotina para a instalação do programa na plataforma Linux:

Primeiro CD : Calculix Graphix (cgx)

```
mount /mnt/cdrom
cd /mnt/cdrom
cp cgx_1.1.exe.tar.gz /usr/local
tar xvzf cgx_1.1.exe.tar.gz
mv cgx /usr/local/bin
cp /usr/lib/libstdc++-lib6.2-2.so.3 /usr/lib/ libstdc++-lib6.1-2.so.3
cgx
cgx -b dummy.fbd
umount /mnt/cdrom
```

Segundo CD: Calculix Crunchix (ccx)

```
mount /mnt/cdrom
cd /mnt/cdrom
cd cgx_1.1
cp ccx_1.1.src.tar.gz /usr/local
cp ccx_1.1.test.tar.gz /usr/local
cp ccx_1.1.doc.tar.gz /usr/local
cd /usr/local
tar xvzf ccx_1.1.src.tar.gz
tar xvzf ccx_1.1.test.tar.gz
tar xvzf ccx_1.1.doc.tar.gz
cd /mnt/cdrom
cd cgx_1.1
ls
cp spooler.2.2.tgz /usr/local/bin
cp arpack96.tar.gz /usr/local
cd /usr/local
ls
tar xvzf arpack96.tar.gz
cd ARPACK
ls
emacs README
emacs Armake.inc → ao abrir a janela, devem ser feitas as seguintes
                    mudanças: alterar o campo "PLAT=..." para "PLAT=
                    INTEL"; substituir o último campo de "SHELL=..."
                    para "SHELL=.../bash"; no campo "home" deve ficar
                    "home"= /usr/local/ARPACK e no "make", "make=
                    /usr/local/bin/make; substituir o número "xx" da
                    expressão "#-cgxx" por 89.
```

```

make
make lib
cd..
ls
tar xvzf spooles.2.2.tgz
cd usr/local
ls
rm -f*.h → todos os arquivo .h serão removidos do diretório
rm spooles.2.2.html
rm make.inc
mkdir spooles.2.2
mv spooles.2.2.tgz ./spooles
mv ./spooles spooles.2.2.tgz
mv spooles.2.2.tgz ./spooles.2.2
cd spooles.2.2/
tar xvzf spooles.2.2.tgz
cd spooles.2.2
emacs makefile
make
ls make*
emacs Make.inc
make
cd A2 → Ao abrir a janela, substituir “spooles” por “SPOOLES”
emacs makefile
cd ..
make lib
cd ..
ls
cd calculix
cd ccx_1.1
cp ccx_1.1 /usr/local/bin
cd usr/local/bin
chmod a+rx ccx_1.1
umount /mnt/cdrom
exit

```

5.2 Breve Teórico [7]

O Método de Elementos Finitos está basicamente associado à determinação do campo de variáveis, principalmente de tensão e deformação.

Como medida básica de deformação no Calculix, o Lagrangiano do tensor das deformações é utilizado como coeficiente de elasticidade “E” e Euleriano do tensor das deformações “e” é adotado para plasticidade de deformação, sendo que o tensor de Cauchy-Green é utilizado para como uma plasticidade adicional.

O Lagrangiano das deformações satisfaz:

$$E_{K,L} = (U_{K,L} + U_{L,K} + U_{M,K} U_{M,L}) / 2$$

onde K,L,M = 1,2,3 e U_K são os componentes de deslocamento na superfície do material de referência. Numa análise linear pode-se adotar a forma reduzida:

$$E_{K,L} = (U_{K,L} + U_{L,K}) / 2 \quad \text{com } K, L = 1,2,3$$

O Euleriano das tensões satisfaz:

$$e_{k,l} = (u_{k,l} + u_{l,k} + u_{m,k} u_{m,l}) / 2$$

sendo $k,l,m = 1,2,3$ e u_k são os componentes de deslocamentos na superfície de referência.

Finalmente, o tensor de Cauchy-Green é definido por:

$$\bar{b}_{kl}^e = J^{e-2/3} x_{k,K}^e x_{l,K}^e$$

onde J^e é o Jacobiano de elasticidade e $x_{k,K}^e$ é o gradiente de deformação elástica.

As equações acima são aplicadas para o sistema de coordenadas cartesianas.

A medida de tensão consistente com o Lagrangiano das deformações é a segunda tensão “S” de Piola-Kirchhoff. Essa tensão, que é internamente usada no Calculix para todas as aplicações pode ser transformada na primeira tensão “P” de Piola-Kirchhoff e na “tensão verdadeira” (“t”) de Cauchy.

Todas as entradas e saídas do Calculix são dadas em termos de “t”. Assim, considerando uma amostra de comprimento L as três medidas de tensões estão relacionadas da seguinte maneira:

$$t = P / (1 - \varepsilon) = S / (1 - \varepsilon)^2$$

onde ε é a deformação definida por $\varepsilon = dL/L$.

5.3 Utilização do CALCULIX

5.3.1 Obtenção da malha

Na análise estrutural, todo o estudo será realizado através de uma malha que representa um quarto de uma artéria obstruída. Tal simplificação é possível devido à simetria do problema.

Para a obtenção da mesma, foi construída inicialmente a malha mais simples, ou seja, sem considerar a estenose.

Nessa etapa será gerado um arquivo “.fbd” contendo somente o contorno do corte transversal (conforme exibido abaixo). Com o comando “cgx -b arquivo.fbd”, pôde ser aberto o arquivo correspondente no Calculix Graphix. Nesse, foram utilizados alguns comandos para gerar a figura final. Com um deles (“swep se1 se2 tra 0 0 0.021”) translada-se essa figura no eixo z, de 0 até 21 mm, de acordo com a malha fluídica. Com outro, (“send all frd”) gera-se o arquivo “. frd”, contendo as coordenadas dos nós e a topologia.

“Arquivo .fbd”

PNT p0	0.00000	0.00000	0.00000
PNT p1	0.00150	0.00000	0.00000

```

PNT p2      0.00155      0.00000      0.00000
PNT p3      0.00000      0.00155      0.00000
PNT p4      0.00000      0.00150      0.00000
PNT py      0.00000      0.00000      0.02100
LINE L1 p1 p2 103
LINE L2 p2 p3 p0 107
LINE L3 p3 p4 103
LINE L4 p4 p1 p0 107
GSUR S1 + BLEND + L1 + L2 + L3 + L4

SETA se1 s S1

```

Como próximo passo, considerou-se a obstrução e, para que fosse gerada essa nova malha, um programa em linguagem "C" (vide abaixo) foi utilizado. Tal rotina transforma os pontos da malha inicial (em coordenadas cartesianas) em coordenadas cilíndricas, muda proporcionalmente a posição dos pontos, de forma a se obter uma geometria equivalente à da malha fluídica, e, ainda, retorna os pontos obtidos para o sistema de coordenadas inicial.

Dadas coordenadas cartesianas, transforma em cilíndrica, modifica
o raio e transforma novamente em cartesiana

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "nrutil.h"

#define num_node 320

main()
{
    int i, node, naux;
    double theta;
    double raio;
    double h,t;
    double xnode,ynode,znode;
    double **cart;
    double **cilin;
    FILE *fp1,*fp2;
    char *filename1 = "cartesianas.dat";
    char *filename2 = "solucao.dat";

```

```

    cart=dmatrix(1,num_node,1,3);
    cilin=dmatrix(1,num_node,1,3);

fp1 = fopen(filename1,"r");
if (fp1 == NULL) {
    fprintf(stderr, "Error opening %s\n", filename1);
    exit(1);
}

i=1;
while (i <= num_node) {
    fscanf(fp1,"%d %le %le %le" ,&aux,&xnode,&ynode,&znode);

    cart[i][1]=xnode;
    cart[i][2]=ynode;
    cart[i][3]=znode;
    /* printf("%i %d %e %e\n",i,node,xnode,ynode); */
    raio=sqrt(xnode*xnode+ynode*ynode);
    theta=acos(xnode/raio);
    cilin[i][1]=raio;
    cilin[i][2]=theta;
    cilin[i][3]=znode;
    i=i+1;
}
close(fp1);

/* altera coordenadas polares */

i=1;
while (i <= num_node) {

    raio=cilin[i][1];
    h=cilin[i][3];
    t=0.0005/3.0;

    if (h <0.007) {
        if (raio < 0.00151) {
            raio = raio - h*3*t/0.007;
        } else {
            if (raio<0.00152){
                raio = raio - h*(2*t)/0.007;
            }
        }
    }
}

```

```

    } else {
        if (raio < 0.00154) {
            raio = raio - h*t/0.007;
        }
    }
}
} else {

    if (h <0.014) {
        if (raio < (0.00151)){
            raio = raio - 3*t;
        } else {
            if (raio<0.00152){
                raio = raio - 2*t;
            } else {
                if (raio < 0.00154) {
                    raio = raio - t;
                }
            }
        }
    } else {
        if (raio < (0.00151)){
            raio = raio - (0.021-h)*3*t/0.007;
        } else {
            if (raio<0.00152){
                raio = raio - (0.021-h)*(2*t)/0.007;
            } else {
                if (raio < 0.00154) {
                    raio = raio - (0.021-h)*t/0.007;
                }
            }
        }
    }
}
cilin[i][1]=raio;
i=i+1;
}

i=1;
while (i <= num_node) {
    cart[i][1]=cilin[i][1]*cos(cilin[i][2]);

```

```

    cart[i][2]=cilin[i][1]*sin(cilin[i][2]);
    cart[i][3]=cilin[i][3];
    i=i+1;
}
fp2 = fopen(filename2,"w");
if (fp2 == NULL) {
    fprintf(stderr, "Error opening %s\n", filename2);
    exit(1);
}
i=1;
while (i <= num_node) {
    fprintf(fp2," %d, %1.5e, %1.5e,
%1.5e\n",i, cart[i][2], cart[i][1], cart[i][3]);
    i=i+1;
}
close(fp2);

free_dmatrix(cilin,1,num_node,1,3);
free_dmatrix(cart,1,num_node,1,3);
}

```

Como consequência dessa mudança alguns pontos que compõem a topologia da malha tiveram que ter a seqüência de nós alterada. Isso porque nesses pontos (dispostos abaixo) o Jacobiano era negativo e isso impedia a continuidade do processo.

29	40	58	76	94	105	123
30	41	59	77	95	113	124
31	42	60	78	96	114	125
32	50	61	79	97	115	126
33	51	62	80	98	116	134
34	52	63	81	99	117	135
35	53	71	82	100	118	136
36	54	72	83	101	119	137
37	55	73	84	102	120	138
38	56	74	92	103	121	139
39	57	75	93	104	122	140

141	146	158	163	168	180	185
142	147	159	164	176	181	186
143	155	160	165	177	182	187
144	156	161	166	178	183	188
145	157	162	167	179	184	189

Por tentativa e erro, descobriu-se que a inversão da ordem dos nós solucionaria esse problema.

Em se tratando de um grande número de elementos, foi feito uso de outro programa em linguagem “C”. A seguir.

* Corrige Topologia

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "nrutil.h"

#define num_elementos 189
#define num_lista 112
#define num_node 320

main()
{
    int i,j, node, naux;
    double theta;
    double raio;
    double h,t;
    int n1,n2,n3,n4,n5,n6,n7,n8;
    int *lista,**topo;
    FILE *fp1,*fp2,*fp3;
    char *filename1 = "topologia.dat";
    char *filename2 = "topologia_corrigida.dat";
    char *filename3 = "lista_elementos.dat";

    topo=imatrix(1,num_elementos,1,8);
```

```

    lista=ivector(1,num_lista);

fp1 = fopen(filename1,"r");
if (fp1 == NULL) {
    fprintf(stderr, "Error opening %s\n", filename1);
    exit(1);
}

i=1;
while (i <= num_elementos) {
    fscanf(fp1,"%d    %d    %d    %d    %d    %d    %d    %d    %d"
,&naux,&n1,&n2,&n3,&n4,&n5,&n6,&n7,&n8);

    topo[i][1]=n1;
    topo[i][2]=n2;
    topo[i][3]=n3;
    topo[i][4]=n4;
    topo[i][5]=n5;
    topo[i][6]=n6;
    topo[i][7]=n7;
    topo[i][8]=n8;

    i=i+1;
}
close(fp1);

fp3 = fopen(filename3,"r");
if (fp1 == NULL) {
    fprintf(stderr, "Error opening %s\n", filename1);
    exit(1);
}
i=1;
while (i <= num_lista) {
    fscanf(fp3,"%d" ,&naux);
    lista[i]=naux;

    i=i+1;}
close(fp3);

/* altera coordenadas polares */

```

```

for (i=1;i <= num_elementos;i++) {
    for (j=1;j<=num_lista;j++) {
        if (i == lista[j]) {
            n1=topo[i][1];
            n2=topo[i][2];
            n3=topo[i][3];
            n4=topo[i][4];
            n5=topo[i][5];
            n6=topo[i][6];
            n7=topo[i][7];
            n8=topo[i][8];
            topo[i][1]=n4;
            topo[i][2]=n3;
            topo[i][3]=n2;
            topo[i][4]=n1;
            topo[i][5]=n8;
            topo[i][6]=n7;
            topo[i][7]=n6;
            topo[i][8]=n5;
        }
    }
}

fp2 = fopen(filename2,"w");
if (fp2 == NULL) {
    fprintf(stderr, "Error opening %s\n", filename2);
    exit(1);
}

i=1;
while (i <= num_elementos) {
    fprintf(fp2,"      %d,      %d,      %d,      %d,      %d,      %d,      %d,      %d,
%d\n",i,topo[i][1],topo[i][2],topo[i][3],topo[i][4],topo[i][5],topo[i][6],
,topo[i][7],topo[i][8]);
    i=i+1;
}
close(fp2);

free_imatrix(topo,1,num_elementos,1,8);
free_ivector(lista,1,num_lista);
}

```

Finalmente, obteve-se a malha 3D final (vide figura), a qual será tratada nos tópicos seguintes.

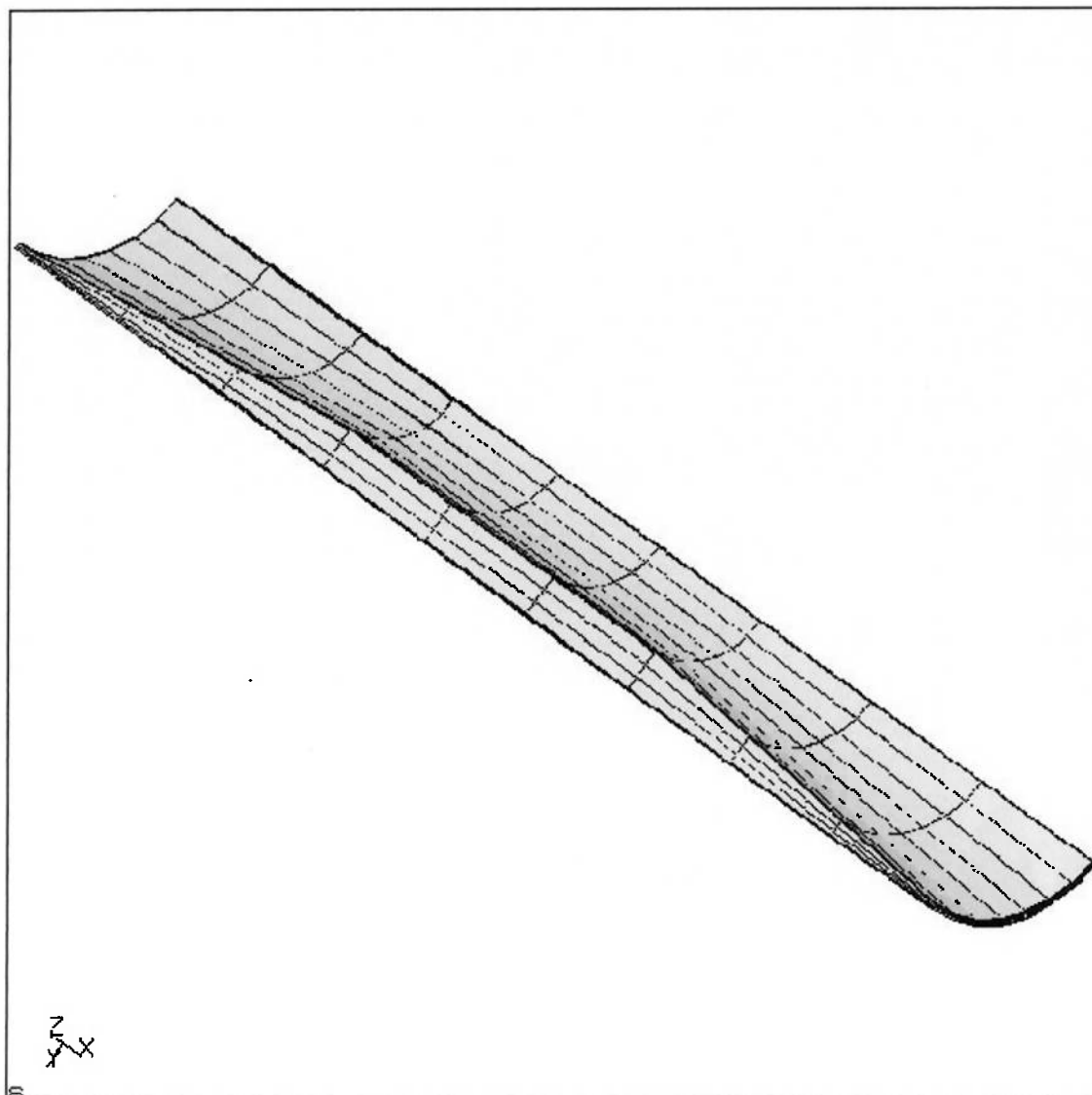


Figura 8 – Malha Final

5.3.2 Condições de Contorno

Para a obtenção das distribuições de tensão e deslocamento, foi necessário adotar as seguintes condições de contorno:

- ✓ Módulo de elasticidade da artéria: 10^9 N/m^2 [5]
- ✓ Coeficiente de Poisson: 0,3
- ✓ Curva de pressão: $-4,3316 \cdot 10^6 x^4 + 3,0396 \cdot 10^6 x^3 - 9,2081 \cdot 10^4 x^2 + 6,3066 \cdot 10^1 x + 12,153$

A curva de pressão (Figura 9) foi determinada através da resposta obtida na análise fluidica. Para gerar o polinômio correspondente a essa curva o seguinte comando foi utilizado:

`usr/share/octave/2.1.36/m/polynomial/polyfit.m`

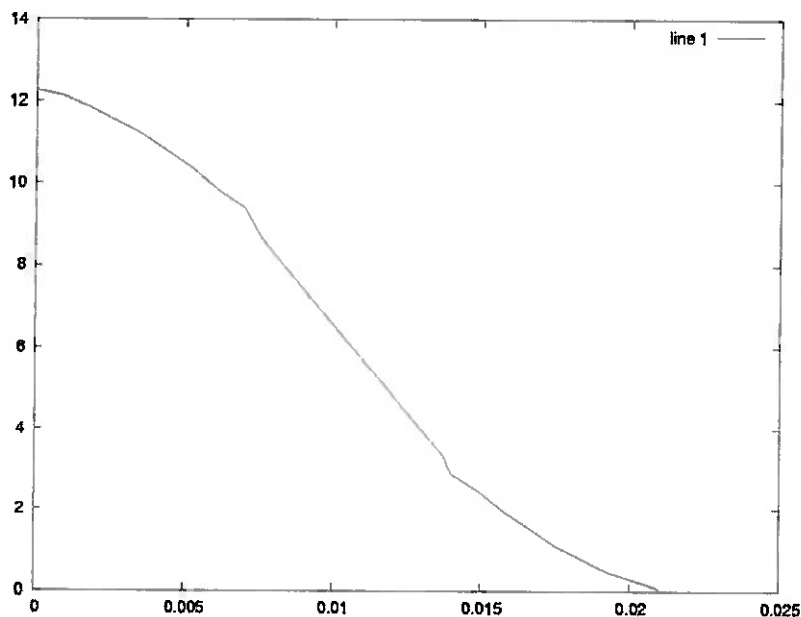


Figura 9 – Curva de pressão

Porém, na realidade, a entrada no arquivo de dados deve ser referente à força exercida em cada nó, sendo necessário, portanto, multiplicar cada valor de pressão pela área correspondente a cada nó. Assim, através da teoria de Elementos Finitos, dividiu-se a projeção da área longitudinal da malha da seguinte maneira:

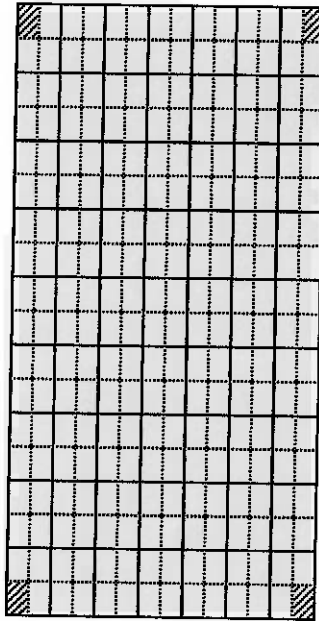


Figura 10 – Corte Longitudinal

Na figura acima, tem-se que a área total é dada pelo produto do comprimento total do segmento (0,021) de artéria por $dS = R d\theta = 0,00236$

$$Área_total = \frac{\pi \cdot 0,015}{2} \cdot 0,021 = 4,9848 \cdot 10^{-5} m^2$$

$$Área_elemento = \frac{4,948 \cdot 10^{-5}}{63} = 7,854 \cdot 10^{-7} m^2$$

Tendo sido obtidas as áreas, pôde-se determinar as forças através da ajuda de mais um programa em "C", que se segue.

Determinação de Forças

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "nrutil.h"

#define num_node 320
#define area_elemento 7.854e-7
```

```

main()

{
    int i, j, node, naux;
    double theta;
    double raio;
    double h,t;
    double xnode,ynode,znode;
    int *lista;
    double **cart;
    double **cilin;
    double *pressao;
    double **forca;
    FILE *fp1,*fp2;
    char *filename1 = "cartesianas.dat";
    char *filename2 = "cargas.dat";

    cart=dmatrix(1,num_node,1,3);
    cilin=dmatrix(1,num_node,1,3);
    lista=ivector(1,num_node/4);
    pressao=dvector(1,num_node/4);
    forca=dmatrix(1,num_node/4,1,2);

    fp1 = fopen(filename1,"r");
    if (fp1 == NULL) {
        fprintf(stderr, "Error opening %s\n", filename1);
        exit(1);
    }

    i=1;
    while (i <= num_node) {
        fscanf(fp1,"%d %le %le %le" ,&naux,&xnode,&ynode,&znode);

        cart[i][1]=xnode;
        cart[i][2]=ynode;
        cart[i][3]=znode;
        /* printf("%i %d %e %e\n",i,node,xnode,ynode); */
        raio=sqrt(xnode*xnode+ynode*ynode);
        theta=acos(xnode/raio);
        cilin[i][1]=raio;
        cilin[i][2]=theta;
    }
}

```

```

    cilin[i][3]=znode;
    i=i+1;
}
close(fp1);

/* altera coordenadas polares */

j=1;
for (i=1;i <= num_node;i++) {
    if (cilin[i][1] < 0.001501) {
        lista[j]=i;
        j=j+1;
    }
}

for (i=1;i <= num_node/4;i++) {
    znode=cart[lista[i]][3];
    pressao[i]= -4.3316e6*pow(znode,4)+3.0396e6*pow(znode,3)
                -9.2081e4*znode*znode+
                6.3066e1*znode+1.2153e1;
}

for (i=1;i <= num_node/4;i++) {
    forca[i][1]=pressao[i]*cos(cilin[lista[i]][2])*area_elemento;
    forca[i][2]=pressao[i]*sin(cilin[lista[i]][2])*area_elemento;
}

for (i=1;i <= num_node/4;i++) {
    if (cart[lista[i]][3] <= 0.000001) {
        forca[i][1]=forca[i][1]/2;
        forca[i][2]=forca[i][2]/2;
    }
}

for (i=1;i <= num_node/4;i++) {
    if (cart[lista[i]][3] >= 0.0209999) {
        forca[i][1]=forca[i][1]/2;
        forca[i][2]=forca[i][2]/2;
    }
}

```

```

for (i=1;i <= num_node/4;i++) {
    if (cart[lista[i]][2] <= 0.000001) {
        forca[i][1]=forca[i][1]/2;
        forca[i][2]=forca[i][2]/2;
    }
}

for (i=1;i <= num_node/4;i++) {
    if (cart[lista[i]][1] <= 0.000001) {
        forca[i][1]=forca[i][1]/2;
        forca[i][2]=forca[i][2]/2;
    }
}

fp2 = fopen(filename2,"w");
if (fp2 == NULL) {
    fprintf(stderr, "Error opening %s\n", filename2);
    exit(1);
}

for (i=1;i <= num_node/4;i++) {
    fprintf(fp2," %d, %d, %1.5e\n",lista[i],1,forca[i][1]);
    fprintf(fp2," %d, %d, %1.5e\n",lista[i],2,forca[i][2]);
}

close(fp2);

free_dmatrix(cilin,1,num_node,1,3);
free_dmatrix(cart,1,num_node,1,3);
free_ivector(lista,1,num_node/4);
free_dvector(pressao,1,num_node/4);
free_dmatrix(forca,1,num_node/4,1,2);
}

```

5.3.3 Entrada de Dados no Calculix

O arquivo “.inp” contém todos os dados necessários para se obter os resultados finais. Assim, fazem parte desse arquivo:

coordenadas de nós da malha final, topologia corrigida e condições de contorno.

Cópia desse arquivo e respectivas explicações de parâmetros estão disponíveis a seguir.

Arquivo artéria.inp

*HEADING

Model:sistema vascular

*NODE, NSET=Na11 → n° de nós e respectivas coordenadas

```
1, 2.41966e-11, 1.55000e-03, 2.98023e-11
2, 3.44907e-04, 1.51114e-03, 2.98023e-11
3, 3.44907e-04, 1.51114e-03, 2.33333e-03
4, 2.41966e-11, 1.55000e-03, 2.33333e-03
5, 2.41966e-11, 1.53333e-03, 2.98023e-11
6, 3.41199e-04, 1.49489e-03, 2.98023e-11
7, 3.28837e-04, 1.44073e-03, 2.33333e-03
8, 2.33199e-11, 1.47777e-03, 2.33333e-03
9, 6.72520e-04, 1.39650e-03, 2.98023e-11
10, 6.72520e-04, 1.39650e-03, 2.33333e-03
11, 6.65288e-04, 1.38149e-03, 2.98023e-11
12, 6.41183e-04, 1.33144e-03, 2.33333e-03
13, 9.66409e-04, 1.21184e-03, 2.98023e-11
14, 9.66409e-04, 1.21184e-03, 2.33333e-03
15, 9.56018e-04, 1.19881e-03, 2.98023e-11
16, 9.21380e-04, 1.15537e-03, 2.33333e-03
17, 1.21184e-03, 9.66409e-04, 2.98023e-11
18, 1.21184e-03, 9.66409e-04, 2.33333e-03
19, 1.19881e-03, 9.56018e-04, 2.98023e-11
20, 1.15537e-03, 9.21380e-04, 2.33333e-03
21, 1.39650e-03, 6.72520e-04, 2.98023e-11
22, 1.39650e-03, 6.72520e-04, 2.33333e-03
23, 1.38149e-03, 6.65288e-04, 2.98023e-11
24, 1.33144e-03, 6.41183e-04, 2.33333e-03
25, 1.51114e-03, 3.44907e-04, 2.98023e-11
26, 1.51114e-03, 3.44907e-04, 2.33333e-03
27, 1.49489e-03, 3.41199e-04, 2.98023e-11
28, 1.44073e-03, 3.28837e-04, 2.33333e-03
```

29, 1.55000e-03, 2.30968e-11, 2.98023e-11
30, 1.55000e-03, 2.30968e-11, 2.33333e-03
31, 1.53333e-03, 2.28484e-11, 2.98023e-11
32, 1.47777e-03, 2.20206e-11, 2.33333e-03
33, 2.41966e-11, 1.51667e-03, 2.98023e-11
34, 3.37490e-04, 1.47864e-03, 2.98023e-11
35, 3.12765e-04, 1.37031e-03, 2.33333e-03
36, 2.24240e-11, 1.40556e-03, 2.33333e-03
37, 6.58057e-04, 1.36647e-03, 2.98023e-11
38, 6.09848e-04, 1.26636e-03, 2.33333e-03
39, 9.45626e-04, 1.18578e-03, 2.98023e-11
40, 8.76350e-04, 1.09891e-03, 2.33333e-03
41, 1.18578e-03, 9.45626e-04, 2.98023e-11
42, 1.09891e-03, 8.76350e-04, 2.33333e-03
43, 1.36647e-03, 6.58057e-04, 2.98023e-11
44, 1.26636e-03, 6.09848e-04, 2.33333e-03
45, 1.47864e-03, 3.37490e-04, 2.98023e-11
46, 1.37031e-03, 3.12765e-04, 2.33333e-03
47, 1.51667e-03, 2.26001e-11, 2.98023e-11
48, 1.40556e-03, 2.09445e-11, 2.33333e-03
49, 2.41966e-11, 1.50000e-03, 2.98023e-11
50, 3.33781e-04, 1.46239e-03, 2.98023e-11
51, 2.96694e-04, 1.29990e-03, 2.33333e-03
52, 2.15081e-11, 1.33333e-03, 2.33333e-03
53, 6.50826e-04, 1.35145e-03, 2.98023e-11
54, 5.78512e-04, 1.20129e-03, 2.33333e-03
55, 9.35235e-04, 1.17275e-03, 2.98023e-11
56, 8.31320e-04, 1.04244e-03, 2.33333e-03
57, 1.17275e-03, 9.35235e-04, 2.98023e-11
58, 1.04244e-03, 8.31320e-04, 2.33333e-03
59, 1.35145e-03, 6.50826e-04, 2.98023e-11
60, 1.20129e-03, 5.78512e-04, 2.33333e-03
61, 1.46239e-03, 3.33781e-04, 2.98023e-11
62, 1.29990e-03, 2.96694e-04, 2.33333e-03
63, 1.50000e-03, 2.23517e-11, 2.98023e-11
64, 1.33333e-03, 1.98682e-11, 2.33333e-03
65, 3.44907e-04, 1.51114e-03, 4.66667e-03
66, 2.41966e-11, 1.55000e-03, 4.66667e-03
67, 3.16474e-04, 1.38656e-03, 4.66667e-03
68, 2.24432e-11, 1.42222e-03, 4.66667e-03
69, 6.72520e-04, 1.39650e-03, 4.66667e-03

70, 6.17079e-04, 1.28138e-03, 4.66667e-03
71, 9.66409e-04, 1.21184e-03, 4.66667e-03
72, 8.86741e-04, 1.11194e-03, 4.66667e-03
73, 1.21184e-03, 9.66409e-04, 4.66667e-03
74, 1.11194e-03, 8.86741e-04, 4.66667e-03
75, 1.39650e-03, 6.72520e-04, 4.66667e-03
76, 1.28138e-03, 6.17079e-04, 4.66667e-03
77, 1.51114e-03, 3.44907e-04, 4.66667e-03
78, 1.38656e-03, 3.16474e-04, 4.66667e-03
79, 1.55000e-03, 2.30968e-11, 4.66667e-03
80, 1.42222e-03, 2.11927e-11, 4.66667e-03
81, 2.88041e-04, 1.26199e-03, 4.66667e-03
82, 2.06513e-11, 1.29445e-03, 4.66667e-03
83, 5.61638e-04, 1.16625e-03, 4.66667e-03
84, 8.07073e-04, 1.01204e-03, 4.66667e-03
85, 1.01204e-03, 8.07073e-04, 4.66667e-03
86, 1.16625e-03, 5.61638e-04, 4.66667e-03
87, 1.26199e-03, 2.88041e-04, 4.66667e-03
88, 1.29445e-03, 1.92888e-11, 4.66667e-03
89, 2.59607e-04, 1.13741e-03, 4.66667e-03
90, 1.88196e-11, 1.16667e-03, 4.66667e-03
91, 5.06198e-04, 1.05113e-03, 4.66667e-03
92, 7.27405e-04, 9.12139e-04, 4.66667e-03
93, 9.12139e-04, 7.27405e-04, 4.66667e-03
94, 1.05113e-03, 5.06198e-04, 4.66667e-03
95, 1.13741e-03, 2.59607e-04, 4.66667e-03
96, 1.16667e-03, 1.73847e-11, 4.66667e-03
97, 3.44907e-04, 1.51114e-03, 7.00000e-03
98, 2.41966e-11, 1.55000e-03, 7.00000e-03
99, 3.04112e-04, 1.33240e-03, 7.00000e-03
100, 2.15665e-11, 1.36666e-03, 7.00000e-03
101, 6.72520e-04, 1.39650e-03, 7.00000e-03
102, 5.92974e-04, 1.23133e-03, 7.00000e-03
103, 9.66409e-04, 1.21184e-03, 7.00000e-03
104, 8.52103e-04, 1.06850e-03, 7.00000e-03
105, 1.21184e-03, 9.66409e-04, 7.00000e-03
106, 1.06850e-03, 8.52103e-04, 7.00000e-03
107, 1.39650e-03, 6.72520e-04, 7.00000e-03
108, 1.23133e-03, 5.92974e-04, 7.00000e-03
109, 1.51114e-03, 3.44907e-04, 7.00000e-03
110, 1.33240e-03, 3.04112e-04, 7.00000e-03

111, 1.55000e-03, 2.30968e-11, 7.00000e-03
112, 1.36666e-03, 2.03649e-11, 7.00000e-03
113, 2.63316e-04, 1.15366e-03, 7.00000e-03
114, 1.88787e-11, 1.18334e-03, 7.00000e-03
115, 5.13429e-04, 1.06615e-03, 7.00000e-03
116, 7.37796e-04, 9.25169e-04, 7.00000e-03
117, 9.25169e-04, 7.37796e-04, 7.00000e-03
118, 1.06615e-03, 5.13429e-04, 7.00000e-03
119, 1.15366e-03, 2.63316e-04, 7.00000e-03
120, 1.18334e-03, 1.76331e-11, 7.00000e-03
121, 2.22521e-04, 9.74926e-04, 7.00000e-03
122, 1.61311e-11, 1.00000e-03, 7.00000e-03
123, 4.33884e-04, 9.00966e-04, 7.00000e-03
124, 6.23490e-04, 7.81834e-04, 7.00000e-03
125, 7.81834e-04, 6.23490e-04, 7.00000e-03
126, 9.00966e-04, 4.33884e-04, 7.00000e-03
127, 9.74926e-04, 2.22521e-04, 7.00000e-03
128, 1.00000e-03, 1.49012e-11, 7.00000e-03
129, 3.44907e-04, 1.51114e-03, 9.33333e-03
130, 2.41966e-11, 1.55000e-03, 9.33333e-03
131, 3.04112e-04, 1.33240e-03, 9.33333e-03
132, 2.15665e-11, 1.36666e-03, 9.33333e-03
133, 6.72520e-04, 1.39650e-03, 9.33333e-03
134, 5.92974e-04, 1.23133e-03, 9.33333e-03
135, 9.66409e-04, 1.21184e-03, 9.33333e-03
136, 8.52103e-04, 1.06850e-03, 9.33333e-03
137, 1.21184e-03, 9.66409e-04, 9.33333e-03
138, 1.06850e-03, 8.52103e-04, 9.33333e-03
139, 1.39650e-03, 6.72520e-04, 9.33333e-03
140, 1.23133e-03, 5.92974e-04, 9.33333e-03
141, 1.51114e-03, 3.44907e-04, 9.33333e-03
142, 1.33240e-03, 3.04112e-04, 9.33333e-03
143, 1.55000e-03, 2.30968e-11, 9.33333e-03
144, 1.36666e-03, 2.03649e-11, 9.33333e-03
145, 2.63316e-04, 1.15366e-03, 9.33333e-03
146, 1.88787e-11, 1.18334e-03, 9.33333e-03
147, 5.13429e-04, 1.06615e-03, 9.33333e-03
148, 7.37796e-04, 9.25169e-04, 9.33333e-03
149, 9.25169e-04, 7.37796e-04, 9.33333e-03
150, 1.06615e-03, 5.13429e-04, 9.33333e-03
151, 1.15366e-03, 2.63316e-04, 9.33333e-03

152, 1.18334e-03, 1.76331e-11, 9.33333e-03
153, 2.22521e-04, 9.74926e-04, 9.33333e-03
154, 1.61311e-11, 1.00000e-03, 9.33333e-03
155, 4.33884e-04, 9.00966e-04, 9.33333e-03
156, 6.23490e-04, 7.81834e-04, 9.33333e-03
157, 7.81834e-04, 6.23490e-04, 9.33333e-03
158, 9.00966e-04, 4.33884e-04, 9.33333e-03
159, 9.74926e-04, 2.22521e-04, 9.33333e-03
160, 1.00000e-03, 1.49012e-11, 9.33333e-03
161, 3.44907e-04, 1.51114e-03, 1.16667e-02
162, 2.41966e-11, 1.55000e-03, 1.16667e-02
163, 3.04112e-04, 1.33240e-03, 1.16667e-02
164, 2.15665e-11, 1.36666e-03, 1.16667e-02
165, 6.72520e-04, 1.39650e-03, 1.16667e-02
166, 5.92974e-04, 1.23133e-03, 1.16667e-02
167, 9.66409e-04, 1.21184e-03, 1.16667e-02
168, 8.52103e-04, 1.06850e-03, 1.16667e-02
169, 1.21184e-03, 9.66409e-04, 1.16667e-02
170, 1.06850e-03, 8.52103e-04, 1.16667e-02
171, 1.39650e-03, 6.72520e-04, 1.16667e-02
172, 1.23133e-03, 5.92974e-04, 1.16667e-02
173, 1.51114e-03, 3.44907e-04, 1.16667e-02
174, 1.33240e-03, 3.04112e-04, 1.16667e-02
175, 1.55000e-03, 2.30968e-11, 1.16667e-02
176, 1.36666e-03, 2.03649e-11, 1.16667e-02
177, 2.63316e-04, 1.15366e-03, 1.16667e-02
178, 1.88787e-11, 1.18334e-03, 1.16667e-02
179, 5.13429e-04, 1.06615e-03, 1.16667e-02
180, 7.37796e-04, 9.25169e-04, 1.16667e-02
181, 9.25169e-04, 7.37796e-04, 1.16667e-02
182, 1.06615e-03, 5.13429e-04, 1.16667e-02
183, 1.15366e-03, 2.63316e-04, 1.16667e-02
184, 1.18334e-03, 1.76331e-11, 1.16667e-02
185, 2.22521e-04, 9.74926e-04, 1.16667e-02
186, 1.61311e-11, 1.00000e-03, 1.16667e-02
187, 4.33884e-04, 9.00966e-04, 1.16667e-02
188, 6.23490e-04, 7.81834e-04, 1.16667e-02
189, 7.81834e-04, 6.23490e-04, 1.16667e-02
190, 9.00966e-04, 4.33884e-04, 1.16667e-02
191, 9.74926e-04, 2.22521e-04, 1.16667e-02
192, 1.00000e-03, 1.49012e-11, 1.16667e-02

193, 3.44907e-04, 1.51114e-03, 1.40000e-02
 194, 2.41966e-11, 1.55000e-03, 1.40000e-02
 195, 3.04112e-04, 1.33240e-03, 1.40000e-02
 196, 2.15665e-11, 1.36666e-03, 1.40000e-02
 197, 6.72520e-04, 1.39650e-03, 1.40000e-02
 198, 5.92974e-04, 1.23133e-03, 1.40000e-02
 199, 9.66409e-04, 1.21184e-03, 1.40000e-02
 200, 8.52103e-04, 1.06850e-03, 1.40000e-02
 201, 1.21184e-03, 9.66409e-04, 1.40000e-02
 202, 1.06850e-03, 8.52103e-04, 1.40000e-02
 203, 1.39650e-03, 6.72520e-04, 1.40000e-02
 204, 1.23133e-03, 5.92974e-04, 1.40000e-02
 205, 1.51114e-03, 3.44907e-04, 1.40000e-02
 206, 1.33240e-03, 3.04112e-04, 1.40000e-02
 207, 1.55000e-03, 2.30968e-11, 1.40000e-02
 208, 1.36666e-03, 2.03649e-11, 1.40000e-02
 209, 2.63316e-04, 1.15366e-03, 1.40000e-02
 210, 1.88787e-11, 1.18334e-03, 1.40000e-02
 211, 5.13429e-04, 1.06615e-03, 1.40000e-02
 212, 7.37796e-04, 9.25169e-04, 1.40000e-02
 213, 9.25169e-04, 7.37796e-04, 1.40000e-02
 214, 1.06615e-03, 5.13429e-04, 1.40000e-02
 215, 1.15366e-03, 2.63316e-04, 1.40000e-02
 216, 1.18334e-03, 1.76331e-11, 1.40000e-02
 217, 2.22521e-04, 9.74926e-04, 1.40000e-02
 218, 1.61311e-11, 1.00000e-03, 1.40000e-02
 219, 4.33884e-04, 9.00966e-04, 1.40000e-02
 220, 6.23490e-04, 7.81834e-04, 1.40000e-02
 221, 7.81834e-04, 6.23490e-04, 1.40000e-02
 222, 9.00966e-04, 4.33884e-04, 1.40000e-02
 223, 9.74926e-04, 2.22521e-04, 1.40000e-02
 224, 1.00000e-03, 1.49012e-11, 1.40000e-02
 225, 3.44907e-04, 1.51114e-03, 1.63333e-02
 226, 2.41966e-11, 1.55000e-03, 1.63333e-02
 227, 3.16474e-04, 1.38656e-03, 1.63333e-02
 228, 2.24432e-11, 1.42222e-03, 1.63333e-02
 229, 6.72520e-04, 1.39650e-03, 1.63333e-02
 230, 6.17078e-04, 1.28138e-03, 1.63333e-02
 231, 9.66409e-04, 1.21184e-03, 1.63333e-02
 232, 8.86741e-04, 1.11194e-03, 1.63333e-02
 233, 1.21184e-03, 9.66409e-04, 1.63333e-02

234, 1.11194e-03, 8.86741e-04, 1.63333e-02
 235, 1.39650e-03, 6.72520e-04, 1.63333e-02
 236, 1.28138e-03, 6.17078e-04, 1.63333e-02
 237, 1.51114e-03, 3.44907e-04, 1.63333e-02
 238, 1.38656e-03, 3.16474e-04, 1.63333e-02
 239, 1.55000e-03, 2.30968e-11, 1.63333e-02
 240, 1.42222e-03, 2.11927e-11, 1.63333e-02
 241, 2.88041e-04, 1.26199e-03, 1.63333e-02
 242, 2.06513e-11, 1.29445e-03, 1.63333e-02
 243, 5.61638e-04, 1.16625e-03, 1.63333e-02
 244, 8.07072e-04, 1.01204e-03, 1.63333e-02
 245, 1.01204e-03, 8.07072e-04, 1.63333e-02
 246, 1.16625e-03, 5.61638e-04, 1.63333e-02
 247, 1.26199e-03, 2.88041e-04, 1.63333e-02
 248, 1.29445e-03, 1.92888e-11, 1.63333e-02
 249, 2.59607e-04, 1.13741e-03, 1.63333e-02
 250, 1.88195e-11, 1.16666e-03, 1.63333e-02
 251, 5.06197e-04, 1.05113e-03, 1.63333e-02
 252, 7.27404e-04, 9.12137e-04, 1.63333e-02
 253, 9.12137e-04, 7.27404e-04, 1.63333e-02
 254, 1.05113e-03, 5.06197e-04, 1.63333e-02
 255, 1.13741e-03, 2.59607e-04, 1.63333e-02
 256, 1.16666e-03, 1.73847e-11, 1.63333e-02
 257, 3.44907e-04, 1.51114e-03, 1.86667e-02
 258, 2.41966e-11, 1.55000e-03, 1.86667e-02
 259, 3.28837e-04, 1.44073e-03, 1.86667e-02
 260, 2.33199e-11, 1.47778e-03, 1.86667e-02
 261, 6.72520e-04, 1.39650e-03, 1.86667e-02
 262, 6.41184e-04, 1.33144e-03, 1.86667e-02
 263, 9.66409e-04, 1.21184e-03, 1.86667e-02
 264, 9.21380e-04, 1.15538e-03, 1.86667e-02
 265, 1.21184e-03, 9.66409e-04, 1.86667e-02
 266, 1.15538e-03, 9.21380e-04, 1.86667e-02
 267, 1.39650e-03, 6.72520e-04, 1.86667e-02
 268, 1.33144e-03, 6.41184e-04, 1.86667e-02
 269, 1.51114e-03, 3.44907e-04, 1.86667e-02
 270, 1.44073e-03, 3.28837e-04, 1.86667e-02
 271, 1.55000e-03, 2.30968e-11, 1.86667e-02
 272, 1.47778e-03, 2.20206e-11, 1.86667e-02
 273, 3.12766e-04, 1.37032e-03, 1.86667e-02
 274, 2.24240e-11, 1.40556e-03, 1.86667e-02

275, 6.09848e-04, 1.26636e-03, 1.86667e-02
276, 8.76350e-04, 1.09891e-03, 1.86667e-02
277, 1.09891e-03, 8.76350e-04, 1.86667e-02
278, 1.26636e-03, 6.09848e-04, 1.86667e-02
279, 1.37032e-03, 3.12766e-04, 1.86667e-02
280, 1.40556e-03, 2.09445e-11, 1.86667e-02
281, 2.96695e-04, 1.29990e-03, 1.86667e-02
282, 2.15081e-11, 1.33334e-03, 1.86667e-02
283, 5.78513e-04, 1.20129e-03, 1.86667e-02
284, 8.31322e-04, 1.04245e-03, 1.86667e-02
285, 1.04245e-03, 8.31322e-04, 1.86667e-02
286, 1.20129e-03, 5.78513e-04, 1.86667e-02
287, 1.29990e-03, 2.96695e-04, 1.86667e-02
288, 1.33334e-03, 1.98683e-11, 1.86667e-02
289, 3.44907e-04, 1.51114e-03, 2.10000e-02
290, 2.41966e-11, 1.55000e-03, 2.10000e-02
291, 3.41199e-04, 1.49489e-03, 2.10000e-02
292, 2.41966e-11, 1.53333e-03, 2.10000e-02
293, 6.72520e-04, 1.39650e-03, 2.10000e-02
294, 6.65288e-04, 1.38149e-03, 2.10000e-02
295, 9.66409e-04, 1.21184e-03, 2.10000e-02
296, 9.56018e-04, 1.19881e-03, 2.10000e-02
297, 1.21184e-03, 9.66409e-04, 2.10000e-02
298, 1.19881e-03, 9.56018e-04, 2.10000e-02
299, 1.39650e-03, 6.72520e-04, 2.10000e-02
300, 1.38149e-03, 6.65288e-04, 2.10000e-02
301, 1.51114e-03, 3.44907e-04, 2.10000e-02
302, 1.49489e-03, 3.41199e-04, 2.10000e-02
303, 1.55000e-03, 2.30968e-11, 2.10000e-02
304, 1.53333e-03, 2.28484e-11, 2.10000e-02
305, 3.37490e-04, 1.47864e-03, 2.10000e-02
306, 2.41966e-11, 1.51667e-03, 2.10000e-02
307, 6.58057e-04, 1.36647e-03, 2.10000e-02
308, 9.45626e-04, 1.18578e-03, 2.10000e-02
309, 1.18578e-03, 9.45626e-04, 2.10000e-02
310, 1.36647e-03, 6.58057e-04, 2.10000e-02
311, 1.47864e-03, 3.37490e-04, 2.10000e-02
312, 1.51667e-03, 2.26001e-11, 2.10000e-02
313, 3.33781e-04, 1.46239e-03, 2.10000e-02
314, 2.41966e-11, 1.50000e-03, 2.10000e-02
315, 6.50826e-04, 1.35145e-03, 2.10000e-02

316, 9.35235e-04, 1.17275e-03, 2.10000e-02
 317, 1.17275e-03, 9.35235e-04, 2.10000e-02
 318, 1.35145e-03, 6.50826e-04, 2.10000e-02
 319, 1.46239e-03, 3.33781e-04, 2.10000e-02
 320, 1.50000e-03, 2.23517e-11, 2.10000e-02

*ELEMENT, TYPE=C3D8, ELSET=Ea11 → topologia e seqüência de nós

1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
 2, 2, 9, 10, 3, 6, 11, 12, 7
 3, 9, 13, 14, 10, 11, 15, 16, 12
 4, 13, 17, 18, 14, 15, 19, 20, 16
 5, 17, 21, 22, 18, 19, 23, 24, 20
 6, 21, 25, 26, 22, 23, 27, 28, 24
 7, 25, 29, 30, 26, 27, 31, 32, 28
 8, 5, 6, 7, 8, 33, 34, 35, 36
 9, 6, 11, 12, 7, 34, 37, 38, 35
 10, 11, 15, 16, 12, 37, 39, 40, 38
 11, 15, 19, 20, 16, 39, 41, 42, 40
 12, 19, 23, 24, 20, 41, 43, 44, 42
 13, 23, 27, 28, 24, 43, 45, 46, 44
 14, 27, 31, 32, 28, 45, 47, 48, 46
 15, 33, 34, 35, 36, 49, 50, 51, 52
 16, 34, 37, 38, 35, 50, 53, 54, 51
 17, 37, 39, 40, 38, 53, 55, 56, 54
 18, 39, 41, 42, 40, 55, 57, 58, 56
 19, 41, 43, 44, 42, 57, 59, 60, 58
 20, 43, 45, 46, 44, 59, 61, 62, 60
 21, 45, 47, 48, 46, 61, 63, 64, 62
 22, 4, 3, 65, 66, 8, 7, 67, 68
 23, 3, 10, 69, 65, 7, 12, 70, 67
 24, 10, 14, 71, 69, 12, 16, 72, 70
 25, 14, 18, 73, 71, 16, 20, 74, 72
 26, 18, 22, 75, 73, 20, 24, 76, 74
 27, 22, 26, 77, 75, 24, 28, 78, 76
 28, 26, 30, 79, 77, 28, 32, 80, 78
 29, 82, 81, 35, 36, 68, 67, 7, 8
 30, 81, 83, 38, 35, 67, 70, 12, 7
 31, 83, 84, 40, 38, 70, 72, 16, 12
 32, 84, 85, 42, 40, 72, 74, 20, 16
 33, 85, 86, 44, 42, 74, 76, 24, 20
 34, 86, 87, 46, 44, 76, 78, 28, 24

35, 87, 88, 48, 46, 78, 80, 32, 28
36, 90, 89, 51, 52, 82, 81, 35, 36
37, 89, 91, 54, 51, 81, 83, 38, 35
38, 91, 92, 56, 54, 83, 84, 40, 38
39, 92, 93, 58, 56, 84, 85, 42, 40
40, 93, 94, 60, 58, 85, 86, 44, 42
41, 94, 95, 62, 60, 86, 87, 46, 44
42, 95, 96, 64, 62, 87, 88, 48, 46
43, 66, 65, 97, 98, 68, 67, 99, 100
44, 65, 69, 101, 97, 67, 70, 102, 99
45, 69, 71, 103, 101, 70, 72, 104, 102
46, 71, 73, 105, 103, 72, 74, 106, 104
47, 73, 75, 107, 105, 74, 76, 108, 106
48, 75, 77, 109, 107, 76, 78, 110, 108
49, 77, 79, 111, 109, 78, 80, 112, 110
50, 114, 113, 81, 82, 100, 99, 67, 68
51, 113, 115, 83, 81, 99, 102, 70, 67
52, 115, 116, 84, 83, 102, 104, 72, 70
53, 116, 117, 85, 84, 104, 106, 74, 72
54, 117, 118, 86, 85, 106, 108, 76, 74
55, 118, 119, 87, 86, 108, 110, 78, 76
56, 119, 120, 88, 87, 110, 112, 80, 78
57, 122, 121, 89, 90, 114, 113, 81, 82
58, 121, 123, 91, 89, 113, 115, 83, 81
59, 123, 124, 92, 91, 115, 116, 84, 83
60, 124, 125, 93, 92, 116, 117, 85, 84
61, 125, 126, 94, 93, 117, 118, 86, 85
62, 126, 127, 95, 94, 118, 119, 87, 86
63, 127, 128, 96, 95, 119, 120, 88, 87
64, 98, 97, 129, 130, 100, 99, 131, 132
65, 97, 101, 133, 129, 99, 102, 134, 131
66, 101, 103, 135, 133, 102, 104, 136, 134
67, 103, 105, 137, 135, 104, 106, 138, 136
68, 105, 107, 139, 137, 106, 108, 140, 138
69, 107, 109, 141, 139, 108, 110, 142, 140
70, 109, 111, 143, 141, 110, 112, 144, 142
71, 146, 145, 113, 114, 132, 131, 99, 100
72, 145, 147, 115, 113, 131, 134, 102, 99
73, 147, 148, 116, 115, 134, 136, 104, 102
74, 148, 149, 117, 116, 136, 138, 106, 104
75, 149, 150, 118, 117, 138, 140, 108, 106

76, 150, 151, 119, 118, 140, 142, 110, 108
77, 151, 152, 120, 119, 142, 144, 112, 110
78, 154, 153, 121, 122, 146, 145, 113, 114
79, 153, 155, 123, 121, 145, 147, 115, 113
80, 155, 156, 124, 123, 147, 148, 116, 115
81, 156, 157, 125, 124, 148, 149, 117, 116
82, 157, 158, 126, 125, 149, 150, 118, 117
83, 158, 159, 127, 126, 150, 151, 119, 118
84, 159, 160, 128, 127, 151, 152, 120, 119
85, 130, 129, 161, 162, 132, 131, 163, 164
86, 129, 133, 165, 161, 131, 134, 166, 163
87, 133, 135, 167, 165, 134, 136, 168, 166
88, 135, 137, 169, 167, 136, 138, 170, 168
89, 137, 139, 171, 169, 138, 140, 172, 170
90, 139, 141, 173, 171, 140, 142, 174, 172
91, 141, 143, 175, 173, 142, 144, 176, 174
92, 178, 177, 145, 146, 164, 163, 131, 132
93, 177, 179, 147, 145, 163, 166, 134, 131
94, 179, 180, 148, 147, 166, 168, 136, 134
95, 180, 181, 149, 148, 168, 170, 138, 136
96, 181, 182, 150, 149, 170, 172, 140, 138
97, 182, 183, 151, 150, 172, 174, 142, 140
98, 183, 184, 152, 151, 174, 176, 144, 142
99, 186, 185, 153, 154, 178, 177, 145, 146
100, 185, 187, 155, 153, 177, 179, 147, 145
101, 187, 188, 156, 155, 179, 180, 148, 147
102, 188, 189, 157, 156, 180, 181, 149, 148
103, 189, 190, 158, 157, 181, 182, 150, 149
104, 190, 191, 159, 158, 182, 183, 151, 150
105, 191, 192, 160, 159, 183, 184, 152, 151
106, 162, 161, 193, 194, 164, 163, 195, 196
107, 161, 165, 197, 193, 163, 166, 198, 195
108, 165, 167, 199, 197, 166, 168, 200, 198
109, 167, 169, 201, 199, 168, 170, 202, 200
110, 169, 171, 203, 201, 170, 172, 204, 202
111, 171, 173, 205, 203, 172, 174, 206, 204
112, 173, 175, 207, 205, 174, 176, 208, 206
113, 210, 209, 177, 178, 196, 195, 163, 164
114, 209, 211, 179, 177, 195, 198, 166, 163
115, 211, 212, 180, 179, 198, 200, 168, 166
116, 212, 213, 181, 180, 200, 202, 170, 168

117, 213, 214, 182, 181, 202, 204, 172, 170
118, 214, 215, 183, 182, 204, 206, 174, 172
119, 215, 216, 184, 183, 206, 208, 176, 174
120, 218, 217, 185, 186, 210, 209, 177, 178
121, 217, 219, 187, 185, 209, 211, 179, 177
122, 219, 220, 188, 187, 211, 212, 180, 179
123, 220, 221, 189, 188, 212, 213, 181, 180
124, 221, 222, 190, 189, 213, 214, 182, 181
125, 222, 223, 191, 190, 214, 215, 183, 182
126, 223, 224, 192, 191, 215, 216, 184, 183
127, 194, 193, 225, 226, 196, 195, 227, 228
128, 193, 197, 229, 225, 195, 198, 230, 227
129, 197, 199, 231, 229, 198, 200, 232, 230
130, 199, 201, 233, 231, 200, 202, 234, 232
131, 201, 203, 235, 233, 202, 204, 236, 234
132, 203, 205, 237, 235, 204, 206, 238, 236
133, 205, 207, 239, 237, 206, 208, 240, 238
134, 242, 241, 209, 210, 228, 227, 195, 196
135, 241, 243, 211, 209, 227, 230, 198, 195
136, 243, 244, 212, 211, 230, 232, 200, 198
137, 244, 245, 213, 212, 232, 234, 202, 200
138, 245, 246, 214, 213, 234, 236, 204, 202
139, 246, 247, 215, 214, 236, 238, 206, 204
140, 247, 248, 216, 215, 238, 240, 208, 206
141, 250, 249, 217, 218, 242, 241, 209, 210
142, 249, 251, 219, 217, 241, 243, 211, 209
143, 251, 252, 220, 219, 243, 244, 212, 211
144, 252, 253, 221, 220, 244, 245, 213, 212
145, 253, 254, 222, 221, 245, 246, 214, 213
146, 254, 255, 223, 222, 246, 247, 215, 214
147, 255, 256, 224, 223, 247, 248, 216, 215
148, 226, 225, 257, 258, 228, 227, 259, 260
149, 225, 229, 261, 257, 227, 230, 262, 259
150, 229, 231, 263, 261, 230, 232, 264, 262
151, 231, 233, 265, 263, 232, 234, 266, 264
152, 233, 235, 267, 265, 234, 236, 268, 266
153, 235, 237, 269, 267, 236, 238, 270, 268
154, 237, 239, 271, 269, 238, 240, 272, 270
155, 274, 273, 241, 242, 260, 259, 227, 228
156, 273, 275, 243, 241, 259, 262, 230, 227
157, 275, 276, 244, 243, 262, 264, 232, 230

158, 276, 277, 245, 244, 264, 266, 234, 232
 159, 277, 278, 246, 245, 266, 268, 236, 234
 160, 278, 279, 247, 246, 268, 270, 238, 236
 161, 279, 280, 248, 247, 270, 272, 240, 238
 162, 282, 281, 249, 250, 274, 273, 241, 242
 163, 281, 283, 251, 249, 273, 275, 243, 241
 164, 283, 284, 252, 251, 275, 276, 244, 243
 165, 284, 285, 253, 252, 276, 277, 245, 244
 166, 285, 286, 254, 253, 277, 278, 246, 245
 167, 286, 287, 255, 254, 278, 279, 247, 246
 168, 287, 288, 256, 255, 279, 280, 248, 247
 169, 258, 257, 289, 290, 260, 259, 291, 292
 170, 257, 261, 293, 289, 259, 262, 294, 291
 171, 261, 263, 295, 293, 262, 264, 296, 294
 172, 263, 265, 297, 295, 264, 266, 298, 296
 173, 265, 267, 299, 297, 266, 268, 300, 298
 174, 267, 269, 301, 299, 268, 270, 302, 300
 175, 269, 271, 303, 301, 270, 272, 304, 302
 176, 306, 305, 273, 274, 292, 291, 259, 260
 177, 305, 307, 275, 273, 291, 294, 262, 259
 178, 307, 308, 276, 275, 294, 296, 264, 262
 179, 308, 309, 277, 276, 296, 298, 266, 264
 180, 309, 310, 278, 277, 298, 300, 268, 266
 181, 310, 311, 279, 278, 300, 302, 270, 268
 182, 311, 312, 280, 279, 302, 304, 272, 270
 183, 314, 313, 281, 282, 306, 305, 273, 274
 184, 313, 315, 283, 281, 305, 307, 275, 273
 185, 315, 316, 284, 283, 307, 308, 276, 275
 186, 316, 317, 285, 284, 308, 309, 277, 276
 187, 317, 318, 286, 285, 309, 310, 278, 277
 188, 318, 319, 287, 286, 310, 311, 279, 278
 189, 319, 320, 288, 287, 311, 312, 280, 279

*NSET, NSET=entrada → nós contidos na superfície de entrada

1, 2, 5, 6, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21,
 23, 25, 27, 29, 31, 33, 34, 37, 39, 41, 43,
 45, 47, 49, 50, 53, 55, 57, 59, 61, 63

*NSET, NSET=saida → nós contidos na superfície de saída

289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299,
 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310,
 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320

```

*NSSET, NSET=x0 → nós contidos na superfície do plano x = 0
    1,    4,    5,    8,   33,   36,   49,   52,   66,   68,   82,
    90,   98,  100,  114,  122,  130,  132,  146,  154,  162,  164,
   178,  186,  194,  196,  210,  218,  226,  228,  242,  250,  258,
   260,  274,  282,  290,  292,  306,  314
*NSSET, NSET=y0 → nós contidos na superfície do plano y = 0
    29,   30,   31,   32,   47,   48,   63,   64,   79,   80,   88,
    96,  111,  112,  120,  128,  143,  144,  152,  160,  175,  176,
   184,  192,  207,  208,  216,  224,  239,  240,  248,  256,  271,
   272,  280,  288,  303,  304,  312,  320
*BOUNDARY
entrada, 3 → referente à superfície de entrada, com z fixo
*BOUNDARY
saida, 3 → referente à superfície de saída, com z fixo
*BOUNDARY
x0, 1 → referente à superfície do plano x = 0, com x fixo
*BOUNDARY
y0, 2 → referente à superfície do plano y = 0, com y fixo
*NSSET,NSET=Na11,GENERATE
1,320 → nós variando do nº 1 ao 320
*MATERIAL,NAME=arteria → definição do material
*ELASTIC
    1000,    .3 → elasticidade (em MN/m²), coeficiente de Poisson
*SOLID SECTION,ELSET=Ea11,MATERIAL=arteria
**
*STEP
*STATIC
*CLOAD → nº do nó, direção, valor da força
49, 1, 3.84926e-14
49, 2, 2.38624e-06
50, 1, 1.06198e-06
50, 2, 4.65283e-06
51, 1, 2.06878e-06
51, 2, 9.06393e-06
52, 1, 7.49855e-14
52, 2, 4.64851e-06
53, 1, 2.07071e-06
53, 2, 4.29986e-06
54, 1, 4.03384e-06
54, 2, 8.37632e-06

```

55, 1, 2.97559e-06
55, 2, 3.73128e-06
56, 1, 5.79659e-06
56, 2, 7.26871e-06
57, 1, 3.73128e-06
57, 2, 2.97559e-06
58, 1, 7.26871e-06
58, 2, 5.79659e-06
59, 1, 4.29986e-06
59, 2, 2.07071e-06
60, 1, 8.37632e-06
60, 2, 4.03384e-06
61, 1, 4.65283e-06
61, 2, 1.06198e-06
62, 1, 9.06393e-06
62, 2, 2.06878e-06
63, 1, 2.38624e-06
63, 2, 3.55578e-14
64, 1, 4.64851e-06
64, 2, 6.92682e-14
89, 1, 1.87855e-06
89, 2, 8.23048e-06
90, 1, 6.80904e-14
90, 2, 4.22107e-06
91, 1, 3.66292e-06
91, 2, 7.60610e-06
92, 1, 5.26358e-06
92, 2, 6.60034e-06
93, 1, 6.60034e-06
93, 2, 5.26358e-06
94, 1, 7.60610e-06
94, 2, 3.66292e-06
95, 1, 8.23048e-06
95, 2, 1.87855e-06
96, 1, 4.22107e-06
96, 2, 6.28989e-14
121, 1, 1.59295e-06
121, 2, 6.97918e-06
122, 1, 5.77385e-14
122, 2, 3.57933e-06
123, 1, 3.10604e-06

123, 2, 6.44973e-06
124, 1, 4.46335e-06
124, 2, 5.59688e-06
125, 1, 5.59688e-06
125, 2, 4.46335e-06
126, 1, 6.44973e-06
126, 2, 3.10604e-06
127, 1, 6.97918e-06
127, 2, 1.59295e-06
128, 1, 3.57933e-06
128, 2, 5.33362e-14
153, 1, 1.25113e-06
153, 2, 5.48154e-06
154, 1, 4.53485e-14
154, 2, 2.81125e-06
155, 1, 2.43952e-06
155, 2, 5.06570e-06
156, 1, 3.50557e-06
156, 2, 4.39585e-06
157, 1, 4.39585e-06
157, 2, 3.50557e-06
158, 1, 5.06570e-06
158, 2, 2.43952e-06
159, 1, 5.48154e-06
159, 2, 1.25113e-06
160, 1, 2.81125e-06
160, 2, 4.18909e-14
185, 1, 8.91669e-07
185, 2, 3.90666e-06
186, 1, 3.23196e-14
186, 2, 2.00356e-06
187, 1, 1.73863e-06
187, 2, 3.61029e-06
188, 1, 2.49840e-06
188, 2, 3.13290e-06
189, 1, 3.13290e-06
189, 2, 2.49840e-06
190, 1, 3.61029e-06
190, 2, 1.73863e-06
191, 1, 3.90666e-06
191, 2, 8.91669e-07

192, 1, 2.00356e-06
192, 2, 2.98554e-14
217, 1, 5.52670e-07
217, 2, 2.42141e-06
218, 1, 2.00322e-14
218, 2, 1.24184e-06
219, 1, 1.07763e-06
219, 2, 2.23771e-06
220, 1, 1.54854e-06
220, 2, 1.94182e-06
221, 1, 1.94182e-06
221, 2, 1.54854e-06
222, 1, 2.23771e-06
222, 2, 1.07763e-06
223, 1, 2.42141e-06
223, 2, 5.52670e-07
224, 1, 1.24184e-06
224, 2, 1.85048e-14
249, 1, 2.71644e-07
249, 2, 1.19015e-06
250, 1, 9.84607e-15
250, 2, 6.10379e-07
251, 1, 5.29669e-07
251, 2, 1.09986e-06
252, 1, 7.61130e-07
252, 2, 9.54428e-07
253, 1, 9.54428e-07
253, 2, 7.61130e-07
254, 1, 1.09986e-06
254, 2, 5.29669e-07
255, 1, 1.19015e-06
255, 2, 2.71644e-07
256, 1, 6.10379e-07
256, 2, 9.09536e-15
281, 1, 8.55756e-08
281, 2, 3.74931e-07
282, 1, 3.10179e-15
282, 2, 1.92287e-07
283, 1, 1.66861e-07
283, 2, 3.46488e-07
284, 1, 2.39777e-07

```

284, 2, 3.00672e-07
285, 1, 3.00672e-07
285, 2, 2.39777e-07
286, 1, 3.46488e-07
286, 2, 1.66861e-07
287, 1, 3.74931e-07
287, 2, 8.55756e-08
288, 1, 1.92287e-07
288, 2, 2.86530e-15
313, 1, 1.54658e-08
313, 2, 6.77601e-08
314, 1, 5.60576e-16
314, 2, 3.47513e-08
315, 1, 3.01562e-08
315, 2, 6.26197e-08
316, 1, 4.33342e-08
316, 2, 5.43394e-08
317, 1, 5.43394e-08
317, 2, 4.33342e-08
318, 1, 6.26197e-08
318, 2, 3.01562e-08
319, 1, 6.77601e-08
319, 2, 1.54658e-08
320, 1, 3.47513e-08
320, 2, 5.17835e-16
*NODE PRINT,NSET=Na11
U
*EL PRINT,ELSET=Ea11
S
*END STEP

```

5.4 Resultados Obtidos

Na saída de dados do Calculix é possível escolher entre alguns métodos para que seja mostrada a distribuição de tensões. No caso, foi selecionada a Tensão Equivalente de Von Mises, cujo equacionamento é dado pela relação:

$$\sigma_{vm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2 + 6\tau_{xy}^2} \quad [8]$$

A partir dessa escolha, obteve-se a distribuição de tensão ao longo da artéria, como se pode observar:

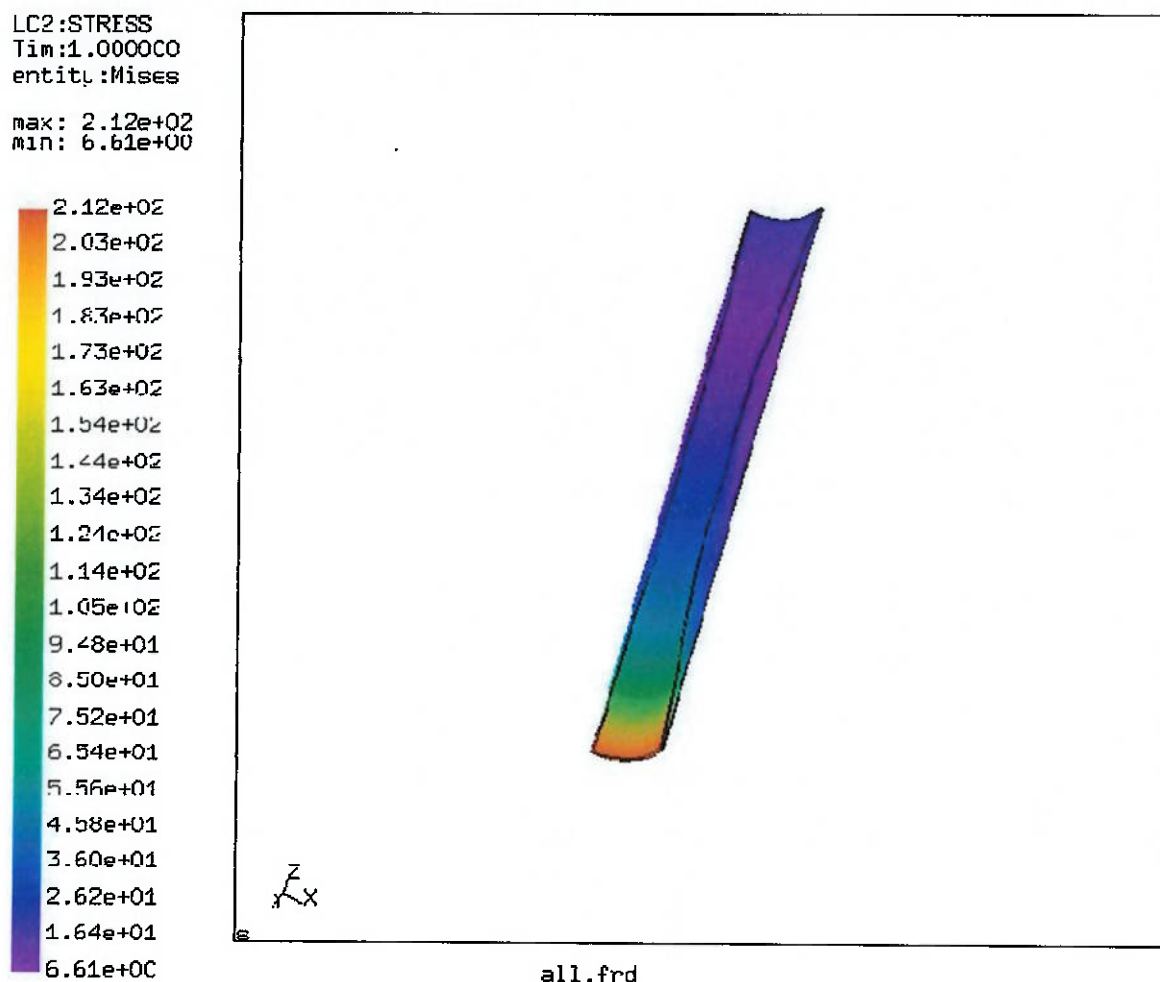


Figura 11 – Tensões

Com relação aos deslocamentos, esses podem ser obtidos em cada uma das direções x,y ou até mesmo uma equivalente de ambas. Para o caso estudado escolheu-se a segunda opção, e esta se encontra exibida abaixo.

LC1:DISP
Tim:1.000000
entitp:ALL

max: 3.12e-04
min: 8.16e-06

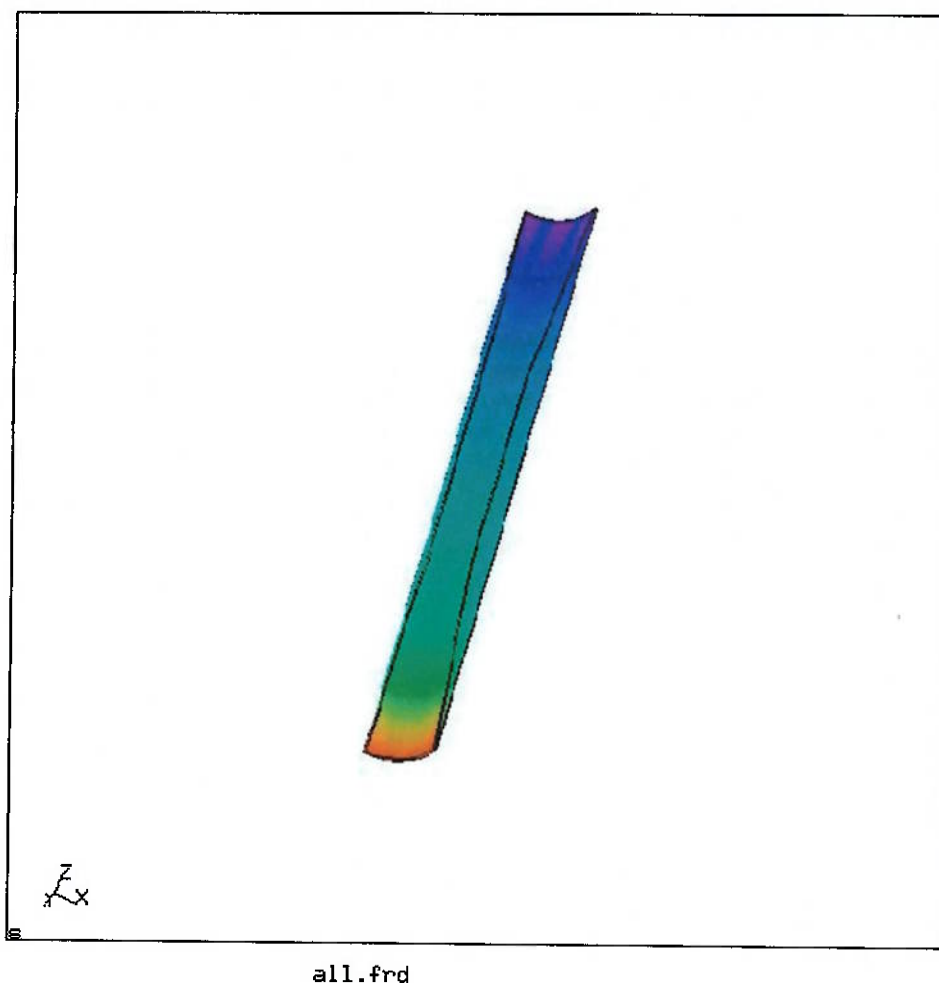
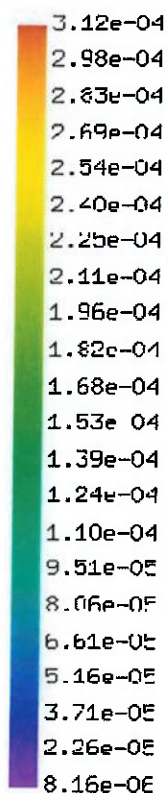


Figura 12 – Deslocamentos

O Calculix também possibilita que seja efetuada uma animação, simulando os deslocamentos gerados pela aplicação das forças. Três imagens foram geradas em diferentes instantes com o intuito de uma melhor visualização e essa sequência pode ser vista a seguir.

1º. instante

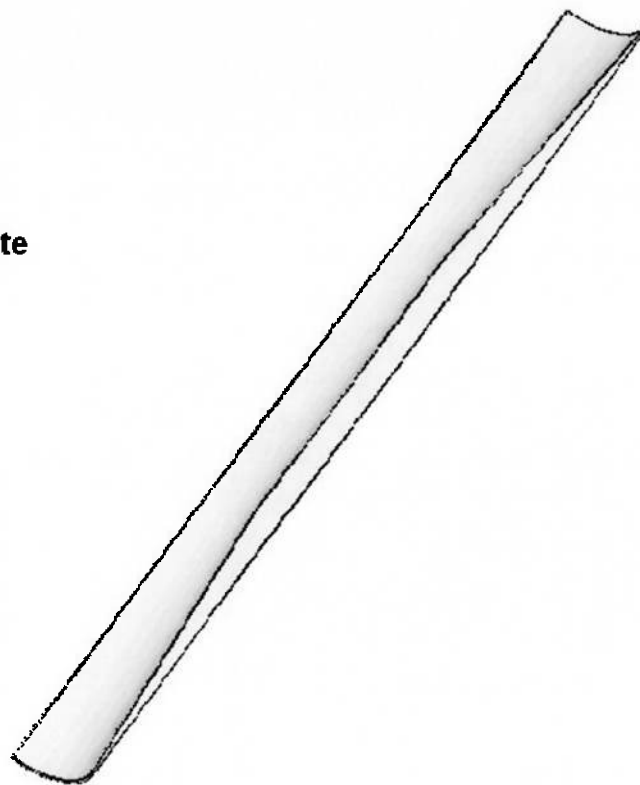


Figura 13.a – 1º instante de deslocamento

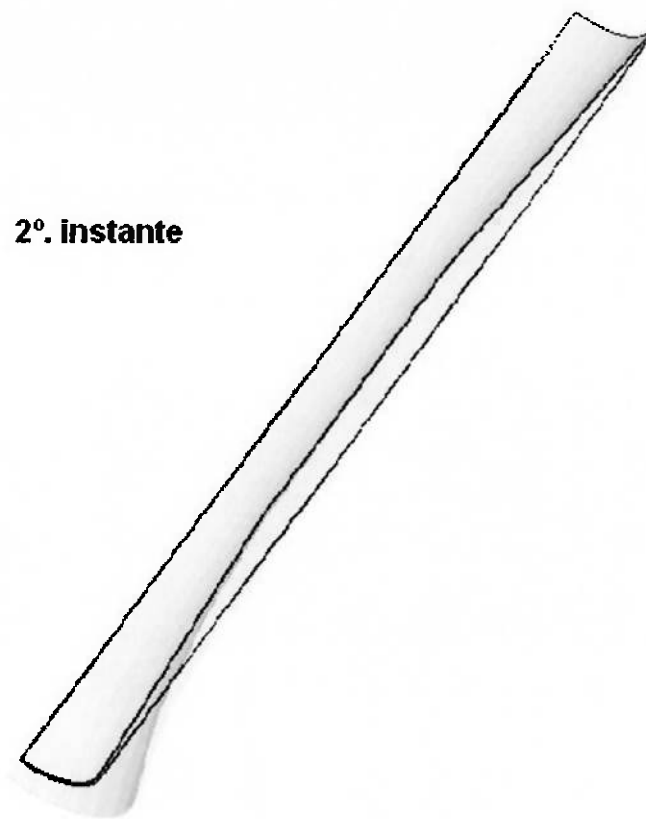


Figura 13.b – 2º instante de deslocamento

3º. instante

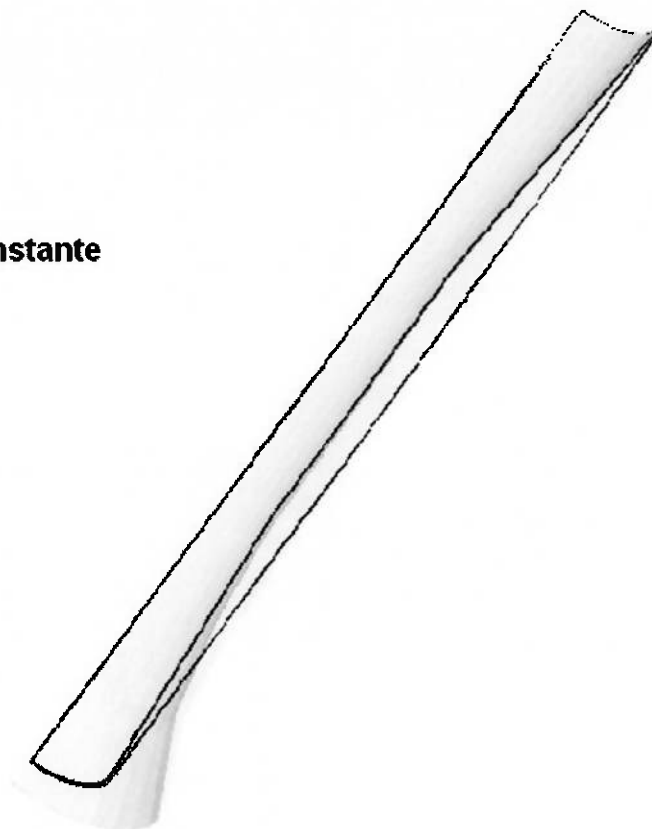


Figura 13.c – 3º instante de deslocamento

6 Conclusão

Pode-se concluir que os resultados obtidos são consistentes, pois estão de acordo com o previsto.

Através da análise fluídica observou-se que a velocidade do sangue aumenta no segmento de maior obstrução, onde o diâmetro é menor. Além disso, a pressão diminui ao longo do escoamento, sendo a taxa de decaimento mais acentuada na estenose.

Pela análise estrutural foi possível verificar as faixas de tensão de Von Mises e de deslocamentos, obtendo-se valores máximos e mínimos nesses casos e, também, a região onde ocorrem.

Assim, pode-se perceber, através das figuras correspondentes, que a máxima tensão ocorre logo à montante do escoamento, assim como o máximo deslocamento, o qual encontra-se simulado na figura 12.c.

Portanto, os resultados aqui demonstrados servirão como base para os futuros estudos sobre stents.

A deformação estrutural do vaso foi calculada utilizando hipóteses de linearidade geométrica e de propriedades do material. Este resultado pode ser utilizado para avaliar, com maior precisão, o campo de pressões do escoamento, que resultará em novo cálculo de deformação estrutural. Este é o método proposto de simulação numérica de “compliance” do vaso.

7 Bibliografia

www.cardiol.br [1]

www.hemodinamica.com.br [2]

www.unifesp.br [3]

www.sbc-sc.org.br [4]

<http://virtual01.lncc.br/monografia/monografia0/node10.html> [5]

Manual do Usuário Featflow1.1 [6]

Manual do Usuário Calculix Crunchix [7]

Manual do Usuário Calculix Graphix [8]

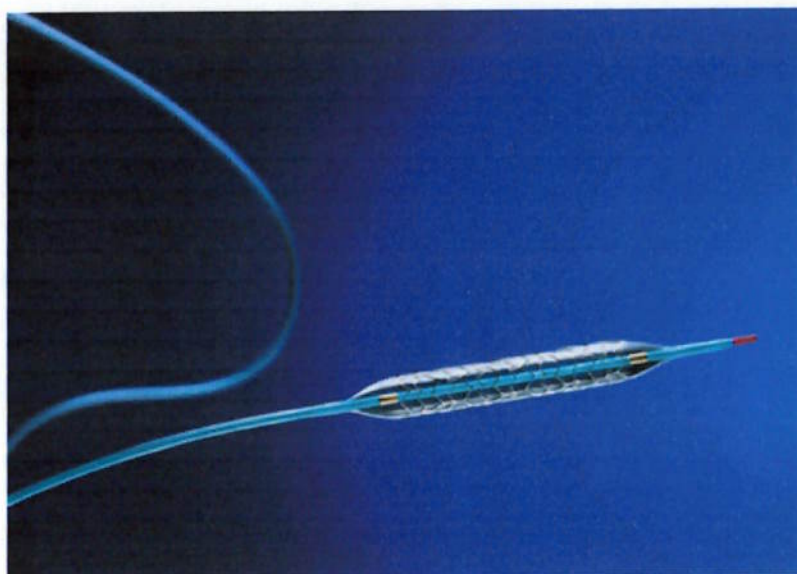
<http://www.bostonscientific.com/> [9]

8 Anexo

8.1 Anexo 1 – “St – Express 2” [9]

Será mostrado nesse item o stent referido no item 2.3, com destaque à sua geometria e ao conjunto stent + cateter, além de algumas informações extras.

Por último será exposto o catálogo correspondente.



Stent + Catéter



Forma Geométrica

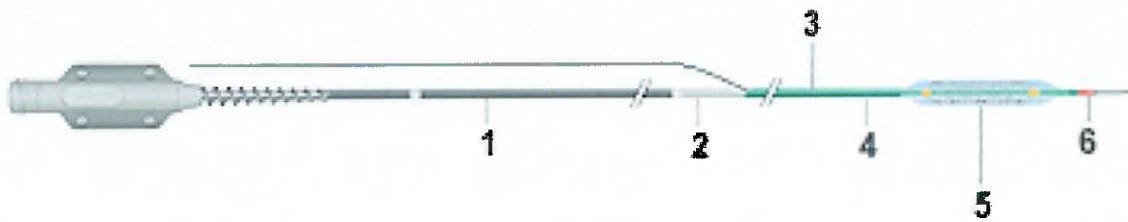
Express²™ Coronary Stent System

A fusion of first class deliverability, acute angiographic results and excellent versatility.

Features and Intended Benefits

- **First Class Deliverability:** Micro™ elements of Tandem Architecture™ stent design contribute to flexibility.
- **First Class Deliverability:** Laser Bonded TrakTip™ provides precise, smooth transitions for enhanced crossability. Crimp 360™ offers excellent stent-to-balloon securement.
- **Clean Angiographic Results:** Outstanding conformability enables the Express stent to respect natural contours of vessel. Uniform coverage provides consistent vessel support. Controlled growth of the DynaLEAP™ balloon promotes precise stent dilatation
- **Excellent Versatility:** Long, wide Macro™ elements contribute to diameter. Low profile and high securement provide confidence in crossing the lesion.
- Available in a full range of sizes and 5F guide compatibility for rapid exchange platforms up to and including 4.0 diameter.

Device Illustration



1. 1.8/2.0F full length hypotube shaft
2. Tapered corewire
3. Bioslide® hydrophilic coating
4. PEBAX® distal shaft 2.7F
5. DynaLEAP balloon material
6. Tapered TrakTip with .017" lesion entry profile

Express²™ Coronary Stent System

Instructions for Use

Refer to the operator's manual for complete instructions for use.

Indications

The Express2 Monorail/Express2 OTW are indicated for improving coronary luminal diameter in the following: Patients with symptomatic ischemic disease associated with stenotic lesions in native coronary arteries (length <18 mm) with a reference vessel diameter of 3.0 to 5.0 mm. Treatment of abrupt or threatened abrupt closure (AC/TAC) in patients with failed interventional therapy in lesions in native coronary arteries of 2.25 to 5.0 mm (inclusive) in diameter and <30mm long. Long-term outcome (beyond 6 months) for this permanent implant is unknown at present.

Contraindications

Patients in whom antiplatelet and/or anticoagulant therapy is contraindicated. Patients who are judged to have a lesion that prevents complete inflation of an angioplasty balloon.

Warnings

The device carries an associated risk of subacute thrombosis, vascular complications, and/or bleeding events. Therefore, patients should be carefully selected. Person allergic to 316L stainless steel may suffer an allergic reaction to this implant. The safety and effectiveness of the use of the Express stent in the treatment of restenotic lesions have not been established. Implanting a stent may lead to dissection of the vessel distal and/or proximal to the stented portion and may cause acute closure of the vessel requiring additional intervention (e.g. CABG, further dilation, placement of additional stents, or other).

Potential Adverse Effects

Aneurysm, arrhythmias, bleeding complications, death, distal emboli, emergent CABG, myocardial infarction, myocardial ischemia, occlusion, stent delivery failures, target lesion revascularization,

thrombosis, vascular complications, vessel dissection. Prior to use, please see the full Instructions for Use supplied with these devices.

Cautions

Federal (USA) law restricts this device to sale by or on the order of a physician.

Trademark

Express is a trademark of Boston Scientific Corporation or its affiliates.

Express²™ Coronary Stent System

A fusion of first class deliverability, acute angiographic results and excellent versatility.

• First Class Deliverability

- Micro[™] elements of Tandem Architecture[™] stent design contribute to flexibility.
- Laser Bonded Track Tip[™] provides precise, smooth transitions for enhanced crossability.
- Crimp 360[™] offers excellent stent-to-balloon securement.

• Clean Angiographic Results

- Outstanding conformability enables the Express[™] stent to respect natural contours of vessel.
- Uniform coverage provides consistent vessel support.
- Controlled growth of the DynaLEAP[™] balloon promotes precise stent dilatation.

• Excellent Versatility

- Long, wide Macro[™] elements contribute to cell diameter.
- Low profile and high securement provide confidence in crossing the lesion.
- Available in a full range of sizes and 5F guide compatibility for rapid exchange platforms up to and including 4.0 diameter.

Product Information

Stent Length	Stent Diameter	Monorail	Over-the-Wire
Express² Coronary Stent System			
8	2.25	H749 3505008220	H749 3507008220
8	2.5	H749 3505008250	H749 3507008250
8	2.75	H749 3505008270	H749 3507008270
8	3	H749 3505008300	H749 3507008300
8	3.5	H749 3505008350	H749 3507008350
8	4	H749 3505008400	H749 3507008400
12	2.25	H749 3505012220	H749 3507012220
12	2.5	H749 3505012250	H749 3507012250
12	2.75	H749 3505012270	H749 3507012270
12	3	H749 3505012300	H749 3507012300
12	3.5	H749 3505012350	H749 3507012350
12	4	H749 3505012400	H749 3507012400
12	4.5	H749 3505012450	H749 3507012450
12	5	H749 3505012500	H749 3507012500
16	2.25	H749 3505016220	H749 3507016220
16	2.5	H749 3505016250	H749 3507016250
16	2.75	H749 3505016270	H749 3507016270
16	3	H749 3505016300	H749 3507016300
16	3.5	H749 3505016350	H749 3507016350

**Boston
Scientific®**

www.bostonscientific.com

Distributed in the US by
Boston Scientific Corporation
One Boston Scientific Place
Natick, MA 01760

Ordering Information
1.800.225.3238

<i>Stent Length</i>	<i>Stent Diameter</i>	<i>Monorail</i>	<i>Over-the-Wire</i>
Express² Coronary Stent System			
16	4	H749 3505016400	H749 3507016400
16	4.5	H749 3505016450	H749 3507016450
16	5	H749 3505016500	H749 3507016500
20	2.25	H749 3505020220	H749 3507020220
20	2.5	H749 3505020250	H749 3507020250
20	2.75	H749 3505020270	H749 3507020270
20	3	H749 3505020300	H749 3507020300
20	3.5	H749 3505020350	H749 3507020350
20	4	H749 3505020400	H749 3507020400
20	4.5	H749 3505020450	H749 3507020450
20	5	H749 3505020500	H749 3507020500
24	2.25	H749 3505024220	H749 3507024220
24	2.5	H749 3505024250	H749 3507024250
24	2.75	H749 3505024270	H749 3507024270
24	3	H749 3505024300	H749 3507024300
24	3.5	H749 3505024350	H749 3507024350
24	4	H749 3505024400	H749 3507024400
24	4.5	H749 3505024450	H749 3507024450
24	5	H749 3505024500	H749 3507024500
28	2.75	H749 3505028270	H749 3507028270
28	3	H749 3505028300	H749 3507028300
28	3.5	H749 3505028350	H749 3507028350
28	4	H749 3505028400	H749 3507028400
28	4.5	H749 3505028450	H749 3507028450
28	5	H749 3505028500	H749 3507028500
32	2.75	H749 3505032270	H749 3507032270
32	3	H749 3505032300	H749 3507032300
32	3.5	H749 3505032350	H749 3507032350
32	4	H749 3505032400	H749 3507032400
32	4.5	H749 3505032450	H749 3507032450
32	5	H749 3505032500	H749 3507032500

Indications

The Express² Monorail™/Express² OTW Stent Systems are indicated for improving coronary luminal diameter in the following:

- Patients with symptomatic ischemic disease associated with stenotic lesions in native coronary arteries (length < 18 mm) with a reference vessel diameter of 3.0 to 5.0 mm.
- Treatment of abrupt or threatened abrupt closure (AC/TAC) in patients with failed interventional therapy in lesions in native coronary arteries of 2.25 to 5.0 mm (inclusive) in diameter and < 30 mm long.

Long-term outcome (beyond 6 months) for this permanent implant is unknown at present.

**Boston
Scientific®**

www.bostonscientific.com

Distributed in the US by
Boston Scientific Corporation
One Boston Scientific Place
Natick, MA 01760

Ordering Information
1.800.225.3238

Contraindications

- Patients in whom antiplatelet and/or anticoagulant therapy is contraindicated.
- Patients who are judged to have a lesion that prevents complete inflation of an angioplasty balloon.

Warnings

The device carries an associated risk of subacute thrombosis, vascular complications, and/or bleeding events. Therefore, patients should be carefully selected. Persons allergic to 316L stainless steel may suffer an allergic reaction to this implant.

The safety and effectiveness of the use of the Express stent in the treatment of restenotic lesions have not been established.

Implanting a stent may lead to dissection of the vessel distal and/or proximal to the stented portion and may cause acute closure of the vessel requiring additional intervention (e.g. CABG, further dilation, placement of additional stents, or other).

Potential Adverse Effects

Aneurysm, arrhythmias, bleeding complications, death, distal emboli, emergent CABG, myocardial infarction, myocardial ischemia, occlusion, stent delivery failures, target lesion revascularization, thrombosis, vascular complications, vessel dissection. Prior to use, please see the full "Instructions for Use" supplied with these devices.

Cautions

Federal (USA) law restricts this device to sale by or on the order of a physician.

**Boston
Scientific®**

www.bostonscientific.com

Distributed in the US by
Boston Scientific Corporation
One Boston Scientific Place
Natick, MA 01760

Ordering Information
1.800.225.3238