

Simulação Numérica e Análise
de Sensibilidades do Processo
de Injeção de Plásticos

PAULO ALEXANDRE GONÇALVES PILOTO
(LICENCIADO)
1994



**UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE DE
SENSIBILIDADES DO PROCESSO DE INJEÇÃO DE
PLÁSTICOS**

**PAULO ALEXANDRE GONÇALVES PILOTO
(LICENCIADO)**

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

FEVEREIRO 1994

NOME: Paulo Alexandre Gonçalves Piloto
DEPARTAMENTO: ENGENHARIA MECÂNICA
ORIENTADOR: Prof. Luis Faria
DATA: Fevereiro de 1994
TÍTULO: SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE DE SENSIBILIDADES
DO PROCESSO DE INJEÇÃO DE PLÁSTICOS.

RESUMO:

Trata-se de uma formulação do processo de injeção, utilizando um escoamento do tipo "Hele Shaw" para fluidos Newtonianos. O processo matemático trata a equação de Reynolds numa região desconhecida cuja fronteira se move com o tempo. Através da transformação de variáveis, obtém-se uma formulação em desigualdades variacionais que utiliza o método de Penalty para resolver o problema da fronteira móvel. O domínio a estudar passa a ser o da cavidade 2D total e fixo. O processo desenrola-se a caudal constante, sendo a fronteira móvel determinada iterativamente.

O processo de discretização do domínio recorre a elementos finitos lineares ou quadráticos.

O projectista tem acesso a um "package" de sensibilidades das variáveis de estado relativamente às variáveis de projecto (espessura e localização do ponto de injeção), que o poderão auxiliar na direcção do óptimo.

Pretende-se assim obter um simulador do processo como auxílio de projecto, utilizando métodos não iterativos no tempo.

**TITLE: NUMERICAL SIMULATION AND SENSITIVITY ANALYSIS IN
INJECTION MOULDING.**

ABSTRACT:

The formulation used in this program is based in the "Hele Shaw" flow only to Newtonians fluids. The mathematical problem solves Reynold's equation in a unknown region whose boundary changes with time. By a variable transformation, a formulation in variational inequalities is obtained. For a certain time the solution is obtained by a Penalty approximation. The domain to treat is expanded to the fixe 2D one (cavity). This process is at constant flow rate and the moving boundary is found by an iterative procedure.

The discritization of the domain can be done using linear or quadratic elements.

The input data needed to this code is:-material data, volume of input material and injection time. The user can display the stress and velocity field, as well as the U and pressure results.

The designer has the possibility to calculate the sensitivities of the design variables (thickness and gate location), which can help him to decide the best solution to optimize the process.

The objective is to obtain a simulator, helping the design and using non iterative procedure in time.

Nome: Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Título: SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE DE SENSIBILIDADES DO
PROCESSO DE INJEÇÃO DE PLÁSTICOS.

Palavras Chave

Injecção de Plástico
Tempo e Número de Pontos de Injecção
Desigualdades Variacionais
Elementos Finitos
Campo de Pressão, velocidades e tensões
Apoio ao Projecto- Sensibilidades

Keywords



Plastic Injection
Time and Number of Injection Points
Variation inequalities
Finite Elements
Pressure, velocity and stress Field
Design Support- Sensitivities

AGRADECIMENTOS

Agradeço todo o apoio logístico para a elaboração deste trabalho ao Pessoal Docente responsável pelos laboratórios de investigação, bem como a toda secção de Projecto Mecânico.

Agradecimento especial ao orientador Prof. Luis Faria, pelos conselhos prestados antes, após e durante a execução desta dissertação.

À minha Esposa Elza Fonseca dedico e agradeço toda a atenção compreensão e paciência indispensáveis para a conclusão deste objectivo.


12 14 - 19 5


ÍNDICE

INTRODUÇÃO.....	9
CAPÍTULO I-INJEÇÃO DE MOLDES.....	11
1.1-O interesse tecnológico.....	12
1.2-A injeção moldada.....	13
1.3-Apresentação do escoamento em estudo.....	14
1.4-Propriedades dos fluidos.....	19
CAPÍTULO II-EQUAÇÕES DE DOMÍNIO.....	21
2.1-Simplificações	22
2.2-Equação de Reynolds.....	23
CAPÍTULO III-FORMULAÇÃO NUMÉRICA.....	26
3.1-Formulação integral do problema.....	27
CAPÍTULO IV-TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS E FORMULAÇÃO INTEGRAL.....	30
4.1-Transformação geométrica.....	31
4.2-Alteração do domínio de integração.....	32
4.3-Continuação da formulação integral.....	32
CAPÍTULO V-CAMPOS DE VELOCIDADES E DE TENSÕES.....	34
5.1-Determinação do campo de velocidades.....	35
5.2-Determinação do campo de tensões.....	36
CAPÍTULO VI-ELEMENTOS FINITOS E INTEGRAÇÃO NUMÉRICA.....	37

6.1-Elementos utilizados.....	38
6.1.1-Elemento triangular linear.....	38
6.1.2-Elemento triangular quadrático.....	39
6.2-Método de Hammer.....	40
6.3-Distorção dos elementos.....	41
CAPÍTULO VII-SENSIBILIDADES.....	43
7.1-Medidores de performance do sistema.....	44
7.2-Sensibilidade de U relativamente à variável tempo.....	45
7.3-Sensibilidades de U relativamente à alteração da posição do ponto de injeção (gate).....	46
7.4-Sensibilidades de U relativamente à alteração da espessura de uma parte da cavidade.....	47
7.5-Exemplificação para o caso unidimensional do enchimento de uma cavidade.....	48
CAPÍTULO VIII-INTERFACES DE PRÉ E PÓS PROCESSAMENTO.....	51
8.1-Interfaces para PATRAN®.....	52
CAPÍTULO IX-EXEMPLOS.....	53
9.1-Exemplo 1- Placa.....	54
9.2-Exemplo 2- Clip.....	56
9.3-Exemplo 3- Placa com depressão	59
9.4-Exemplo 4- Placa rectangular com dois pontos de injeção.....	62
9.5-Exemplo 5- Aproximação do caso unidimensional. Comparação analítica.....	63

CAPÍTULO X-ALGORITMO.....	68
10.1-Algoritmo para implementação em computador...	69
CAPÍTULO XI-CONCLUSÕES.....	73
11.1-Conclusões e trabalhos futuros.....	74
ANEXO A.....	75
A1-Código compilado em HP-UX.....	76
BIBLIOGRAFIA.....	92

INTRODUÇÃO

A simulação do enchimento de moldes para plásticos é uma ferramenta para o projectista, já que este pode prever a resposta do sistema sem ter a necessidade de fazer ensaios repetitivos e eventualmente destrutivos.

A investigação em injeção moldada surgiu no início da década de 50 com os trabalhos de Spencer e Gilmore, os quais foram pioneiros na dinâmica dos fluidos e na determinação do campo de pressões, tensões, etc.

Beyer e Spencer, investigaram o enchimento de um modelo circular com a localização do ponto de injeção na sua circunferência. Descobriram também que o tempo de enchimento era directamente proporcional à viscosidade do material e inversamente proporcional à pressão na "gate" elevada à potência n (expoente da lei da potência).[14]

Menges e Liebfried investigaram o escoamento numa placa rectangular, enquanto White e Dee se dedicaram às linhas de escoamento descobrindo que o efeito do arrefecimento do molde no escoamento era desprezável.[14]

Trabalhos teóricos desenvolvidos por Harry e Parrot, utilizando a equação de momentum, energia e condições fronteira apropriadas, serviram para simular o processo aproximado de enchimento.[14]

Berger e Gogos resolveram o problema do enchimento de uma placa radial com a lei de potência de um determinado fluido. Destes trabalhos concluíram que as condições não isotérmicas não afectavam significativamente a taxa de enchimento da cavidade.[14]

Kamal e Kenig, resolveram o caso de um modelo semi circular, com a "gate" no centro geométrico do círculo. Pretendiam determinar a posição da frente de escoamento para instantes diferentes. Tanto quanto se sabe, os valores teóricos poderiam ser razoavelmente comparados aos verificados na prática.[14]

Richardson sugeriu uma solução para o enchimento utilizando um escoamento do tipo Hele Shaw, com um fluido Newtoniano. Broyer e outros, resolveram o caso isotérmico de um canal rectangular.[14]

O trabalho que aqui se apresenta, estuda o comportamento do fluido Newtoniano, escoamento isotérmico tipo Hele Shaw e utiliza o tempo como parâmetro. A fronteira é determinada iterativamente utilizando as condições apropriadas.

No processo de injeção existe um polímero fundido, normalmente um fluido não Newtoniano que flui para a cavidade,

num processo que poderá ser a caudal constante ou a pressão constante. Este processo compreende globalmente três fases, tendo cada uma delas influência nas propriedades mecânicas do produto final.

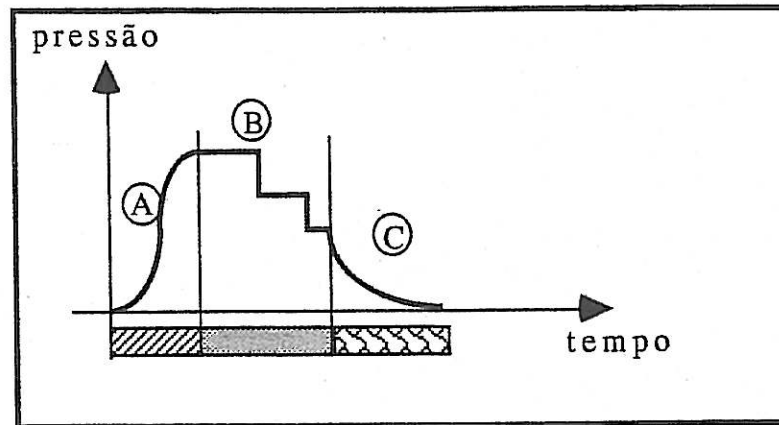


Fig.1-Fases do ciclo de injeção de um molde.

Numa primeira fase A, o fluido escoa para dentro da cavidade até encher. A pressão no ponto de injeção aumenta com o tempo.

Na segunda fase B, é adicionada uma quantidade de material que compacta o já existente. A pressão neste mesmo ponto pode manter-se constante, enquanto o material não solidificar completamente, diminuindo assim o efeito da contracção.

Por último, ocorre a fase de arrefecimento, onde se processa a troca de calor entre o modelo e o molde. Os processos de transferência de calor em presença são sobretudo: -condução através das paredes do molde e convecção para os canais de arrefecimento deste.

O efeito da solidificação no escoamento durante a primeira fase poderá ser desprezado, surgindo assim a possibilidade do estudo da fase de enchimento, admitindo um escoamento isotérmico. Na hipótese deste escoamento (Hele Shaw), é possível discretizar a cavidade em elementos finitos com o objectivo de melhorar a qualidade do modelo.[3]

A simulação do enchimento é uma ajuda ao projectista, pois possibilita recolocar os "ataques", posicionar pontos de fuga e balancear os enchimentos. Por forma a evitar simulações repetitivas e perdas de tempo, o projectista necessitaria de um código de optimização automática. Para tal, torna-se necessário a definição de sensibilidades dos medidores de performance do sistema.

A utilização de elementos finitos torna-se necessária para a resolução das equações em presença. Este trabalho estuda domínios 2D e 3D planificáveis.

Capítulo I

Injecção de moldes

- 1.1-O interesse tecnológico
- 1.2-A injecção moldada
- 1.3-Apresentação do escoamento em estudo
- 1.4-Propriedades dos fluidos

1.1-Interesse tecnológico

A produção de plásticos tem vindo a crescer com o aparecimento de novas tecnologias. Das principais indústrias consumidoras destacam-se as dos automóveis e alimentares. A informática surge a consagrar novas oportunidades, com a introdução de novas técnicas, nomeadamente, a utilização de software de análise de projecto.

Existem vários programas de análise de injeção de moldes, como são exemplo: Moldflow, C-mold, entre outros.

Feita uma análise cuidada do processo produtivo, foi possível estabelecer os custos para as fases mais importantes deste. Assim, observe-se a redução conseguida depois da utilização de software apropriado. [1]

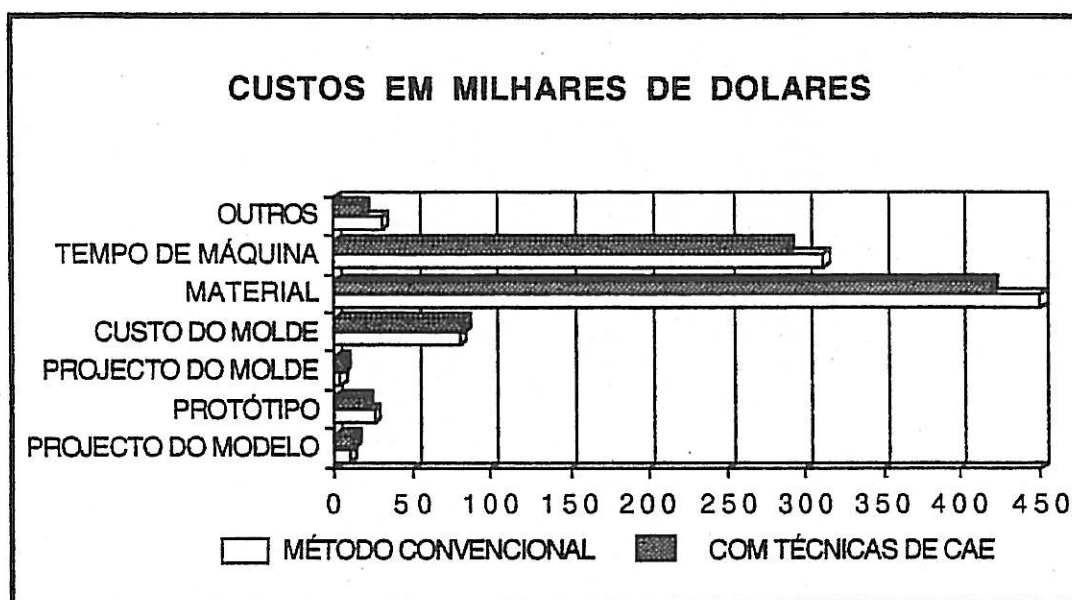


Fig.2-Custos de produção de um plástico.

Dado o número de variáveis envolvidas no processo de moldação e a complexidade no relacionamento dessas variáveis, deverá o projectista ser capaz de quantificar os factores que irão afectar a qualidade do produto final.

O objectivo da técnica CAE para a indústria de plásticos será quantificar os factores que afectam o comportamento destes numa determinada aplicação. Utilizando software apropriado para simular o processo de enchimento, torna-se possível detectar problemas antes que eles ocorram e processar informação para os resolver, otimizando assim o processo.

A fabricação de moldes recorre actualmente à utilização de máquinas CNC, directamente ligadas a sistemas com suporte de software para execução de maquinagem (CAM). A capacidade para produzir modelos tridimensionais tem aumentado, permitindo obter precisões bastante elevadas.

Em termos de reduções de custos, a utilização de programas de análise possibilita obter uma redução destes na fase final, embora os aumente ligeiramente no início (ver figura 2). No final o balanço é positivo.

Para que estes benefícios se tornem realidade, a introdução destas tecnologias necessitam da alteração do ciclo produtivo. Isto significa que durante a fase de projecto do produto, a concepção do molde e as condições de processamento (temperatura de fusão, temperatura do molde e tempo de enchimento) deverão estar já determinadas.[1]

1.2-A injeção moldada

O ciclo produtivo do modelo é caracterizado por cinco etapas principais:- fusão do plástico;- injeção do fluido;- empacotamento;- arrefecimento do plástico;- ejeção do modelo.

A qualidade do produto final deve ter em consideração as propriedades estruturais do modelo bem como o seu aspecto estético.

O processo de injeção de moldes é muito dependente das condições escolhidas para a transformação do grau da matéria prima utilizada, dos detalhes das zonas moldantes e do posicionamento dos sistemas de enchimento e arrefecimento.

Quando um plástico flui num molde existem alguns aspectos que podem influir na qualidade final do modelo de diferentes formas.

-O aumento da temperatura de fusão, diminui a viscosidade do fluido, resultante numa diminuição de tensões e pressão máxima necessária. Pode por outro lado, queimar o material e aumentar o tempo de arrefecimento, provocando atrasos no ciclo produtivo.

-O aumento da temperatura do molde, reduz perdas de calor, diminuindo a máxima diferença de temperatura no molde. Por outro lado aumenta o tempo de arrefecimento, provocando efeitos semelhantes ao do ponto anterior.

-Diminuição do tempo de enchimento, requerendo assim um aumento de pressão, já que o caudal deverá ser maior, aumentando as taxas de corte e as tensões. Por outro lado provoca a diminuição da máxima diferença de temperatura.

Existem métodos de quantificação da qualidade do modelo, estando esta relacionada com deformações permanentes e degradação do material.

No que diz respeito às deformações permanentes, as causas mais importantes são:

- distribuição de temperatura não uniforme;
- anisotropia causada a quando da solidificação;
- falta de homogeneidade na densidade do material;
- distribuição desequilibrada das tensões residuais.

As principais causas da degradação do material estão relacionadas com as elevadas taxas de corte e as altas temperaturas que poderão conduzir à queima das peças.

1.3-Apresentação do escoamento em estudo.

A formulação que se segue é específica para fluidos Newtonianos e escoamentos incompressíveis. Para tal recorre-se às equações da mecânica dos filmes delgados viscosos.

Para espessuras relativamente pequenas, quando comparadas com as outras duas dimensões, pode-se estabelecer a lei de comportamento no domínio. Esta resulta da integração das equações de conservação do momentum e substituição na equação da conservação da massa.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \right) = -Q \langle P - P_{inj} \rangle^{-1} \quad (1)$$

Nesta equação, h representa a espessura da zona onde o fluido passa, p representa a pressão e Q o caudal a introduzir pelo ponto P_{inj} . A função δ de Dirac é representada por $\langle P - P_{inj} \rangle^{-1}$.

A figura seguinte é exemplificativa das condições fronteiras e do processo de enchimento do molde.

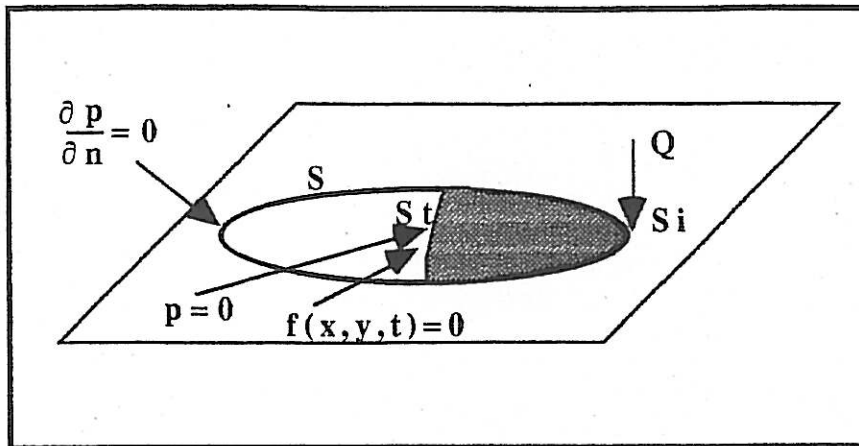


Fig.3-Simulação do enchimento de um molde.

Pela fronteira S_i , entra um fluxo Q de plástico fundido à temperatura de injeção ou de processamento.

Na fronteira S_t , para um instante intermédio, como não é conhecida a sua localização, são necessárias duas condições:

i) $p=0$

ii) Sendo a fronteira móvel definida pela equação $f(x,y,t)=0$. A derivada total de f em ordem ao tempo dá origem à segunda condição que traduz a igualdade entre as velocidades do fluido e a velocidade da fronteira móvel.

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial t} = 0$$

Na fronteira $S-S_i$, a velocidade das paredes é nula.

Esta formulação necessita de um processo iterativo no tempo para a respectiva localização da fronteira móvel, ao qual sucederia uma resolução de um problema linear em S_t : $S \nabla^2 p = 0$, em que S representa o coeficiente de fluidez do material ($S = h^3 / 12 \mu$).

Para contornar este problema iterativo no tempo, transforma-se o problema, recorrendo a desigualdades variacionais.

Em vez de se resolver o problema num domínio variável, complementa-se, estendendo-o a um domínio fixo. Para tal, recorre-se à substituição das variáveis de estado:

$$U(x,y,t) = \begin{cases} \int_{l(x,y)}^t p(x,y,\tau) d\tau & t > l(x,y) \\ 0 & t \leq l(x,y) \end{cases} \quad (2)$$

em que $l(x,y)$ resulta da explicitação do tempo na equação que localiza a fronteira da formulação anterior ($f(x,y,t)=0$).

Derivando a variável U em relação às variáveis do domínio, obtem-se:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \int_{l(x,y)}^t \frac{\partial p}{\partial x}(x,y,t) \cdot d\tau - p(x,y,l(x,y)) \cdot \left. \frac{\partial l}{\partial x} \right|_{\tau=l(x,y)} \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \int_{l(x,y)}^t \frac{\partial p}{\partial y}(x,y,t) \cdot d\tau - p(x,y,l(x,y)) \cdot \left. \frac{\partial l}{\partial y} \right|_{\tau=l(x,y)}$$

Derivando mais uma vez relativamente às mesmas variáveis.

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \int_{l(x,y)}^t \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}(x,y,t) \cdot d\tau - \frac{\partial p}{\partial x}(x,y,l(x,y)) \cdot \left. \frac{\partial l}{\partial x} \right|_{\tau=l(x,y)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \int_{l(x,y)}^t \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}(x,y,t) \cdot d\tau - \frac{\partial p}{\partial y}(x,y,l(x,y)) \cdot \left. \frac{\partial l}{\partial y} \right|_{\tau=l(x,y)}$$

Por outro lado, da condição fronteira $f(x,y,t)=0$ é possível obter uma relação entre o gradiente de $l(x,y)$ e o gradiente da pressão. Assim:

$$\begin{aligned} \frac{Df}{Dt} = 0 &\Leftrightarrow \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \\ &\Leftrightarrow \frac{\partial f}{\partial t} = -\nabla f \cdot \vec{V} \end{aligned} \quad (5)$$

Explicitando a variável tempo da condição $f(x,y,t)=0$, obtem-se:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 1; \quad \frac{\partial f}{\partial x} = -\frac{\partial l(x,y)}{\partial x}; \quad \frac{\partial f}{\partial y} = -\frac{\partial l(x,y)}{\partial y} \quad (6)$$

Pode-se então re-escrever a condição na fronteira da seguinte forma:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\nabla f \cdot \vec{V}_{\text{médio}} \Leftrightarrow \frac{12 \cdot \mu}{h^2} = -\nabla l \cdot \nabla p \quad (7)$$

Utilizando agora estes resultados, introduzindo-os nas expressões 4 e somando-as, obtem-se:

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \cdot \int_{l(x,y)}^i d\tau + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \cdot \int_{l(x,y)}^i d\tau + \frac{12 \cdot \mu}{h^2}$$

ou de uma forma mais simplificada:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -Q_t \langle P - P_{inj} \rangle^{-1} + h \quad (8)$$

A verdadeira extensão ao domínio fixo ocorre quando se define $U=0$ em S-St, dando origem ao seguinte problema de complementariedade:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(S \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \cdot \frac{\partial U}{\partial y} \right) + Q_t \langle P - P_{inj} \rangle^{-1} - h \right] \cdot U = 0$$

O primeiro factor será válido em St, enquanto que o segundo valida o resto do domínio.

Por definição, U deverá obedecer a:

$$U \geq 0 \quad (9)$$

e ainda:

$$S \cdot \nabla^2 U + Q_t \langle P - P_{inj} \rangle^{-1} - h \geq 0 \quad (10)$$

A localização da fronteira neste segundo método será um processo iterativo, não no tempo, mas em U.

Este problema deverá ser discretizado por elementos finitos e a resolução de sistemas iterada, utilizando a penalização dos termos das diagonais. Só assim se conseguirá garantir que U seja sempre positivo e ao mesmo tempo, impor condições fronteira de velocidade nula.

Neste novo problema, as condições fronteira são as seguintes:

1-Pela fronteira Si, entra um volume igual a Qt.

2- Na fronteira móvel U e a sua derivada normal deverão ser nulos.

3-Na restante fronteira S, a derivada normal de U deverá ser anulada.

No caso do processo de injeção a caudal constante, bastará alterar o valor do instante em análise para saber onde se localiza a fronteira. Posteriormente, utilizando a matriz elementar global penalizada (indicativa da posição da fronteira) e o valor do caudal, resolve-se o sistema em ordem à variável de domínio - pressão.

Para simular a injeção do fluido e o comportamento deste, a equação a utilizar deverá ser a seguinte:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial U}{\partial y} \right) = h - \sum_{j=1}^n Q^j t < P - P^{j_{inj}} >^{-1} \quad (11)$$

O segundo membro contém uma fonte distribuída e uma ou mais fontes concentradas, representativas do caudal nos pontos de injeção.

Na figura seguinte encontra-se representado o sentido positivo destas cargas. Estas deverão ser introduzidas no PATRAN® como força distribuída e negativa numa "patch" e uma força concentrada e positiva, de valor Q_t nos nós de injeção (ver manual de utilização do programa flowdtool).

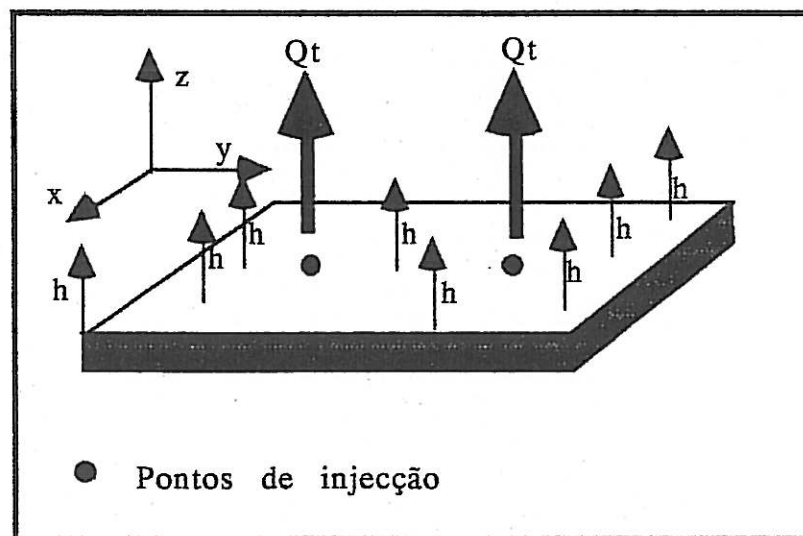


Fig.4-Sentidos positivos das solicitações.

Analiticamente seria impossível resolver esta equação, pelo que se recorre aos métodos numéricos para discretizar o modelo contínuo. Na modelação discreta, utilizar-se-ão elementos triangulares lineares e quadráticos, ambos isoparamétricos, aos quais se fará referência mais à frente.

Numéricamente, e porque se trata de um escoamento incompressível, torna-se necessário que a fonte concentrada seja sempre menor ou igual do que a fonte distribuída.

1.4-Propriedades dos fluidos

Dada a característica do escoamento, a única propriedade a realçar é a viscosidade. A maior parte das teorias descrevem-na como uma barreira de energia potencial que deverá ser vencida pelas moléculas que estão a ser movidas umas sobre as outras, isto numa visão microscópica da deformação do fluido. Para os fluidos a que diz respeito este estudo, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura e com o aumento da velocidade de deformação do material (ver figura seguinte).

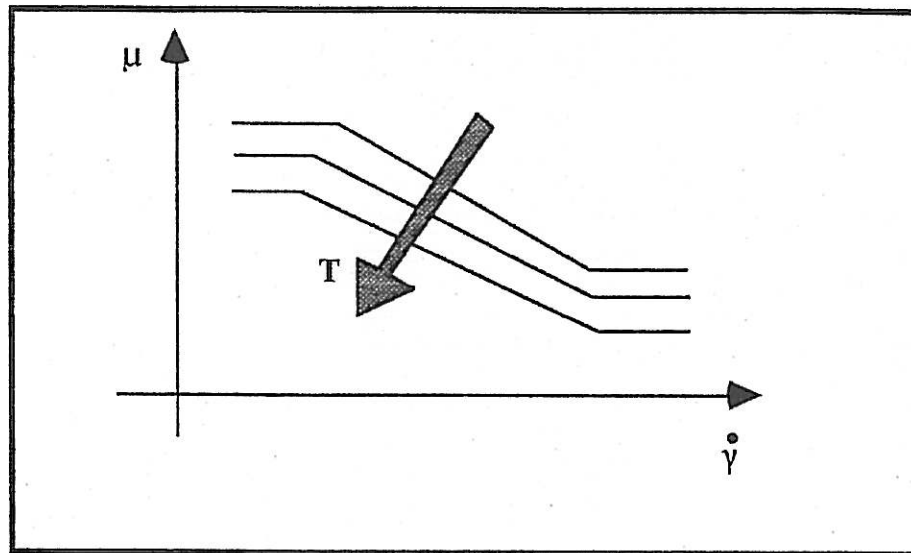


Fig.5-Variação da viscosidade com duas variáveis.

A variação da viscosidade com a temperatura é obtida através da expressão [4]:

$$\mu(T) = \mu(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^n \cdot e^{[B(T^{-1}-T_0^{-1})]} \quad (12)$$

em que n representa o índice da lei da potência e T_0 uma temperatura de referência. Note-se que para um fluido Newtonino $n=1$.

Se derivarmos esta expressão relativamente à temperatura, obtém-se o valor da sensibilidade analítica adimensional.[4]

$$S_{T\mu} = \frac{T}{\mu} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial T} = n - \frac{B}{T} \quad (13)$$

Uma teoria que ignore a variação da viscosidade com a temperatura deverá obedecer à relação:[4]

$$\left(\frac{\Delta T}{T}\right) \cdot S_{T_{\mu}} \ll 1 \quad (14)$$

O diferencial da temperatura representa a maior variação de temperatura que se deverá verificar no escoamento. Esta não deverá ser superior a 20°C para que não se formem zonas de solidificação que possam impedir o movimento do fluido[6]. Para cada material deveria ser calculado este parâmetro.

Para baixas taxas de deformação a viscosidade pouco se altera. Na maior parte dos escoamentos poliméricos, à medida que a referida taxa aumenta a viscosidade diminui.

Neste trabalho não se tem em consideração a variação da viscosidade com a temperatura, nem com a taxa de corte, apresentando assim uma simulação aproximada para o projecto de injeção moldada.

Capítulo II

Equações de domínio

2.1-Simplificações utilizadas

2.2-Equação de Reynolds

2.1-Simplificações

As hipóteses simplificativas feitas neste estudo consagram materiais isotrópicos, escoamentos incompressíveis, propriedades a variarem apenas com algumas variáveis, e algumas aproximações de ordem prática.

Algumas aproximações recorrem a comparações de parâmetros utilizando para tal números adimensionais. Assim, para as equações de Navier foram comparados os termos transientes e de inércia com o termo viscoso.

i) *termo viscoso* -
$$\mu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

ii) *termo de inércia* - compara as acelerações no escoamento. Os termos do tipo $\rho \cdot u \cdot \frac{\partial u}{\partial x}$ serão anulados, uma vez que o número adimensional:

$$\Pi_{iner} = C_1 \cdot \text{Re} \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^2$$

onde C_1 sendo uma constante do escoamento, Re o respectivo número de Reynolds e L o comprimento característico, proporciona um valor adimensional muito inferior à unidade.

iii) *termo transiente* - para este, compara-se o tempo de relaxação do material com o tempo de enchimento. Os termos do tipo $\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$ serão também anulados. O número adimensional utilizado é:

$$\Pi_{trans} = \frac{\rho \cdot h^2 / \mu}{\text{tempo de enchimento}}$$

Este número deverá ser também muito inferior à unidade.

2.2-Equação de Reynolds

As operações necessárias para determinação do campo de pressões, velocidade e tensões, necessitam das seguintes equações:

i) Equação da conservação da massa

Admitindo que o fluido é incompressível:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w) &= 0 \\ \dot{\rho} + \rho \cdot \text{div}(\bar{v}) &= 0 \\ \text{div}(\bar{v}) &= 0\end{aligned}\tag{15}$$

ii) Equação de Navier Stokes

Esta equação, depois de escrita nas três direcções, apresenta-se da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right] + \rho g_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \left[\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \right] + \rho g_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \left[\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right] + \rho g_z\end{aligned}\tag{16}$$

iii) Equação de comportamento reológico

O comportamento do fluido deverá ser descrito nesta equação. Assim para cada tipo de escoamento e fluido tem-se uma equação. Para a presente situação, a equação será:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= 2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial x}; \sigma_{yy} = 2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial y}; \sigma_{zz} = 2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \\ \sigma_{xy} &= \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial x}; \sigma_{xz} = \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial z} + \mu \cdot \frac{\partial w}{\partial x}; \sigma_{yz} = \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial z} + \mu \cdot \frac{\partial w}{\partial y}\end{aligned}\tag{17}$$

A hipótese de um escoamento laminar, é constatada na prática. Como é referido no subcapítulo anterior, desprezam-se os

termos transitórios $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, os termos de inércia $u \cdot \frac{\partial u}{\partial x}$; $u \cdot \frac{\partial w}{\partial x}$; ... e ainda as forças de massa. Desta forma, resultam as seguintes expressões simplificadas das equações (16).

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= 0\end{aligned}\tag{18}$$

A partir destas equações e tendo em consideração as condições fronteira será possível estabelecer o campo de velocidades, pressão e de tensão de corte. Desta maneira, integrando as equações (18) obtem-se:

$$u = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{z^2}{2} - c1 \cdot z - c2\tag{19}$$

Da mesma forma, integrando a segunda equação do conjunto (18), obtem-se:

$$v = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \cdot \frac{z^2}{2} - c3 \cdot z - c4\tag{20}$$

Para determinar as constantes de integração será necessário utilizar as condições fronteira do campo de velocidades. Este tomará valores nulos nas paredes do molde, pelo que, substituindo se obtem:

$$\begin{aligned}u &= \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} (z^2 - z \cdot h) \\ v &= \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} (z^2 - z \cdot h)\end{aligned}\tag{21}$$

Introduzindo este campo de velocidades na equação da conservação da massa e integrando na espessura, obtem-se:

$$\int_0^h \text{div}(\bar{V}) dz = 0 \Leftrightarrow \int_0^h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \cdot dz = 0\tag{22}$$

Permutando a ordem de integração com a ordem de derivação, e utilizando as condições fronteira do campo de velocidades, obtêm-se a equação que rege o comportamento do fluido no interior do domínio.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (23)$$

Quanto às tensões de corte, e utilizando a lei do comportamento reológico, obtêm-se as expressões finais:

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \left(z - \frac{h}{2} \right) \\ \tau_{yz} &= \frac{\partial p}{\partial y} \cdot \left(z - \frac{h}{2} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

A estas expressões correspondem as seguintes formas:

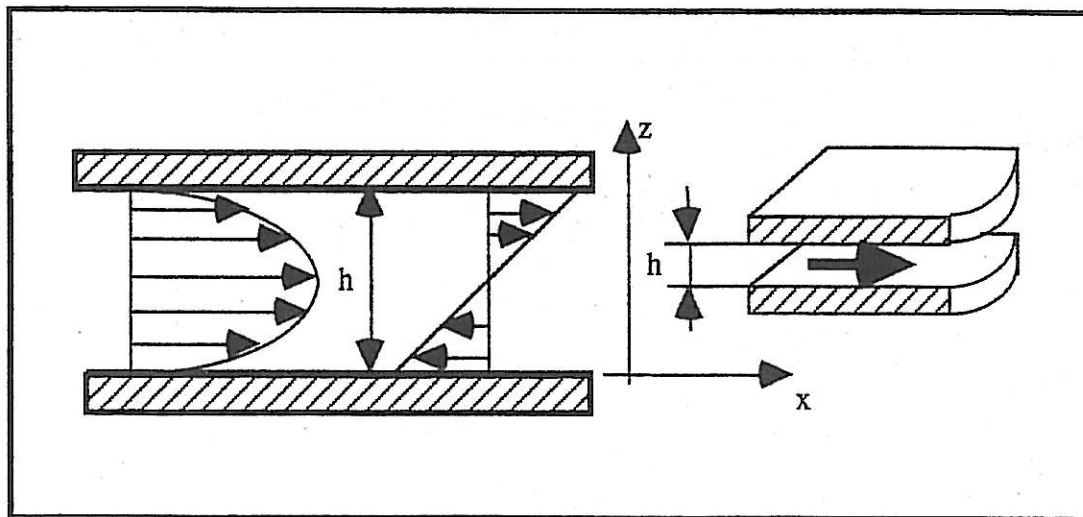


Fig.6-Perfis de velocidade e tensão para o escoamento apresentado.

Capítulo III

Formulação Numérica

3.1-Formulação integral do problema

3.1-Formulação integral do problema

A equação do comportamento deste sistema físico já foi abordada no capítulo anterior. Foram apresentadas duas formulações, a primeira descrita pela equação (1) em termos de pressão na cavidade e a segunda em termos de uma primitiva de p , a variável U definida em (2) e que verifica a equação (8).

Os códigos comerciais utilizam a formulação em termos de pressão, necessitando da resolução do problema no tempo, onde a fronteira (que define a zona ocupada pelo fluido) é variável. Não é possível tratar esse problema em termos de um domínio fixo já que, como se pode observar pela equação (7), a derivada normal de "p" na fronteira móvel é descontínua.

O recurso à variável U evita a descontinuidade referida no parágrafo anterior, formulando o problema num domínio fixo em termos de complementariedade.

$$U \geq 0 \quad , \quad S \cdot \nabla^2 U + Qt \langle P - P_{inj} \rangle^{-1} - h \geq 0$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(S \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \cdot \frac{\partial U}{\partial y} \right) + Qt \langle P - P_{inj} \rangle^{-1} - h \right] \cdot U = 0 \quad (25)$$

Nas fronteiras fixas e móveis temos as seguintes condições fronteira:

-pela fronteira S_i entra um volume igual a Qt

-na fronteira móvel S_t verifica-se $U = \frac{\partial U}{\partial n} = 0$

-na fronteira S anula-se a derivada normal de U

Como se poderá verificar pela última condição, a incógnita U e a sua derivada são contínuas na fronteira móvel.

Para resolver numericamente o problema de complementariedade, recorre-se à técnica dos elementos finitos com penalização. A penalização é utilizada no problema contínuo para transformar a desigualdade numa equação não linear, obrigando a função U a ser não negativa.

O problema de complementariedade é então aproximado pelo seguinte problema penalizado:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \sum_{j=1}^n Q^j t \langle P - P^j_{inj} \rangle^{-1} - h + \frac{1}{\varepsilon} U^- = 0 \quad (26)$$

em que:

$$U^- = \min(U(x,y), 0)$$

e ε um pequeno número (parâmetro de penalização).

Como passo prévio para a discretização por elementos finitos, é necessário utilizar a forma fraca ou variacional da equação anterior, utilizando para tal o método dos resíduos pesados com a respectiva integração por partes. O resultado será:

$$\begin{aligned} & - \int_{Vol} S \left(\frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \cdot dVol + \int_S \psi \cdot S \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \cdot nx + \frac{\partial U}{\partial y} \cdot ny \right) \cdot dS - \\ & - \int_{Vol} h \cdot \psi \cdot dVol + \int_{Vol} \psi \cdot \sum_{j=1}^n Q^j t \langle P - P^j_{inj} \rangle^{-1} \cdot dVol - \frac{1}{\varepsilon} \int_{Vol} U^- \psi \cdot dVol = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

A segunda parcela (integral de contorno) anula-se para os elementos interiores que estejam em contacto perfeito, bastando para tal verificar os percursos de integração. Para os elementos em contacto com o exterior e por aplicação das condições fronteira atrás citadas, esta parcela também se anula.

Depois de se substituírem os integrais de domínio por um somatório de integrais elementares, pode-se obter a nova equação simplificada:

$$\begin{aligned} & \sum_{ele} \left[- \int_{Ve} \left[S \left(\frac{\partial U}{\partial x} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] \cdot dve - \int_{Ve} h \cdot \psi + \psi \cdot Qt \cdot \langle P - Pinj \rangle^{-1} dve \right] + \\ & + \sum_{ele} \int_{Ve} \frac{1}{\varepsilon} \cdot U^- \cdot \psi \cdot dVe = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

Aplicando a discretização por elementos finitos, obtém-se:

-para a função de peso

$$\psi = \delta U = \langle Ni \rangle . \{ \delta U_i \} = \langle \delta U_i \rangle . \{ Ni \} \quad (29)$$

-para as suas derivadas

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \langle \frac{\partial Ni}{\partial x} \rangle . \{ \delta U_i \} = \langle \delta U_i \rangle . \left\{ \frac{\partial Ni}{\partial x} \right\} \quad (30)$$

-e finalmente para a própria função U e suas derivadas

$$U = \langle Ni \rangle . \{ U_i \} \quad \frac{\partial U}{\partial x} = \langle \frac{\partial Ni}{\partial x} \rangle . \{ U_i \} \quad (31)$$

Substituindo agora na equação anterior estas definições, admitindo para S e h valores constantes, e sabendo que W deverá ser nulo para todo δU_i , este sistema será equivalente a:

$$\begin{aligned} \sum_{ele} \left[S \int_{ve} \left[\left\{ \frac{\partial Ni}{\partial x} \right\} \left\{ \frac{\partial Ni}{\partial y} \right\} \right] \cdot \begin{bmatrix} \left\langle \frac{\partial Ni}{\partial x} \right\rangle \\ \left\langle \frac{\partial Ni}{\partial y} \right\rangle \end{bmatrix} dve \right] \cdot \{ U_i \} + \sum_{ele} \int_{ve} \frac{1}{\epsilon} \cdot U \cdot \psi \cdot dve = \\ = \sum_{ele} \left[q \int_{ve} \{ Ni \} \cdot dve - Qt \Big|_{pinj} \right] \end{aligned} \quad (32)$$

Capítulo IV

Transformação de coordenadas e Formulação matricial

4.1-Transformação geométrica

4.2-Alteração do domínio de integração

4.3-Continuação da formulação integral

4.1-Transformação geométrica

Esta função depende da forma e posição do elemento real, uma vez que esta define as coordenadas deste elemento a partir das coordenadas locais ξ e η do ponto de referência correspondente.

O elemento de referência está orientado no espaço e pode ser transformado no elemento real, através da operação τ . Assim,

$$\tau: x(\xi, \eta) = \langle \bar{N}_i(\xi, \eta) \rangle \cdot \{x_i\}$$

Esta transformação deverá ser bijetiva, para que a matriz jacobiana seja invertível. As funções \bar{N} denominam-se de interpolação geométrica.

Note-se que no caso das funções N_i coincidirem com \bar{N}_i , o elemento diz-se isoparamétrico.

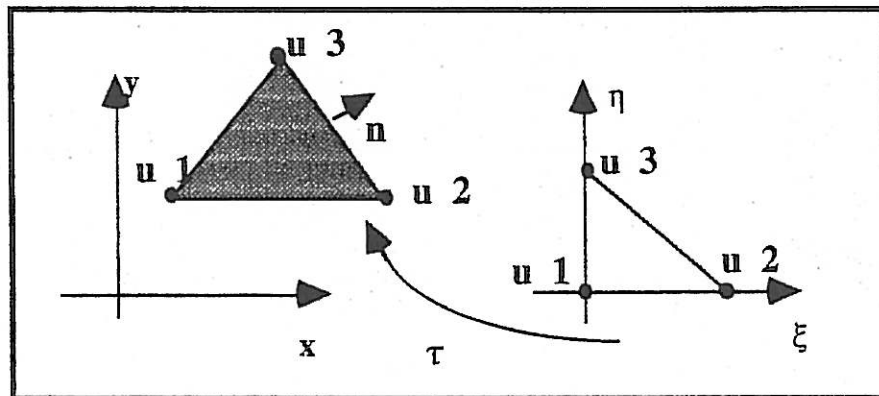


Fig.7-Domínio real e domínio de referência.

As funções de interpolação possuem o valor unitário no nó correspondente e zero nos restantes. Na figura seguinte apresentam-se estas funções, que poderão ser lineares ou quadráticas.

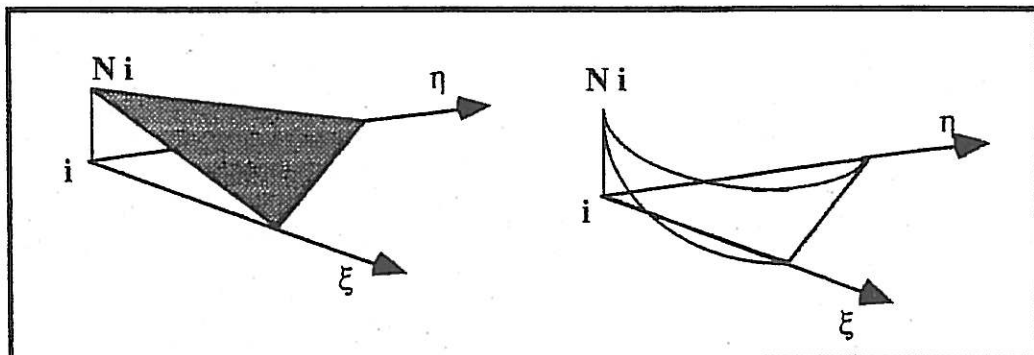


Fig.8-Representação das funções de interpolação.

4.2-Alteração do domínio de integração

A simplicidade de integração no referencial local, exige algumas medidas correctivas. No caso dos integrais de volume de uma função f qualquer, a passagem de um domínio de integração para o outro faz-se da seguinte forma:

$$\int_e f(x,y,z).dve = \int_r f(x(\xi,\eta),y(\xi,\eta)).\det[J].d\xi.d\eta \quad (33)$$

onde

$$[J] = \begin{bmatrix} \sum_r \frac{\partial Ni}{\partial \xi} * xi & \sum_r \frac{\partial Ni}{\partial \xi} * yi \\ \sum_r \frac{\partial Ni}{\partial \eta} * xi & \sum_r \frac{\partial Ni}{\partial \eta} * yi \end{bmatrix}$$

Para composição da matriz jacobiana, recorre-se à aproximação geométrica:

$$\frac{\partial x}{\partial _} = \sum_r \left\langle \frac{\partial Ni}{\partial _} \right\rangle . \{xi\} \quad (34)$$

4.3-Continuação da formulação integral

Na continuação do capítulo III, a equação a resolver pode ser apresentada da seguinte maneira:

$$\sum_{ele} \left[\int_{ve} [B]^t [S] [B].dve \right] = \sum_{ele} \left[h \int_{ve} \{Ni\}.dve - Qt \right]_{P_{inj}} \quad (35)$$

Notar que no caso da substituição das derivadas da função N , deve-se pré multiplicar a matriz $[B]$ pela inversa da matriz Jacobiana da transformação.

$$\sum_{ele} \left[\int_{vref} [B(\xi, \eta)]' [J^{-1}]' [S] [J^{-1}] [B(\xi, \eta)] \cdot \det[J] \cdot dvref \right] \{Ui\} =$$

$$= \sum_{ele} \left[h \int_{vref} \{N(\xi, \eta)\} \cdot \det[J] \cdot dvref - Qt \Big|_{Pinj} \right]$$

a passagem ao sistema global, corresponde ao tratamento do somatório sobre os elementos, que de facto se trata da montagem.

Capítulo V

Campos de velocidades e tensões

5.1-Determinação do campo de velocidades

5.2-Determinação do campo de tensões

5.1-Determinação do campo de velocidades

Depois de calculado o valor da pressão para cada nó, o campo de velocidades é obtido por definição através de:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot (z^2 - zh) \\ v &= \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \cdot (z^2 - zh) \end{aligned} \quad (36)$$

Para representação em 2D, será preferível obter resultados médios em espessura:

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{\int_0^h u \cdot dz}{\int_0^h dz} = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \left(-\frac{h^2}{6} \right) \\ \bar{v} &= \frac{\int_0^h v \cdot dz}{\int_0^h dz} = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \cdot \left(-\frac{h^2}{6} \right) \end{aligned} \quad (37)$$

A pressão dentro de cada elemento, pode ser obtida através de:

$$p(\xi, \eta) = \langle N_i(\xi, \eta) \rangle \cdot \{p_i\} \quad (38)$$

É necessário agora obter expressões discretizadas para a derivada da pressão nas duas direcções de escoamento. Assim, tendo em atenção a transformação de variáveis:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial p}{\partial \xi} \\ \frac{\partial p}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J] \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \end{Bmatrix}$$

Substituindo nas expressões (37), obtêm-se as velocidades médias discretizadas

$$\begin{Bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \end{Bmatrix} = -\frac{h^2}{12\mu} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \end{Bmatrix} = -\frac{h^2}{12\mu} [J^{-1}] \begin{bmatrix} \left\langle \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \right\rangle \\ \left\langle \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right\rangle \end{bmatrix} \cdot \{p_i\} \quad (39)$$

Esta expressão possibilita o cálculo das velocidades em qualquer ponto do interior do domínio elementar. Para se determinarem estes valores nos nós de cada elemento, será necessário calcular a inversa da matriz jacobiana e a matriz [B] em cada nó.

5.2-Determinação do campo de tensões

Da definição das tensões de corte τ_{xz} e τ_{yz} , obtém-se:

$$\tau_{xz} = \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \left(z - \frac{h}{2}\right) \quad \text{e} \quad \tau_{yz} = \frac{\partial p}{\partial y} \cdot \left(z - \frac{h}{2}\right) \quad (40)$$

Estas variam linearmente com a espessura do modelo. Assim para cada ponto discreto do domínio apenas será calculado o seu valor para a face inferior. Este deverá estar dentro de valores admissíveis e não proporcionar tensões residuais elevadas.

Discretizando então as tensões de corte como se procedeu para o cálculo das velocidades:

$$\begin{Bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix}_{z=0} = -\frac{h}{2} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \end{Bmatrix} = -\frac{h}{2} [J^{-1}] \begin{bmatrix} \left\langle \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \right\rangle \\ \left\langle \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right\rangle \end{bmatrix} \cdot \{p_i\} \quad (41)$$

As tensões instaladas deverão ser inferiores às admissíveis para cada material. Existe então a necessidade de se calcular um valor equivalente ao instalado para uma possível comparação[6]. Assim:

$$\tau_{eq} = \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{zy}^2}$$

Capítulo VI

Elementos finitos e Integração numérica

6.1-Elementos utilizados

6.1.1-Elemento triangular linear

6.1.2-Elemento triangular quadrático

6.2-Método de Hammer

6.3-Distorção dos elementos

6.1-Elementos utilizados

Na continuação deste capítulo são apresentados dois elementos isoparamétricos do tipo C_0 , em que garantem a continuidade da função U na fronteira, mas não da sua derivada.

6.1.1-Elemento triangular linear

O elemento linear está representado na figura seguinte. Neste caso, como as funções de interpolação são lineares, a aproximação será do tipo indicado.

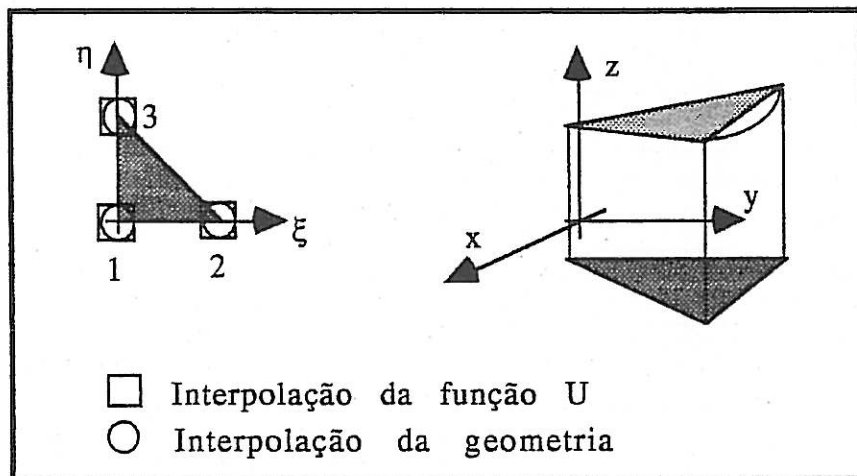


Fig.9-Elemento para aproximação linear.

As funções de interpolação e as suas derivadas, encontram-se resumidas na tabela seguinte.

	N	$\partial N / \partial \xi$	$\partial N / \partial \eta$
1	$1 - \xi - \eta$	-1	-1
2	ξ	1	0
3	η	0	1

Também existe a necessidade de calcular o jacobiano da transformação do domínio de referência para o real. Para este elemento a matriz será:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_1 + x_2 & -y_1 + y_2 \\ -x_1 + x_3 & -y_1 + y_3 \end{bmatrix}$$

A inversa da matriz também será necessária:

$$[J]^{-1} = \frac{1}{\det[J]} \begin{bmatrix} -y_1 + y_3 & -(-y_1 + y_2) \\ -(-x_1 + x_3) & -x_1 + x_2 \end{bmatrix}$$

O determinante do jacobiano deverá ser sempre positivo, contudo o seu valor algébrico deverá ser utilizado para inverter a matriz jacobiana.

6.1.2-Elemento triangular quadrático

Identicamente ao elemento anterior, apresenta-se um elemento isoparamétrico, mas desta feita de grau superior de interpolação. Este elemento é indicado para representar um domínio de fronteira curvilínea.

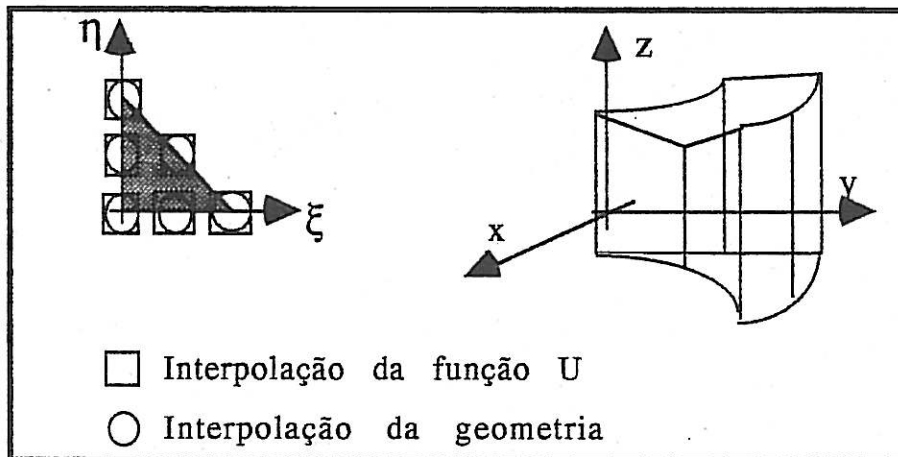


Fig.10-Elemento para aproximação quadrática.

As funções de interpolação e derivadas para este elemento estão apresentadas no quadro seguinte. Note-se que:

$$\lambda = 1 - \xi - \eta$$

	N	$\partial N/\partial \xi$	$\partial N/\partial \eta$
1	$-\lambda(1-2\lambda)$	$1-4\lambda$	$1-4\lambda$
2	$4\xi\lambda$	$4(\lambda-\xi)$	-4ξ
3	$-\xi(1-2\xi)$	$-1+4\xi$	0
4	$4\xi\eta$	4η	4ξ
5	$-\eta(1-2\eta)$	0	$-1+4\eta$
6	$4\eta\lambda$	-4η	$4(\lambda-\eta)$

O jacobiano para esta transformação é mais complicado na expressão, senão veja-se:

$$[J] = \begin{bmatrix} (1-4\lambda)x_1 + 4(\lambda-\xi)x_2 + & (1-4\lambda)y_1 + 4(\lambda-\xi)y_2 + \\ (-1+4\xi)x_3 + 4\eta x_4 + & (-1+4\xi)y_3 + 4\eta y_4 + \\ +(-4\eta)x_6 & +(-4\eta)y_6 \\ (1-4\lambda)x_1 + (-4\xi)x_2 + (4\xi)x_4 & (1-4\lambda)y_1 + (-4\xi)y_2 + (4\xi)y_4 \\ +(-1+4\eta)x_5 + 4(\lambda-\eta)x_6 & +(-1+4\eta)y_5 + 4(\lambda-\eta)y_6 \end{bmatrix}$$

A matriz inversa da jacobiana será obtida da mesma maneira e o determinante deverá apresentar um bom comportamento de discretização.

6.2-Método de Hammer

Trabalhando em coordenadas locais, surge a necessidade do cálculo cuidadoso da transformação linear *jacobiana*.

Para os elementos finitos triangulares em utilização, os polinómios aproximadores contêm monómios com um grau inferior ou igual a 2 em ξ e η .

O método aqui utilizado emprega fórmulas de ordem m que integram exactamente monómios $\xi^i \eta^j$ para os quais a soma dos índices deverá ser inferior ou igual a m .

Para o caso quadrático, mais exigente, tem-se:

$$m \geq 1+1 \Rightarrow m = 2$$

Então:

$$\int_0^1 \int_0^{1-\xi} f(\xi, \eta) d\xi d\eta \cong \sum_{i=1}^r W_i \cdot f(\xi_i, \eta_i) \quad (42)$$

Estes pontos de integração localizam-se nas seguintes coordenadas locais:

m	nº pontos	coordenadas		peso W_i
		ξ	η	
1	1	1/3	1/3	1/2
2	3	1/6	1/6	1/6
		2/3	1/6	
		1/6	2/3	

6.3-Distorção dos elementos

Para facilitar a integração numérica, são introduzidos elementos padrões, com coordenadas locais (ξ, η) , restringidas ao domínio unitário. Estes limites são impostos pela regra de integração.

No elemento isoparamétrico, as funções que interpolam a geometria são as mesmas da função. Assim, a função que transforma o elemento padrão, é definida por:

$$x = \langle N_i(\xi, \eta) \rangle \cdot \{x_i\}$$

$$y = \langle N_i(\xi, \eta) \rangle \cdot \{y_i\}$$

Da mesma forma que existe uma transformação do elemento padrão para o elemento real, deverá existir a função inversa. Assim, a inversa da matriz jacobiana deverá existir e a condição necessária e suficiente para que isso aconteça implica que o determinante seja diferente de zero em todo os pontos (ξ, η) .

Transformações deste tipo garantem a existência de ligações entre elementos e a não sobreposição destes.

Quando se pretende modelar um fenômeno físico, deve-se ter em consideração os erros resultantes de uma deficiente discretização e não deformar demasiadamente os elementos, isto é, não admitir ângulos entre faces demasiadamente grandes ou pequenos, principalmente quando se utilizam elementos finitos triangulares.

A melhor forma geométrica dos elementos para o cálculo apresentado será o triângulo equilátero.

Capítulo VII

Sensibilidades

- 7.1-Medidores de performance do sistema
- 7.2-Sensibilidade de U relativamente à variável tempo
- 7.3-Sensibilidade de U relativamente à alteração da posição do ponto de injeção
- 7.5-Sensibilidade de U relativamente à alteração da espessura de uma parte da cavidade
- 7.6-Exemplificação para o caso unidimensional do enchimento de uma cavidade

7.1-Medidores de performance do sistema

Para desenvolver um processo de análise de sensibilidades, torna-se necessário distinguir as variáveis de estado das de projecto. As primeiras dependem das segundas, enquanto que as variáveis de projecto são aquelas que podem ser alteradas com um objectivo de projecto óptimo.

Uma análise de sensibilidades é crucial no redimensionamento ou numa fase de optimização de um projecto.

Estas análises possibilitam ao projectista obter uma visão do que seriam as variáveis de estado, ou melhor, como se comportaria o sistema caso se alterasse uma variável de projecto (espessura ou localização da gate), sem ter necessidade de resolver o problema novamente.

A utilização desta ferramenta, necessita de um medidor de performance do sistema, normalmente um funcional. Este pode-se apresentar, de uma maneira geral, da seguinte forma:

$$\psi = \int_{Vol} g(U, \nabla U, b) dVol \quad (43)$$

em que U representa a variável de estado, ∇U o seu gradiente e b as variáveis de projecto. A função g deverá ser diferenciável relativamente aos seus argumentos.

Funcionais como os da forma apresentada representam uma grande variedade dos utilizados para medições de performance do sistema. Assim, o valor de U num ponto pode ser apresentado com g dependendo apenas de b enquanto que, por exemplo, a tensão de corte implica que este dependa do gradiente de p .

Para obter as sensibilidades do sistema, pode-se derivar a equação de equilíbrio do modelo discretizado por elementos finitos ou derivar directamente a equação variacional de equilíbrio definida para o modelo contínuo e determinar a sensibilidade deste.

Em ambos os casos, poderão ser utilizados vários métodos de cálculo das sensibilidades, dependendo do problema em estudo. Caso este tenha mais funções objectivo do que variáveis de projecto, seria de todo conveniente utilizar o método da diferenciação directa; caso se verifique o contrário, dever-se-à optar pelo método da variável adjunta.

No caso em estudo iremos determinar a sensibilidade de U relativamente à variável tempo, à alteração da posição do ponto de injeccção e à alteração da espessura de uma parte da cavidade.

Como a função objectivo é a própria variável de estado, o valor de U em cada nó, existem n funções objectivo e apenas uma variável de projecto, sendo portanto preferível a utilização do método de diferenciação directa relativamente ao da variável adjunta, pois neste caso seria necessário resolver tantos sistemas quantas as funções objectivo.

7.2-Sensibilidade de U relativamente à variável tempo

Pretende-se calcular derivadas da função U, solução do problema de complementariedade (25) em relação a "t", o que permite determinar a pressão na cavidade num determinado instante. A não linearidade do problema de complementariedade implicará, geralmente, que U não seja diferenciável, isto é, as derivadas de U à esquerda e à direita não coincidam. Tal comportamento poderá ser observado na figura 13 que representa o enchimento de um canal unidimensional, onde a pressão e a sua primitiva evoluem com o tempo. Quando o fluido atinge uma das paredes laterais verifica-se uma descontinuidade na função pressão. Não tem sentido pois falar de derivadas, como foi estabelecido por Bendsøe, Olhoff e Sokolowski [9], mas apenas de derivadas direccionais.

Representam-se as derivadas de U por U' e ficará claro pelo contexto de que derivadas se trata. Uma vez que as derivadas podem ser descontínuas, representar-se-à a derivada à esquerda e à direita por U'_+ e U'_- , respectivamente.

Para determinar a expressão que permite calcular a sensibilidade de U, deriva-se a expressão utilizada para o cálculo de U, apresentada anteriormente sob a forma de um problema de complementariedade.

$$U \geq 0 \quad , \quad S \cdot \nabla^2 U + Q t < P - P_{inj} >^{-1} - h \geq 0$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(S \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \cdot \frac{\partial U}{\partial y} \right) + Q t < P - P_{inj} >^{-1} - h \right] \cdot U = 0$$

Estas expressões serão derivadas num determinado valor de U.

A não linearidade do cálculo das sensibilidades vai permanecer apenas nos pontos em que simultaneamente:

$$U = 0 \quad \text{e} \quad S \cdot \nabla^2 U + Q t \langle P - P_{inj} \rangle^{-1} - h = 0$$

Em todos os outros pontos, em que os constrangimentos estão fortemente activos ou inactivos, os constrangimentos em U' são de igualdade. O problema de complementariedade para o cálculo de U' pode então enunciar-se

$$p \geq 0 \quad \text{e} \quad S \nabla^2 p + Q \langle P - P_{inj} \rangle^{-1} \geq 0$$

nos pontos onde:

$$U = 0 \quad \text{e} \quad S \cdot \nabla^2 U + Q t \langle P - P_{inj} \rangle^{-1} - h = 0 \quad (44)$$

No entanto e para o caso da sensibilidade de U relativamente a "t" (cálculo da pressão), o facto de

$$U(t - \xi) \leq U(t), \quad \xi > 0$$

permite calcular a pressão resolvendo um problema linear, se admitirmos que a pressão é a derivada à esquerda de U .

7.3-Sensibilidade de U relativamente à alteração da posição do ponto de injeção (gate)

Os comentários apresentados no subcapítulo anterior aplicam-se neste, com a derivada descrita pelo seguinte problema:

$$U' \geq 0 \quad \text{e} \quad S \nabla^2 U' + Q t \langle P - P_{inj} \rangle^{-2} \geq 0$$

nos pontos onde:

$$U = 0 \quad \text{e} \quad S \cdot \nabla^2 U + Q t \langle P - P_{inj} \rangle^{-1} - h = 0 \quad (45)$$

O funcional a considerar neste subcapítulo deverá ser o produto da variável "U" pela função de Dirac. A variação deste funcional será originada pela parte implícita, já que a dependência explícita relativamente à localização do ataque é nula.

$$\psi = \int_{Vol} U(x, y) \cdot \langle P - P_? \rangle^{-1} \cdot dVol \quad (46)$$

As condições fronteira para a resolução deste problema são as seguintes:

-Nos pontos onde a variável U for nula, existem alguns ou eventualmente todos, onde os constrangimentos são fortemente activos. Nesses casos $U'=0$. A simulação numérica implica a resolução iterativa do sistema (45), com um momento aplicado Q_t , isto é, duas forças de sinal oposto aplicadas numa determinada direcção como se exemplifica na figura seguinte.

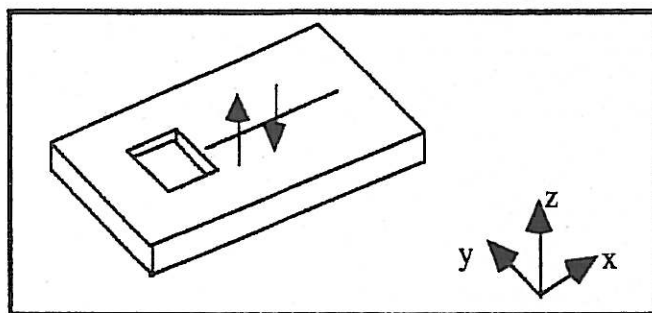


Fig.11-Carregamento do sistema (45).

Surge assim a necessidade da aplicação de duas forças de sinal oposto, suficientemente próximas, uma vez que os elementos finitos não possuem este segundo grau de liberdade.

Assim, na primeira iteração, dos pontos com pressão nula fixam-se aqueles em que existe a tendência para a variável U ser negativa. O processo iterativo deverá terminar quando a solução estabilizar. Note-se que neste processo não são precisas tantas iterações como na determinação da variável U , pois apenas se processa um ciclo em cada nó com história de pressão nula.

Apresenta-se também, mais à frente, o resultado unidimensional. É de salientar que a sensibilidade de interesse para o projecto é a da pressão em relação à posição do ponto de injeção. No entanto isso implicaria calcular derivadas de funções descontínuas, assunto que não se abordará nesta dissertação.

7.4-Sensibilidade de U relativamente à alteração da espessura de uma parte da cavidade

O medidor de performance a considerar deverá ser idêntico ao anterior. Neste caso, não existe variação explícita do funcional com a espessura, mas existe variação implícita em duas parcelas

O problema formula-se:

$$U' \geq 0 \quad \text{e} \quad S' \nabla^2 U + S \nabla^2 U' - 1 \geq 0$$

nos pontos onde:

$$U = 0 \quad \text{e} \quad S \cdot \nabla^2 U + Q t < P - P_{inj} >^{-1} - h = 0 \quad (47)$$

As condições fronteira a que devem obedecer este problema são as mesmas do caso anterior.

Esta parte do código ainda não foi intensivamente testada, pelo que se sugere aqui como um trabalho futuro.

7.5-Exemplificação para o caso unidimensional do enchimento de uma cavidade

Para o caso da injeção 1D simulada com elementos triangulares 2D, será de referir o seguinte. A derivada ou sensibilidade de U relativamente à alteração da posição do ataque é proporcional à sensibilidade de P.

Na figura seguinte representam-se os campos de U e P em cada instante. Note-se que a função P não é continua relativamente à alteração de posição do ataque. Para facilitar a representação, considere-se uma secção longitudinal da placa 1D.

Numa primeira situação, o ataque é feito a meio.

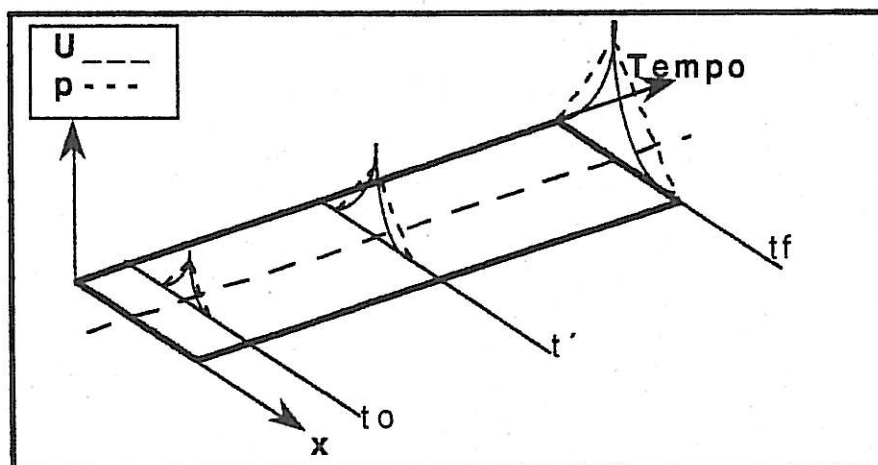


Fig.12-Evolução das variáveis U e p com o tempo.

Ao alterar a posição do ataque ligeiramente para a esquerda, obtêm-se os seguintes resultados

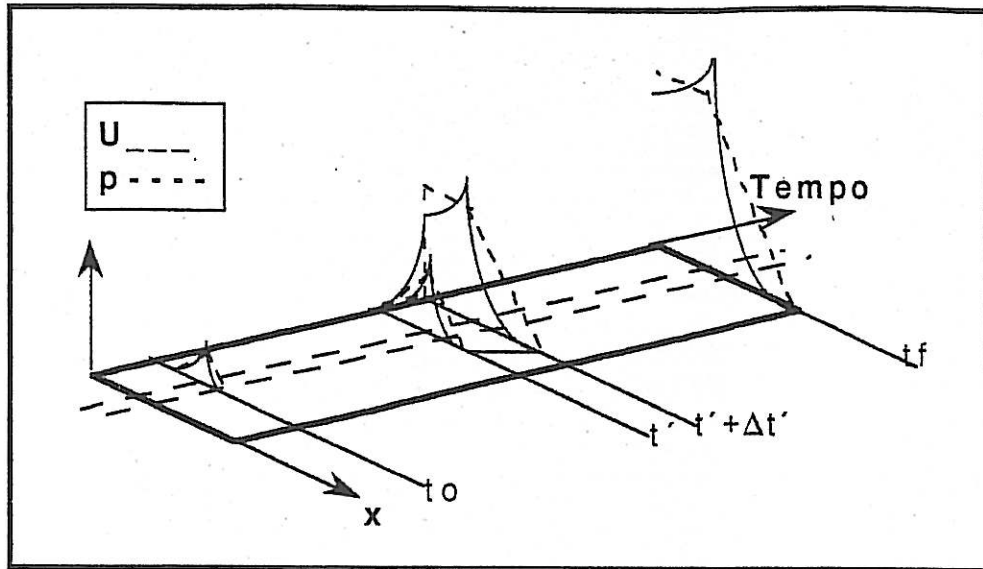


Fig.13-Evolução de U e p, com ataque deslocado para a esquerda.

Repare-se no salto da pressão quando o fluido chega à parede esquerda. A variável U é contínua e possibilita a utilização da expansão em fórmula de Taylor.

A pressão é obtida através da derivada de U relativamente ao tempo. Só tem sentido falar na derivada calculada para trás, uma vez que para t superior a t_f (enchimento completo da cavidade) deixa de ser válida a hipótese de fluido incompressível. Assim:

$$p = \frac{\partial U}{\partial t}$$

As condições fronteira para a segunda situação são as mesmas determinadas anteriormente para calcular a derivada de U. Assim, a segunda solução necessita dos mesmos nós "presos" e da resolução de apenas um sistema do tipo:

$$[K] \cdot \{p\} = \{\dot{Q}\} \quad (48)$$

Na figura seguinte apresenta-se o resultado da sensibilidade de U em cada instante, desde o início até ao final do enchimento.

Capítulo VIII

Interfaces de pré e pós processamento

8.1-Interfaces para Patran®

8.1-Interfaces para Patran

Para facilitar a fase da representação geométrica e posterior malha de elementos finitos, utiliza-se um pré processador. Este necessita da descrição do domínio, utilizando "patch's", carregamento distribuído (pressão), e forças concentradas representativas dos pontos de injeção.

Na parte de discretização finita, devem ser utilizados elementos triangulares, com três propriedades- valores de S / espessura / viscosidade.

Após a utilização do programa de análise de escoamento, o utilizador recorre novamente ao PATRAN, mas desta vez para representar valores nodais (U e p), elementares ($\bar{u}, \bar{v}, \tau_{xx}, \tau_{yy}$) e ainda outro ficheiro nodal com as sensibilidades de U relativamente às variáveis de projecto.

No manual do programa, o utilizador encontra tudo o que é necessário para a correcta utilização deste "software", enquanto que no manual do Patran é possível encontrar os formatos dos ficheiros de saída.

CAPÍTULO IX

Exemplos

9.1-Exemplo 1-Placa

9.2-Exemplo 2-Clip

9.3-Exemplo 3-Placa com depressão

9.4-Exemplo 4-Placa rectangular com dois pontos de injeção

9.5-Exemplo 5-Aproximação de um caso unidimensional. Comparação analítica

9.1-Exemplo1-Placa

Na figura seguinte está representada uma placa com geometria complexa e diferenças em espessura. Apresentam-se apenas os resultados para o instante final do enchimento.

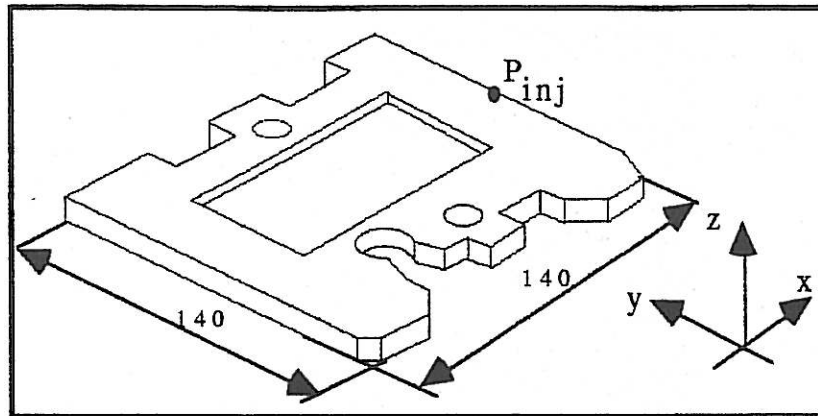


Fig.15-Modelo para placa com espessura exterior de 2.5 [mm] e interior de 1.5 [mm]-[20].

O tempo foi considerado como parâmetro, procedendo-se à introdução de um volume de fluido para o interior da cavidade correspondente ao instante em causa. Desta forma evita-se a iteração no tempo, isto é, a necessidade de resultados intermédios anteriores ao pretendido.

O ponto de injeção está localizado pelos caracteres P_{inj} , e o tempo de enchimento total será de 1,5 [s]. A viscosidade do material escolhido foi de 100 [Pa.s].

Nas páginas seguintes apresentam-se os resultados da variável U , da pressão, campos de velocidades e tensões e ainda a sensibilidade de U relativamente ao deslocamento do ponto de injeção na direcção yy e sentido positivo do referido eixo.

Na figura 16 está representado o campo da variável U sendo de realçar que os últimos pontos a encher são os nós situados na parte inferior esquerda paralelamente ao eixo xx . O campo de pressões não revela grandes atrasos no andamento da fronteira ao passar pela depressão central (ver figura 17). A última imagem corresponde à sensibilidade de U aquando da alteração da posição do ponto de injeção. É de notar que seria de prever uma diminuição da pressão no sentido negativo dos yy na zona inferior direita.

O valor da tensão máxima obtida foi de $0,833 \cdot 10^5$ [Pa], sendo este um valor relativamente baixo e não susceptível de provocar a degradação do material.

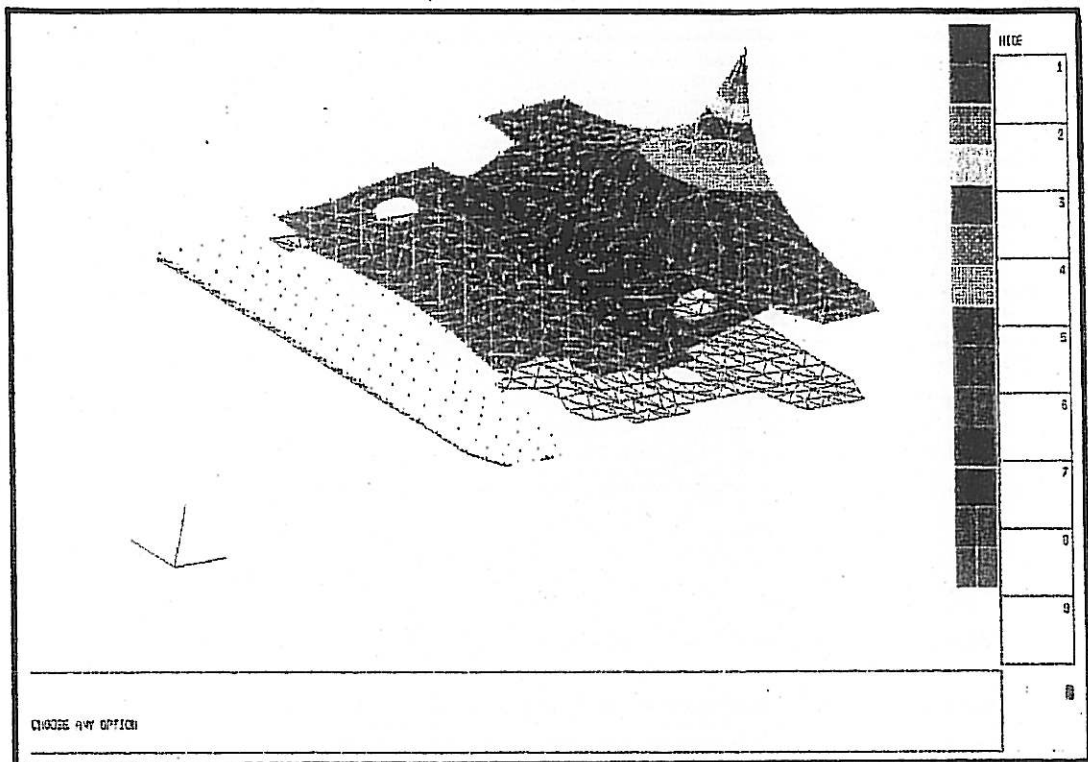


Fig.16-Variável U- valores nodais.

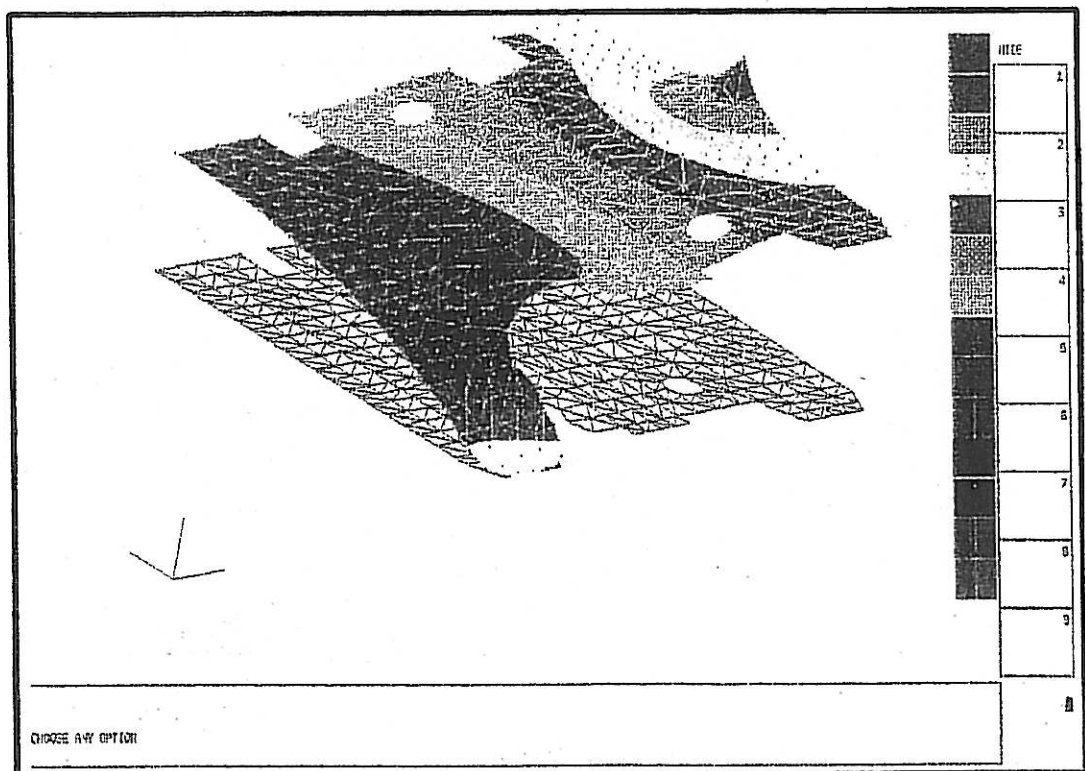


Fig. 17- Campo de pressão- valores nodais.

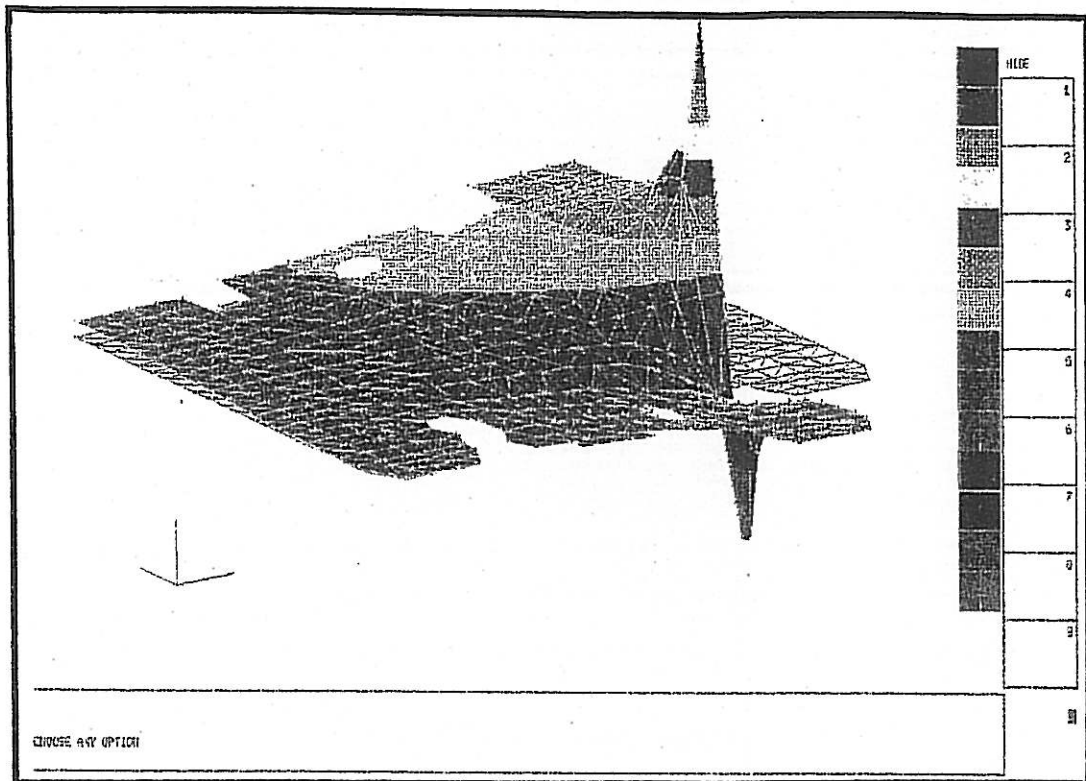


Fig.18- Sensibilidade de U relativa ao movimento do ponto de injeção.

9.2-Exemplo 2- Clip

O próximo exemplo serve para se verificar o efeito da espessura das partes que constituem o modelo.

Numa primeira fase procedeu-se ao enchimento de um molde todo com igual espessura e com o mesmo material do exemplo anterior (ver figura 19).

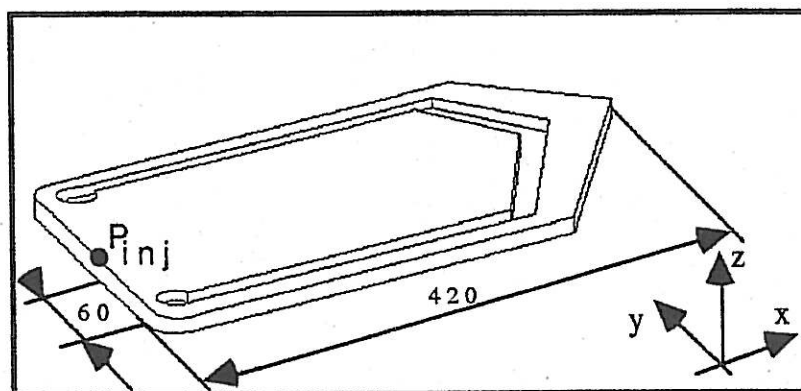


Fig.19-Modelo do clip com interior e abas de igual espessura ($h=5$ [mm]).

Os resultados deste primeiro projecto apresentam elevadas tensões de corte no início das abas laterais, tensões estas que se

traduzirão em tensões residuais capazes de provocarem a rotura do material quando ligeiramente solicitadas.

Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados correspondentes ao instante final($t=1,5[s]$), representativos do campo da variável U e da pressão.

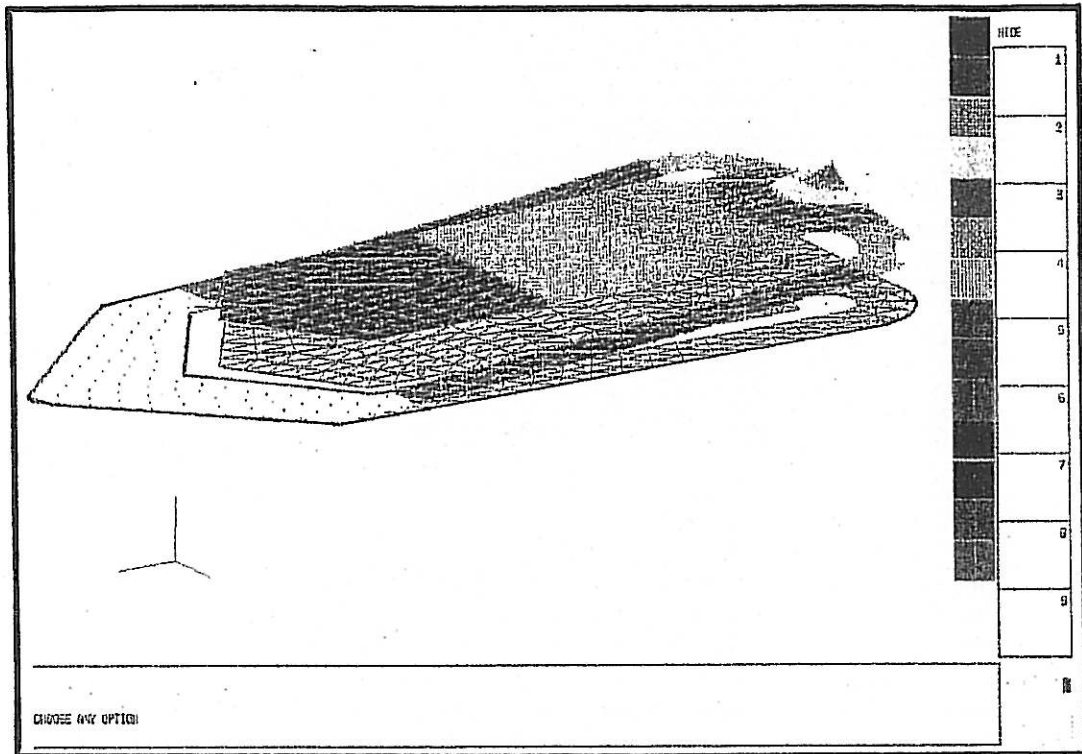


Fig.20-Variável U- valores nodais.

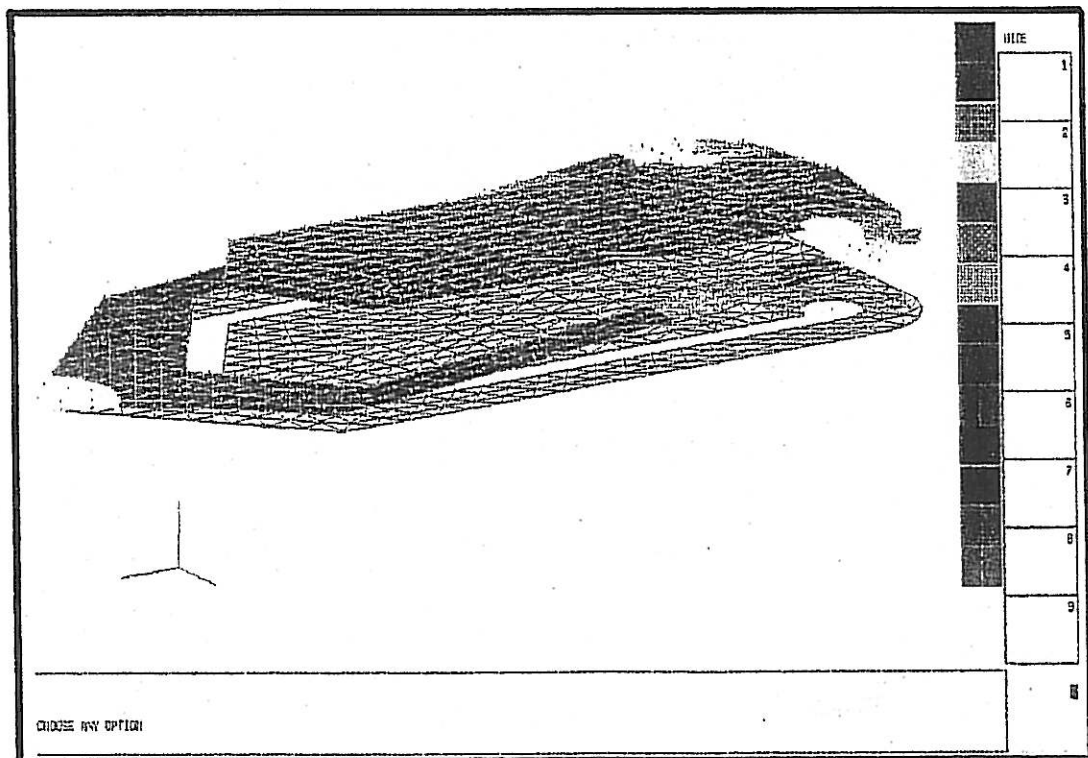


Fig.21-Campo de pressão- valores nodais.

Numa segunda fase, e induzido pelos resultados das sensibilidades, o projectista será levado a diminuir a espessura da parte interior relativamente à espessura das abas, fazendo coincidir a chegada do fluido na parte interior do clip com a chegada do mesmo pelas abas laterais à sua extremidade. Verifica-se neste último caso um grande gradiente próximo do ponto de injeção, deixando este de se verificar na zona curva das abas.

Com esta modificação de projecto, evitou-se que o clip partisse pelas abas, optimizando a qualidade deste.

O valor das tensões máximas na primeira fase foi de $0,172 \cdot 10^6$ [Pa]. O valor máximo verificado nas abas foi de $0,15 \cdot 10^6$ [Pa].

Nas figuras 22 e 23 apresenta-se o enchimento incompleto para o instante $t=0,5$ [s] onde é visível o adiantamento do fluido pela parte interior relativamente às abas, tanto no campo de pressões como da variável U.

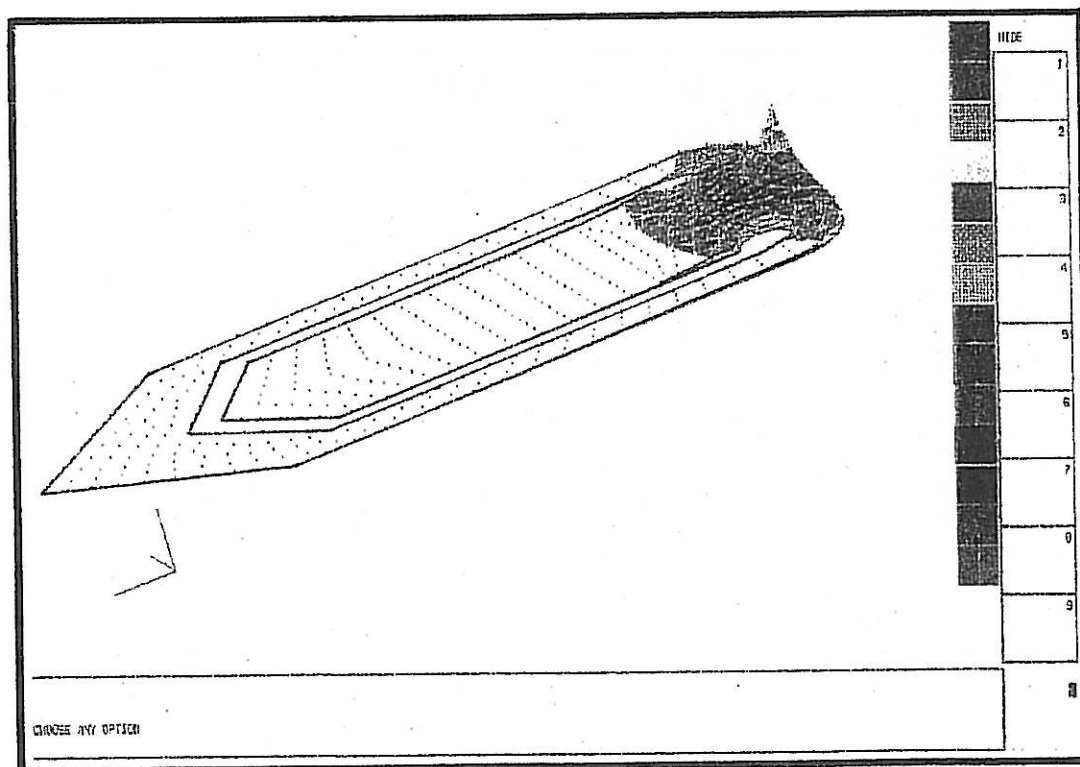


Fig.22- Variável U- valores nodais

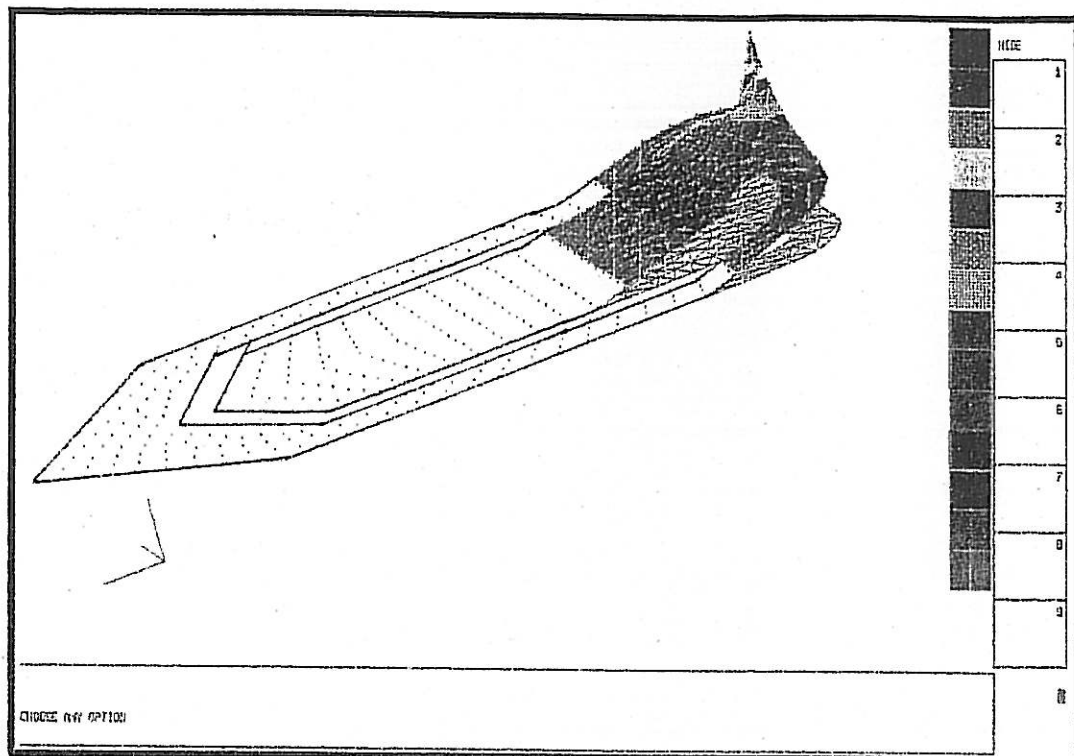


Fig.23- Campo de pressão- valores nodais

9.3-Exemplo 3- Placa com depressão

Com este exemplo pretende-se demonstrar a influência da localização do ponto de injeção no enchimento da cavidade.

Numa primeira fase procedeu-se ao enchimento da placa representada na figura 24, através do ponto centrado geométricamente nas diagonais da placa.

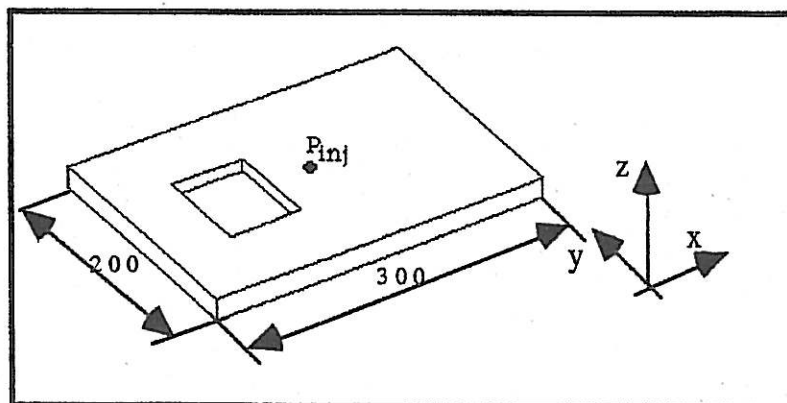


Fig.24-Placa com depressão de 3 [mm] com ponto de injeção centrado e restante espessura de 6 [mm].

O tempo de injeção escolhido foi de 1,5 [s]. Os resultados apresentados nas figuras que se seguem permitem obter as seguintes conclusões.

Na primeira fase obtém-se um grande gradiente na zona de depressão em espessura, o que provocará grandes tensões e eventualmente vazios (falta de material).

Numa segunda iteração de projecto, o utilizador será conduzido à movimentação da "gate" para a esquerda, resultado confirmado pelas sensibilidades calculadas. O problema na referida zona estava então resolvido. Será de notar o valor da sensibilidade mais elevado (positivo) na referida zona, verificando-se uma diminuição na parte direita da placa.

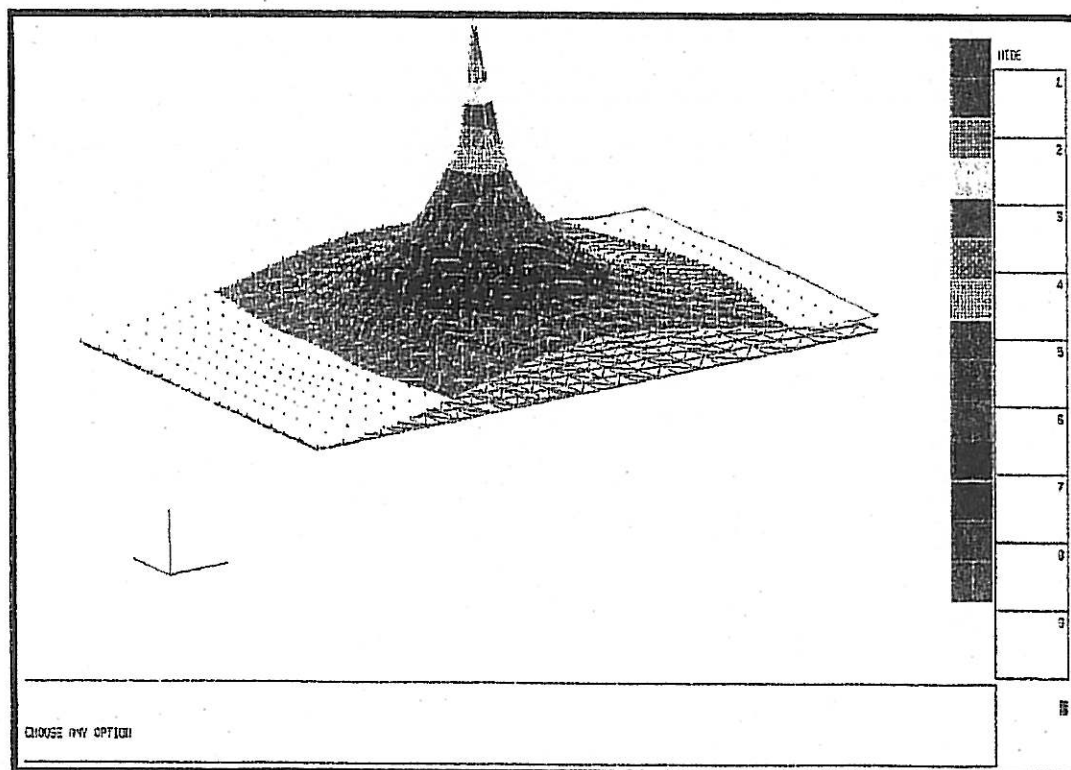


Fig.25- Variável U- valores nodais.

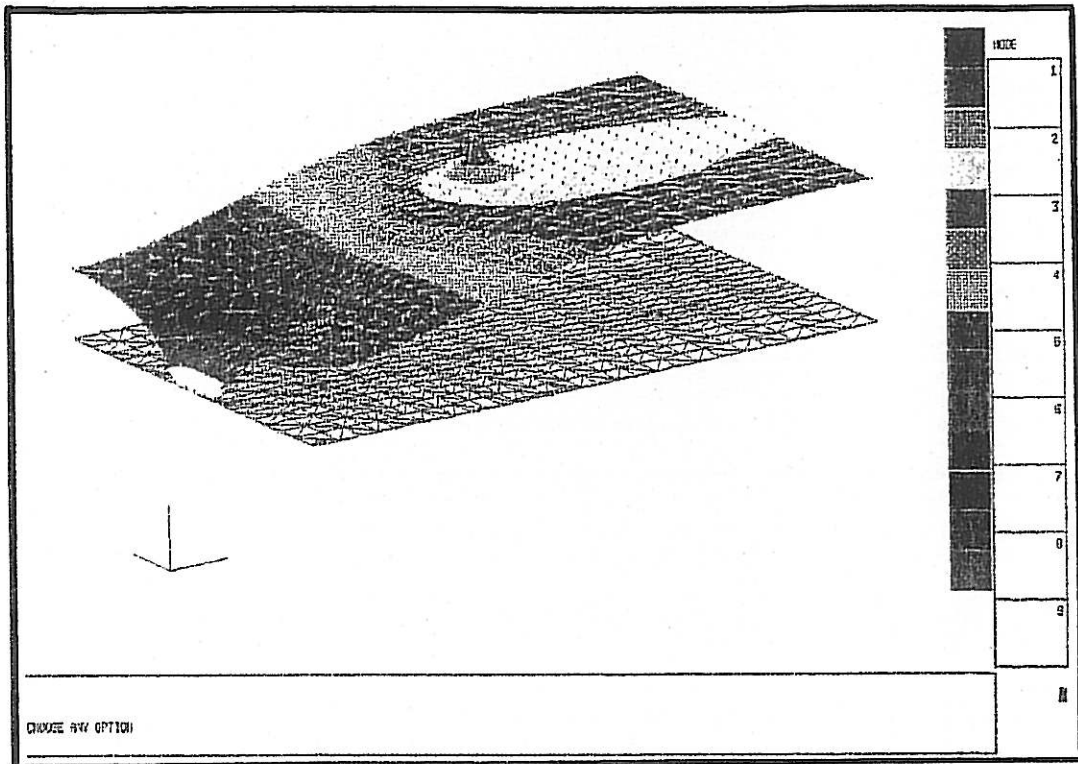


Fig.26-Campo de pressão- valores nodais.

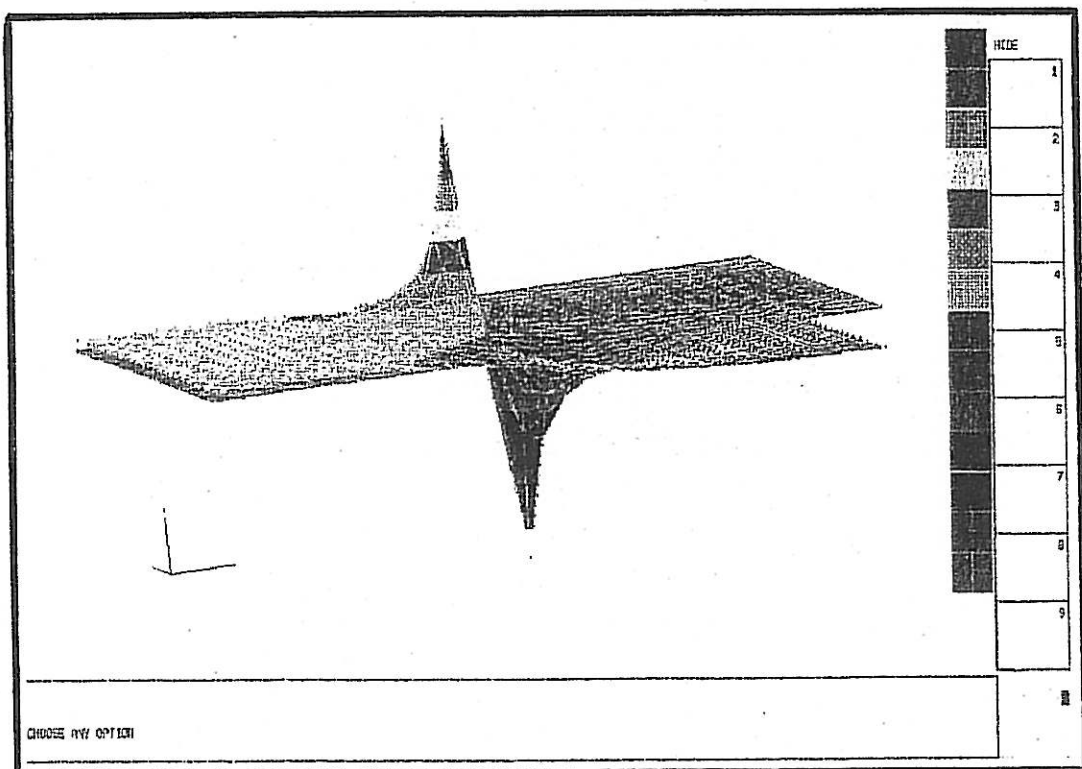


Fig.27- Sensibilidade de U relativamente à movimentação do ponto de injeção para a esquerda.

9.4- Exemplo 4- Placa rectangular com dois pontos de injeção

Trata-se de uma placa rectangular de $900 \times 300 \times 10$ com dois pontos de injeção diagonalmente opostos. O tempo de injeção escolhido foi de $1,5$ [s] e o material utilizado foi o mesmo dos exemplos anteriores (ver figura 28).

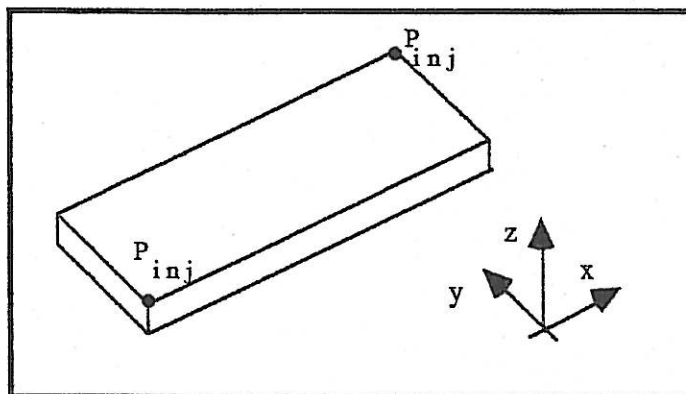


Fig.28- Placa com dois pontos de injeção.

Com este exemplo pretende-se apenas apresentar o andamento da fronteira no seu instante final. Nas figuras 29 e 30, apresentam-se os resultados do campo da pressão e da variável U .

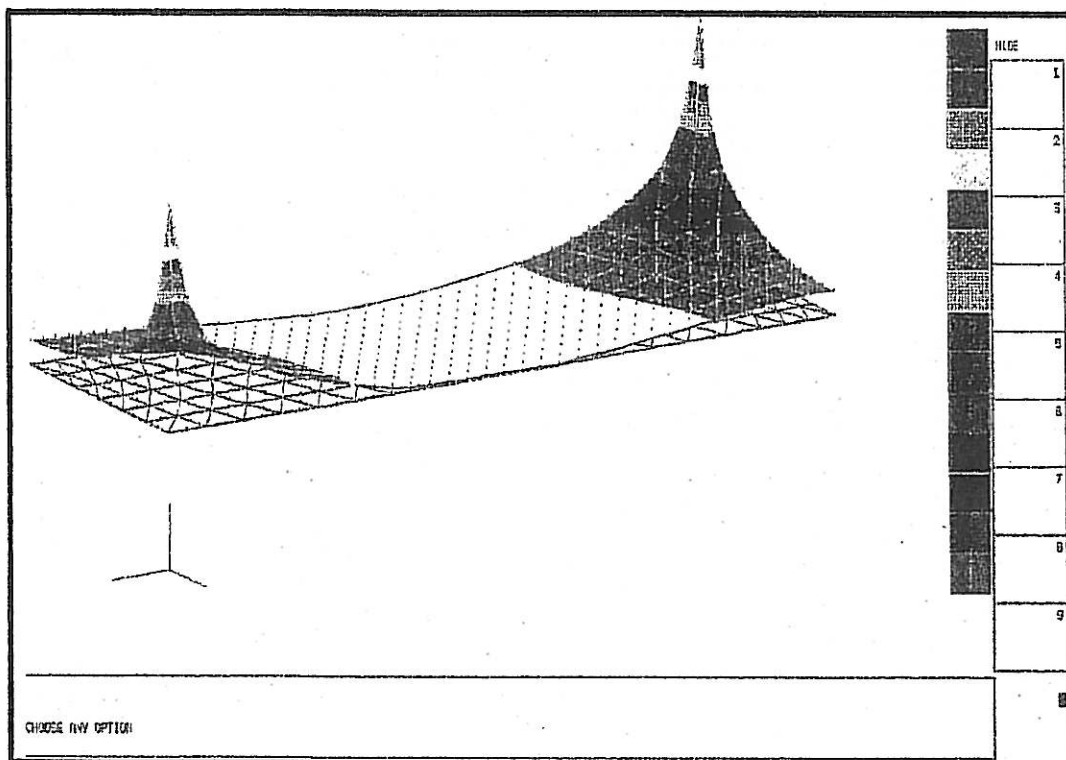


Fig.29-Variável U - valores nodais.

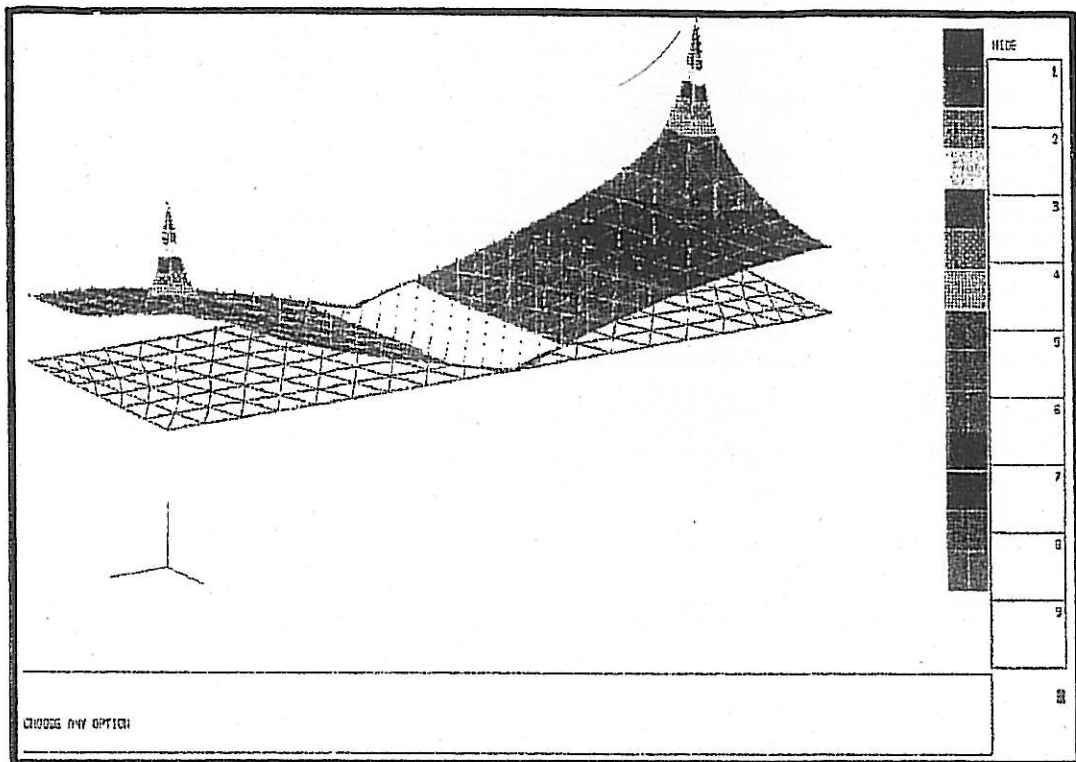


Fig.30- Campo de pressão- valores nodais.

9.5-Exemplo 5- Aproximação de um caso unidimensional. Comparação analítica

Este exemplo é uma aproximação de uma placa rectangular em que uma das dimensões é muito mais pequena do que a outra. Trata-se de uma placa de 1000×50 [mm] por 5[mm] de espessura e com um tempo de injeção igual a 1,5[s] (ver figura 31).

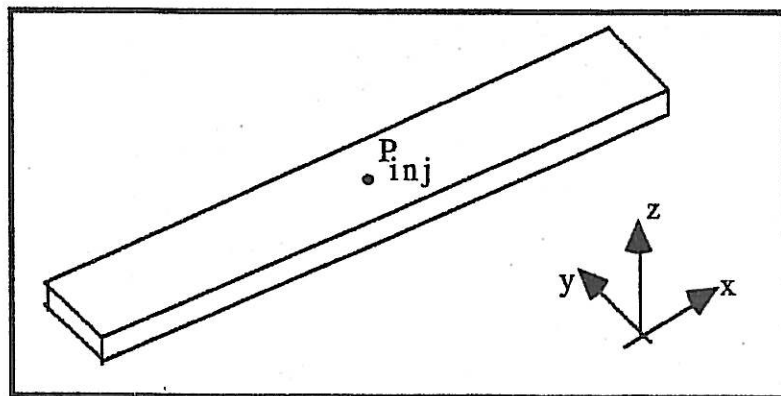


Fig.31-Simulação de uma placa unidimensional.

Utilizando o manipulador simbólico "Mathematica", para um material com viscosidade de 100 [MPa] e para o exemplo em causa, obtêm-se as seguintes distribuições para U e p.

Após integração da equação (8) obtem-se:

$$U = \begin{cases} 6 * \mu * x^2 / h^2 & \text{se } x < 0,5 \\ 6 * \mu * x^2 / h^2 - 12 * \mu * (x - 0.5) / h^2 & \text{se } x \geq 0,5 \end{cases}$$

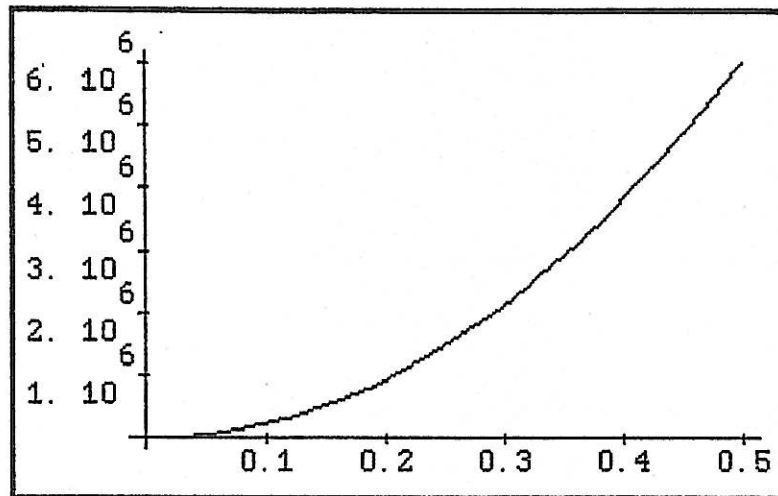


Fig.32-Representação de uma metade simétrica da distribuição da variável U.

Na figura seguinte apresentam-se os resultados numéricos, tendo-se obtido na linha média um valor médio de $6,0 * 10^6$.

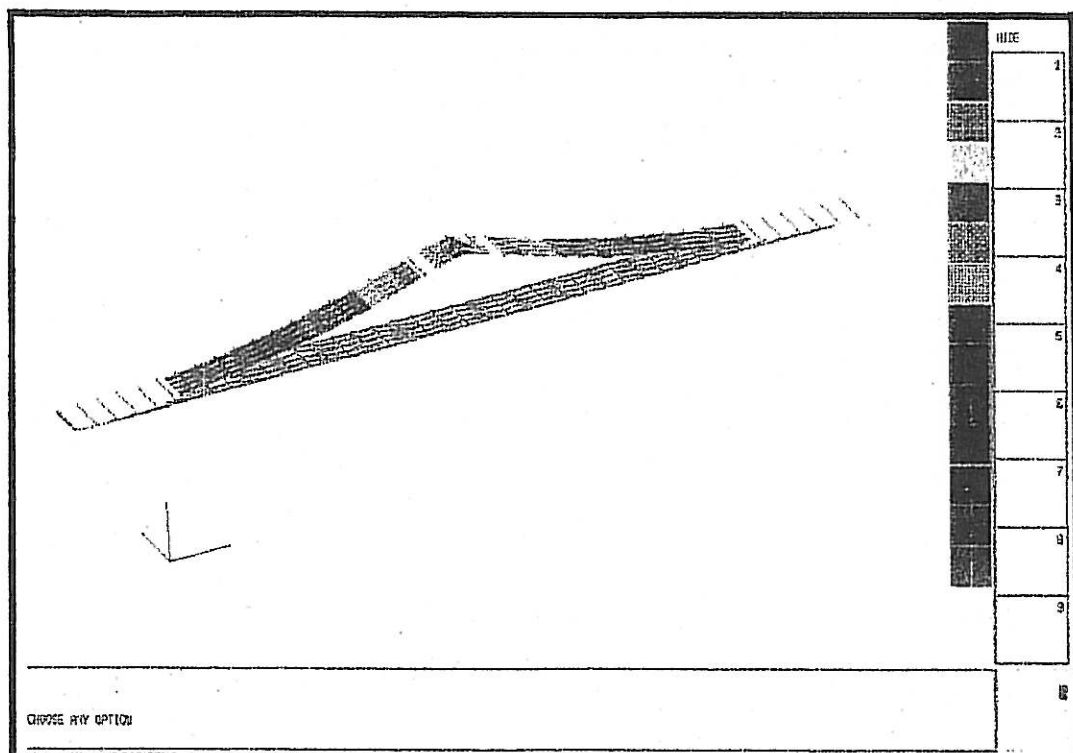


Fig.33-Variável U- valores nodais.

Da mesma forma, após integração da equação (1), obtem-se o campo de pressão analítico correspondente à figura 34.

$$p = \begin{cases} 6 * \mu * x / h^2 & \text{se } x < 0.5 \\ 6 * \mu * x / h^2 - 12 * \mu / h^2 (x - 0.5) & \text{se } x \geq 0.5 \end{cases}$$

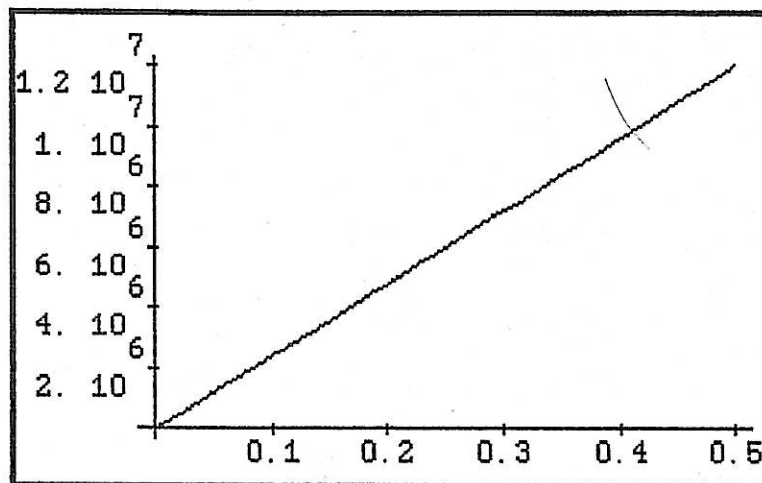


Fig.34-Metade simétrica do campo de pressão

Na figura 35 está representada a solução numérica, tendo se obtido um valor médio de $1,2 * 10^7$.

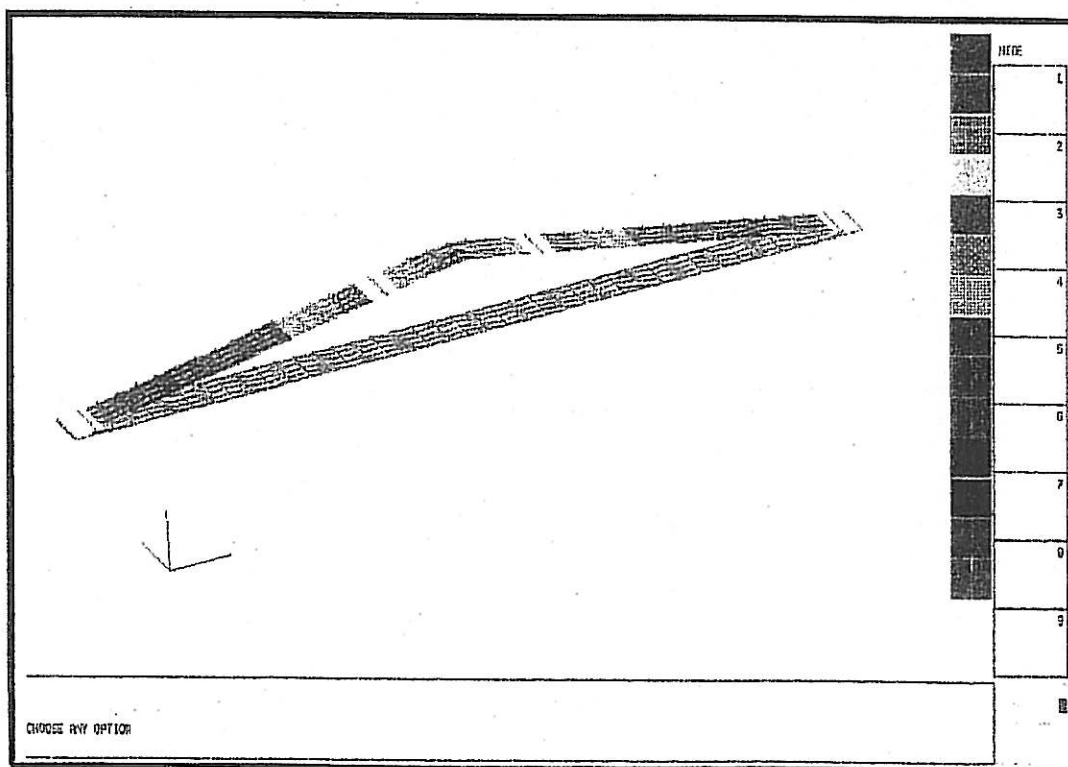


Fig.35-Campo de pressão- valores nodais

Caso o projectista deseje saber como se alterava a variável U com o deslocamento infinitesimal do ponto de injeção para a direita, apenas seria necessário executar o cálculo das sensibilidades, sendo este processo muito menos moroso quando comparado com uma nova resolução do problema.

Em termos analíticos, a sensibilidade de U relativamente à posição do ponto de injeção é dada por:

$$\frac{\partial U}{\partial x_{inj}} = \frac{12 * \mu}{h^2} \langle x - x_{inj} \rangle^0$$

Esta função terá um valor nulo antes de $x=0,5$, e um valor constante e igual a $4,8*10^7$ para x compreendido entre 0,5 e 1 [m]. Apresentam-se a seguir os correspondentes valores numéricos.

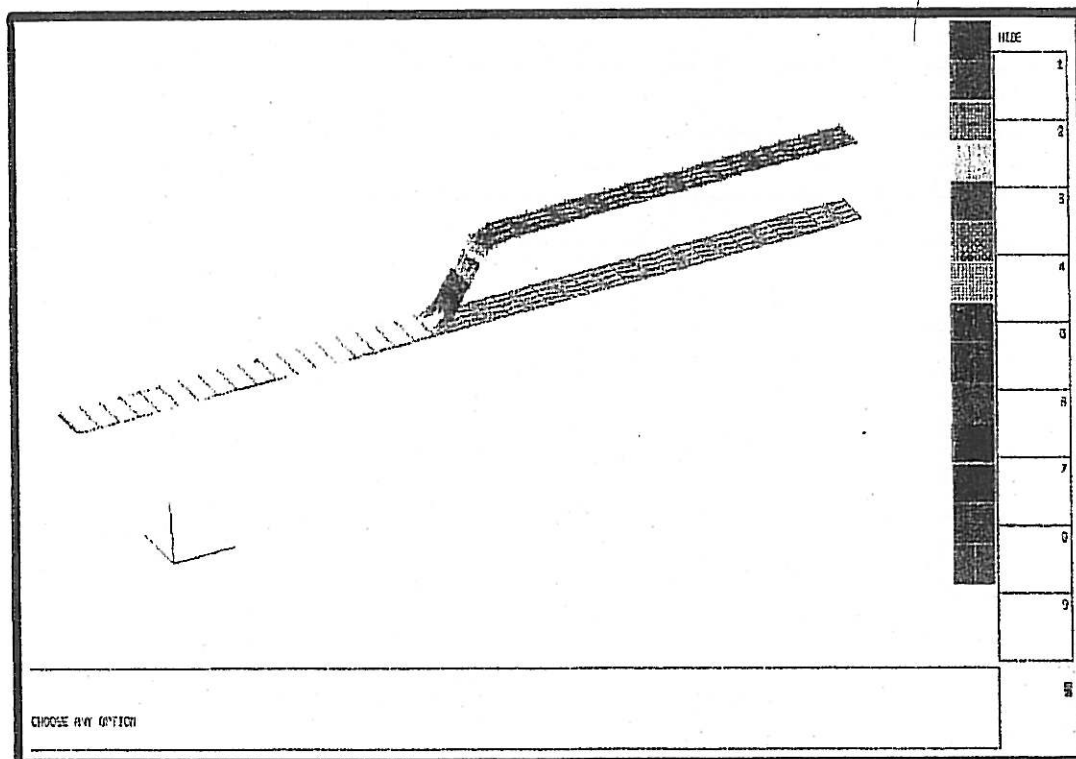


Fig.36-Sensibilidades de U relativas à alteração do ponto de injeção para a direita.

A verificação por diferenças finitas ajudou a comprovar estes resultados. Nas figuras seguintes estão apresentados os resultados obtidos aquando do deslocamento de 0,025 [m] do referido ponto. A parte esquerda do resultado U mantém-se, enquanto que a parte direita é aumentada de um valor constante de $4,8*10^7$ *

$0,025=1,2*10^6$. Este valor foi comparado com diferenças finitas tendo-se obtido um coeficiente de exactidão muito próximo dos 100%.

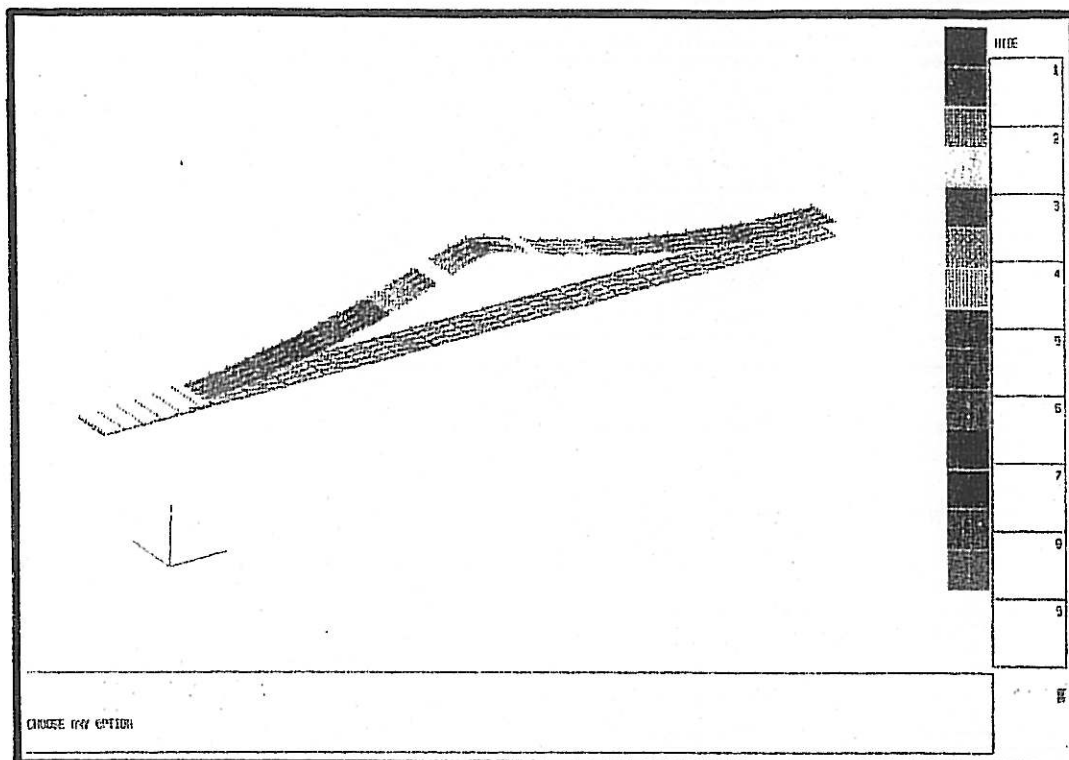


Fig.37- Variável U com injeção descentrada de 0,025[m].

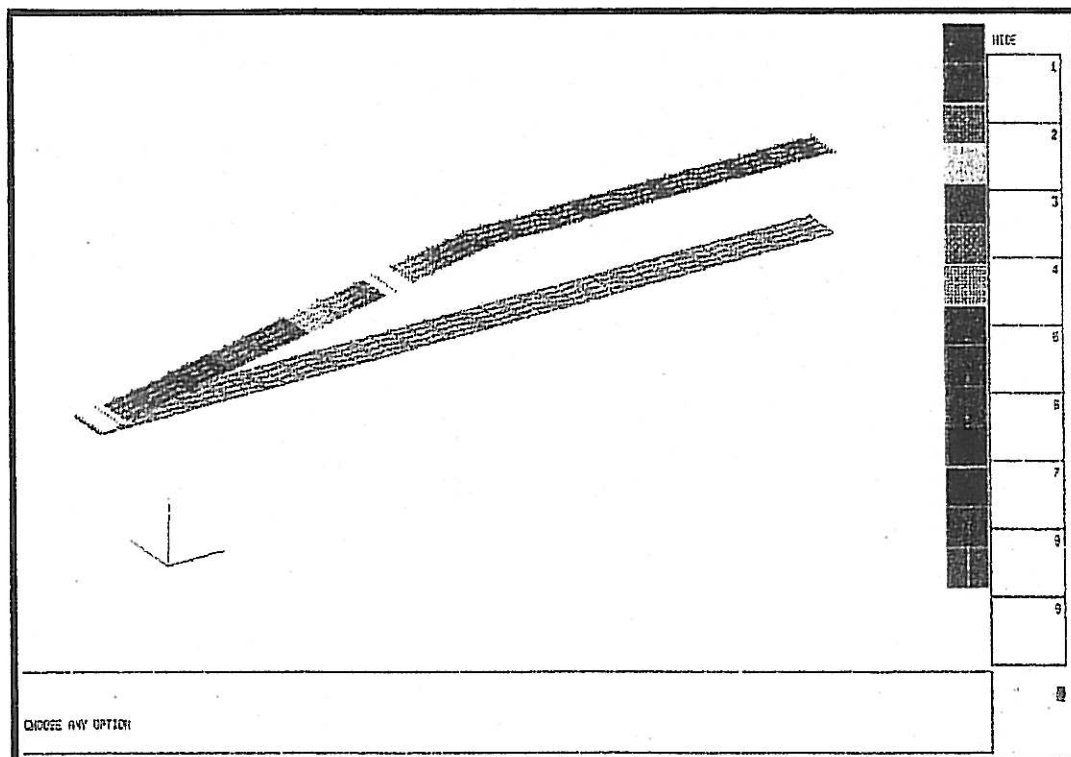


Fig.38- Campo de pressão para uma injeção descentrada de 0,025[m].

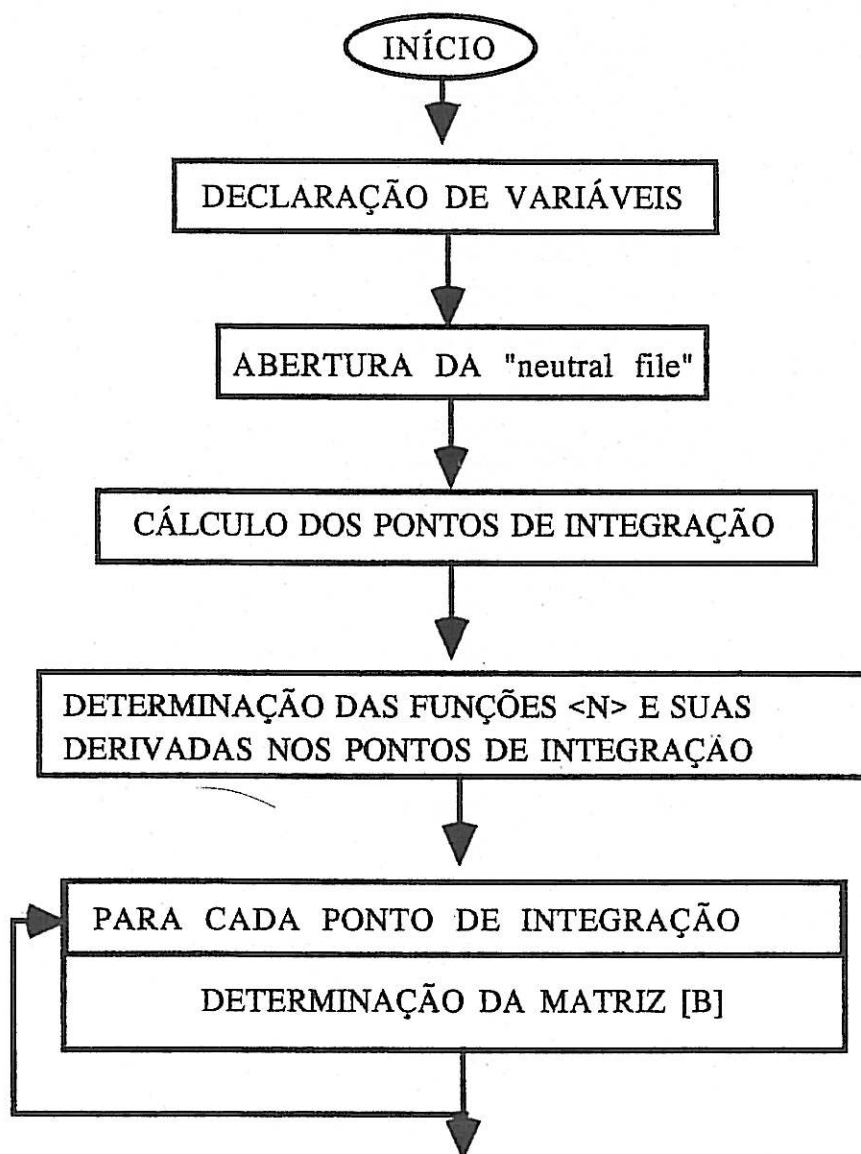
Capítulo X

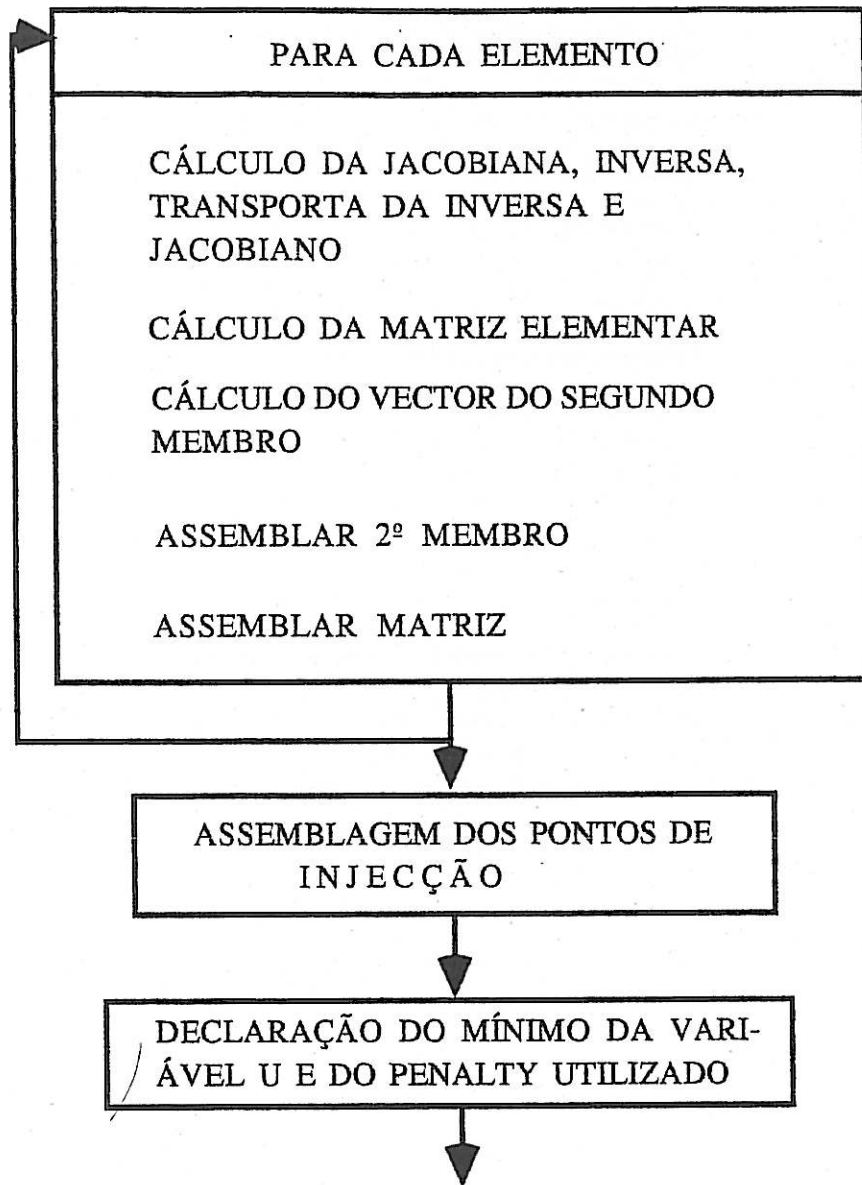
Algoritmo

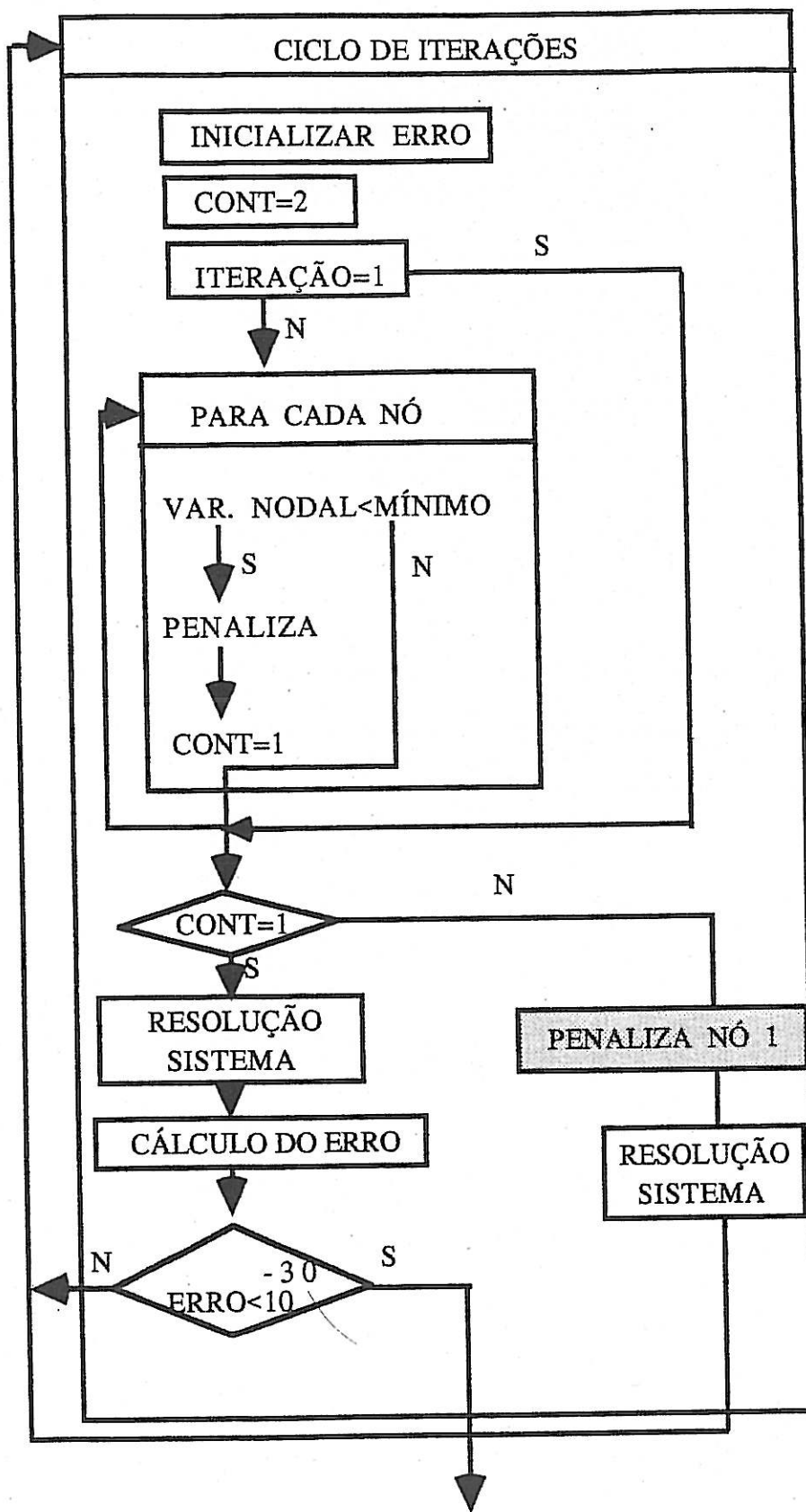
10.1-Algoritmo para implementação em computador

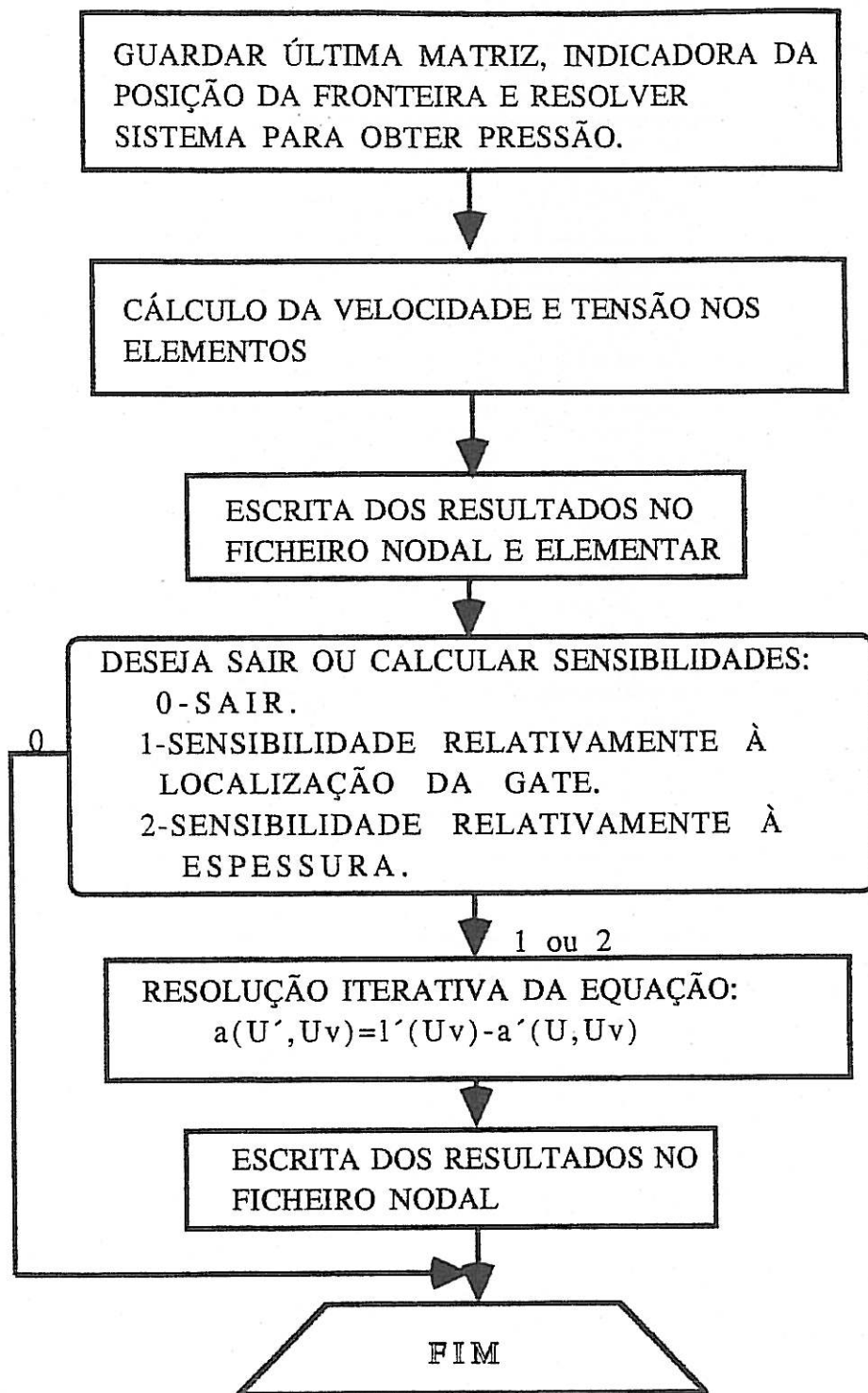
10.1-Algoritmo para implementação em computador

O algoritmo que se apresenta segue os passos mais importantes da implementação. Qualquer processo mais específico deverá ser procurado directamente no código, pois este possui comentários a esse nível.









Capítulo XI

Conclusões

11.1-Conclusões e trabalhos futuros

11.1-Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho procedeu-se a uma análise numérica com simulações que pretendem traduzir o que acontece no interior de um molde quando este se encontra numa máquina pronto a ser injectado. Apenas estuda casos de fluidos Newtonianos e escoamentos isotérmicos.

As fases durante as quais são desenvolvidas o modelo e o molde, tradicionalmente sequenciais, podem envolver significantes duplicações de tarefas e as análises computacionais atrasar o início da construção do molde. Utilizando um processo concorrente, algumas das fases podem ser sobrepostas, nomeadamente as análises com a fase de desbaste das placas do molde, antecipando assim a entrada do produto no mercado.

Com objectivo de projecto, este trabalho apresenta uma análise automática do processo " *O que acontece se ...?* ". Trata-se de uma análise de sensibilidades relativas a duas variáveis de projecto: localização do ponto de injeção e espessura do plástico.

Este código está vocacionado directamente para alguns aspectos de decisão do projectista como por exemplo a localização de escapes, linhas de união, e pontos de injeção, bem como a determinação dos campos de pressão e tensão. Estes últimos devem permitir a escolha da máquina adequada e verificar ou não a degradação do material.

Para que o projectista se possa mover no domínio mais amplo das soluções possíveis, seria de todo conveniente que o projecto da peça fosse executado ao mesmo tempo do projecto do molde.

Para possibilitar atingir outros objectivos, a este trabalho poderiam ser acrescentados os seguintes aspectos: parte térmica, utilização de fluidos não Newtonianos, balanceamento de sistemas de alimentação e redefinição da malha de elementos finitos na fronteira móvel.

O processo de optimização do modelo conduz a variáveis de projecto que melhoram a qualidade deste, mas que poderão também aumentar o seu custo. O objectivo será optimizar todo o ciclo do plástico, sabendo o que está a acontecer e o que deveria estar a acontecer dentro do molde, assegurando assim a qualidade e a produtividade.

ANEXO A

Código compilado em HP-ux

A1-Código compilado em HP-UX


```
C*****
C
C   COORDENADAS DOS NOS - NODE DATA - CARTAO 1
C*****
```

```
      DO 20 INOD=1,NNOD
         READ(1,*)
         READ(1,9003) sxcore(INOD),sycore(INOD)
         READ(1,*)
20      CONTINUE
9003   FORMAT(2E16.9)
```

```
C*****
C
C   CONECTIVIDADES DOS NOS - ELEMENT DATA- CARTAO 2
C*****
```

```
      DO 30 IELT=1,NELT
         READ(1,*)
         READ(1,9004) NNE,ii,IPE(IELT)
         if(nne.eq.6) then
            READ(1,9005) nodelt(ielt,1),nodelt(ielt,3),nodelt(ielt,5),
+ nodelt(ielt,2),nodelt(ielt,4),nodelt(ielt,6)

            else
            read(1,9005) nodelt(ielt,1),nodelt(ielt,2),nodelt(ielt,3)
         endif
30      CONTINUE
9004   FORMAT(3I8)
9005   FORMAT(6I8)
```

```
C*****
C
C   PROPRIEADES DOS ELEMENTOS- ELEMENT PROPERTIES-CARTAO 4
C*****
```

```
      DO 174 II=1,NPELE
         READ(1,*)
         READ(1,9007) st(II),sespes(II),svisc(II)
174     CONTINUE
9007   FORMAT(3E16.9)
```

```
C*****
C
C   CARGAS DISTRIBUIDAS          CARTAO 6
C*****
```

```
      DO 50 IELT=1,NELT
         READ(1,*)
         READ(1,*)
         READ(1,9008) sardis(IELT)
50      CONTINUE
9008   FORMAT(E16.9)
```

```
C*****
C
C   CARGAS CONCENTRADAS- GATES DE INJECCAO DE PLASTICO-cartao7
C*****
```

```
      DO 60 II=1,GATES
         READ(1,9009) KC,ino(ii)
         READ(1,*)
         READ(1,9010) sfmodz(ino(ii))
60      CONTINUE
9009   FORMAT(I2,I8)
9010   FORMAT(E16.9)
```

```
C*****
C
C   FECHO DO FICHEIRO neutral
C*****
```

```
      CLOSE(UNIT=1)
C*****
C   passagem de simples para dupla
C*****
```

```
      do 35 ii=1,nnod
         xcore(ii)=DBLE(sxcore(ii))
         ycore(ii)=DBLE(sycore(ii))
```

```

35      continue
      do 36 ii=1,nclt
          cardis(ii)=DBLE(scardis(ii))
36      continue

c*****inicializacao*****
      do 943 ii=1,nnod
          fnodz(ii)=0.0
943     continue

      do 37 ii=1,gates
          fnodz(ino(ii))=DBLE(sfnodz(ino(ii)))
37     continue

      DO 175 II=1,NPELE
          t(II)=DBLE(st(II))
          ESPES(II)=DBLE(SESPE(II))
          VISC(II)=DBLE(SVISC(II))
175     CONTINUE

c*****

C*****
C
C      DETERMINACAO DO NUMERO DE PONTOS DE GAUSS
C*****

9011    write(6,9011)
+       FORMAT('DIGA QUAL O NUMERO DE PONTOS DE INTEGRACAO',/,
+           'NOTE QUE: /, 4 PONTOS PARA ELEMENTO QUADRATICO',/,
+           '3 PONTOS PARA ELEMENTO QUADRATICO',/,
+           '1 PONTO PARA ELEMENTO LINEAR')
      READ(5,*) NPG

C*****
C
C      CHAMA SUBROTINA PARA DETERMINACAO DOS PONTOS E PESOS DE GAUSS,
C      N, DN/DKSI, DN/DETA, NESSES MESMOS PONTOS.
C*****

      CALL GAUSS (NPG,VKSIPG,VETAPG,VPESPG)

      CALL NDNPG(NNE,NPG,VKSIPG,VETAPG,VN3PG,VN6PG,VDN3KG,VDN6KG,
+           VDN3EG,VDN6EG)

C*****
C
C      PARA CADA PONTO DE GAUSS, CALCULAR A MATRIZ B
C*****

      DO 70 IG=1,NPG
          CALL BBTPG(NNE,IG,VDN3KG,VDN6KG,VDN3EG,VDN6EG,B3PG,
+           BT3PG,B6PG,BT6PG)
70     CONTINUE

C*****
C
C      CICLO SOBRE OS ELEMENTOS
C*****

      DO 100 IELT=1,NELT

C*****
C
C      DETERMINACAO DO JACOBIANO E PRIMOS PARA CADA ELEMENTO
C*****

      CALL JACOBI(IELT,NPG,NNE,NELX,NODELT,XCORE,YCORE,VDN3KG,VDN3EG,
+           VDN6KG,VDN6EG,JAC,JACIN,JACINT,DETJAC,CAREA)

C*****
C
C      DETERMINACAO DAS MATRIZES NECESSARIAS PARA O CAMPO DE VELOCIDADE

```


MINI=1.0D-200
PEN=1.0D100

```
C*****
C
C      abertura do ficheiro intermedio
C*****
2107  write(6,2107)
      format('escreva o ficheiro intermedio entre plicas')
      read(5,*) ficint
      open(unit=1,file=ficint)
      CALL TIMING(TEMPO1)
C*****
C
C      CICLO DE ITERACOES
C*****
      DO 101 ITER=1,50
          CALL TIMING(TEMPO2)
          TEMPO2=TEMPO2-TEMPO1
          WRITE(6,*)TEMPO DE CPU NO INICIO DAS ITERACOES',TEMPO2
          DO 102 II=1,NNOD
              ERROR(II)=0.0
102    CONTINUE
          CONT=2
          IF(ITER.EQ.1) THEN
              GOTO 333
          ELSE
              CONT=1
              DO 104 II=1,NNOD
                  DO 105 IJ=1,NNOD
                      K1PP(IJ)=K1P(II,IJ)
                      KSUP(IJ)=K1P(II,IJ)
105    CONTINUE
                      F1PP(II)=F1P(II)
                      FSUP(II)=F1P(II)
104    CONTINUE
                      DO 106 II=1,NNOD
                          IF(U(II).LT.MINI) THEN
                              KT(II,IJ)=KT(II,IJ)+PEN
                              KSUP(II,IJ)=KT(II,IJ)
                          ELSE
                              GOTO 106
                          ENDIF
106    CONTINUE
                      write(6,*)'-----'
                      write(6,*)'----->PROCURA FRONTEIRA PELA',iter,'VEZ<-----'
                      write(6,*)'-----'
                      ENDIF
333    IF(CONT.EQ.1) THEN
          CALL SIS(KT,FT,UN,NNOD,NNOX)
          DO 107 II=1,NNOD
              DO 108 IJ=1,NNOD
                  KT(II,IJ)=K1PP(II,IJ)
108    CONTINUE
                  FT(II)=F1PP(II)
107    CONTINUE
              DO 109 II=1,NNOD
                  DELTA(II)=DABS(UN(II)-U(II))
                  ERROR(II)=DABS(DELTA(II)/U(II))
1115  write(1,1115) II,'um',um(II),'u',u(II),'error',error(II)
          format(i4,a2,d16.9,a1,d16.9,a4,d16.9)
          U(II)=UN(II)
109    CONTINUE
          DO 110 II=1,NNOD
              IF(ERROR(II).LT.1.0D-30) THEN
                  GOTO 110
              ELSE
                  GOTO 101
              ENDIF
110    CONTINUE
          GOTO 700
          ELSE
              DO 111 II=1,NNOD
                  DO 112 IJ=1,NNOD
```



```

C *****
IF(NNE.EQ.3) THEN
DO 3350 IELT=1,NELT

      N1=NODELT(IELT,1)
      N2=NODELT(IELT,2)
      N3=NODELT(IELT,3)
      ELENOD(IELT,N1)=1
      ELENOD(IELT,N2)=1
      ELENOD(IELT,N3)=1

      DO 3351 I=(IELT+1),NELT
        DO 3352 IK=1,NNE

          IF(NODELT(I,IK).EQ.N1) THEN
            ELENOD(I,NODELT(I,IK))=1
            GOTO 3352

          ELSEIF(NODELT(I,IK).EQ.N2) THEN
            ELENOD(I,NODELT(I,IK))=1
            GOTO 3352

          ELSEIF(NODELT(I,IK).EQ.N3) THEN
            ELENOD(I,NODELT(I,IK))=1
            GOTO 3352

          ELSE
            ELENOD(I,NODELT(I,IK))=0

          ENDIF
        CONTINUE
      CONTINUE
3352 CONTINUE
3351 CONTINUE
3350 ELSE

      N1=NODELT(IELT,1)
      N2=NODELT(IELT,2)
      N3=NODELT(IELT,3)
      N4=NODELT(IELT,4)
      N5=NODELT(IELT,5)
      N6=NODELT(IELT,6)
      ELENOD(IELT,N1)=1
      ELENOD(IELT,N2)=1
      ELENOD(IELT,N3)=1
      ELENOD(IELT,N4)=1
      ELENOD(IELT,N5)=1
      ELENOD(IELT,N6)=1

      DO 3353 IELT=1,NELT
        DO 3354 I=(IELT+1),NELT
          DO 3355 IK=1,NNE

            IF(NODELT(I,IK).EQ.N1) THEN
              ELENOD(I,NODELT(I,IK))=1
              GOTO 3355

            ELSEIF(NODELT(I,IK).EQ.N2) THEN
              ELENOD(I,NODELT(I,IK))=1
              GOTO 3355

            ELSEIF(NODELT(I,IK).EQ.N3) THEN
              ELENOD(I,NODELT(I,IK))=1
              GOTO 3355

            ELSEIF(NODELT(I,IK).EQ.N4) THEN
              ELENOD(I,NODELT(I,IK))=1
              GOTO 3355

            ELSEIF(NODELT(I,IK).EQ.N5) THEN
              ELENOD(I,NODELT(I,IK))=1
              GOTO 3355

            ELSEIF(NODELT(I,IK).EQ.N6) THEN
              ELENOD(I,NODELT(I,IK))=1
              GOTO 3355

            ELSE
              ELENOD(I,NODELT(I,IK))=0

            ENDIF
          CONTINUE
        CONTINUE
      CONTINUE
3355 CONTINUE
3354 CONTINUE
3353 CONTINUE
ENDIF

```

```

C *****
C

```

```

C      PASSAGEM DAS VELOCIDADES DOS ELEMENTOS PARA OS NOS
C
C-----
DO 4411 INOD=1,NNOD
    SUMX(INOD)=0.0
    SUMY(INOD)=0.0
    PROX(INOD)=0.0
    PROY(INOD)=0.0

    DO 4412 IELT=1,NELT
        IF(ELENOD(IELT,INOD).EQ.1) THEN
            SUMX(INOD)=SUMX(INOD)+CAREA(IELT)
            SUMY(INOD)=SUMY(INOD)+CAREA(IELT)
            PROX(INOD)=PROX(INOD)+UX(IELT)*CAREA(IELT)
            PROY(INOD)=PROY(INOD)+UY(IELT)*CAREA(IELT)
        ELSE
            GOTO 4412
        ENDIF
    CONTINUE
4412    UXN(INOD)=PROX(INOD)/SUMX(INOD)
        UYN(INOD)=PROY(INOD)/SUMY(INOD)
4411    CONTINUE
C-----
C      RESULTADOS NODAIS DA VARIÁVEL U E DA PRESSÃO
C
C-----
222    WRITE(6,222)
        FORMAT('NOME DO FICHEIRO DE RESULTADOS NODAIS ENTRE PLICAS')
        READ(5,*) FINRES
        OPEN(UNIT=2,FILE=FINRES,STATUS='UNKNOWN')
        REWIND(2)
        WRITE(6,*) 'ESCREVA UM TITULO PARA O FICHEIRO ENTRE PLICAS'
        READ(5,*) AAA
        WRITE(2,2000) AAA
2000    FORMAT(A80)
        WRITE(2,2001) NNOD,0.0,0.0,2
2001    FORMAT(2I9,E15.6,2I9)
        WRITE(6,*) 'ESCREVA UM SUBTITULO ENTRE PLICAS'
        READ(5,*) SUB1
        WRITE(2,2003) SUB1
2003    FORMAT(A80)
        WRITE(6,*) 'ESCREVA UM SUB-SUBTITULO ENTRE PLICAS'
        READ(5,*) SUB2
        WRITE(2,2004) SUB2
2004    FORMAT(A80)

        do 993 ii=1,nnod
            ufi(ii)=SNGL(u(ii))
            presfi(ii)=SNGL(pres(ii))
993    continue

        DO 345 II=1,NNOD
            WRITE(2,2005) II,ufi(ii),presfi(ii)
345    CONTINUE
2005    FORMAT(I8,(5E13.7))

        CLOSE (UNIT=2)
C-----
C      FICHEIRO DE RESULTADOS ELEMENTARES QUE CONTEM AS VELOCIDADES
C      UX, UY
C-----
223    WRITE(6,223)
        FORMAT('NOME DO FICHEIRO DE VELOCIDADES ENTRE PLICAS')
        READ(5,*) FIERES
        OPEN(UNIT=2,FILE=FIERES,STATUS='UNKNOWN')
        REWIND(2)
        WRITE(6,*) 'ESCREVA UM TITULO ENTRE PLICAS'
        READ(5,*) AA
        WRITE(2,2011) AA
2011    FORMAT(80A1)

```

```

2012 WRITE(2,2012) 2
      FORMAT(15)

      WRITE(6,*)'ESCREVA UM SUBTITULO ENTRE PLICAS'
      READ(5,*) SU1
2018 WRITE(2,2018) SU1
      FORMAT(80A1)

      WRITE(6,*)'ESCREVA UM SUB-SUBTITULO ENTRE PLICAS'
      READ(5,*) SU2
2019 WRITE(2,2019) SU2
      FORMAT(80A1)

      DO 1094 II=1,NELT
          SUX(II)=SINGL(UX(II))
          SUY(II)=SINGL(UY(II))
1094 CONTINUE

      DO 1194 II=1,NELT
          WRITE(2,3020) II,3,SUX(II),SUY(II)
1194 CONTINUE
3020 FORMAT(2I8,/, (6E13.7))

      CLOSE(UNIT=2)

```

```

C*****
C
C FICHEIRO DE RESULTADOS ELEMENTARES QUE CONTEM AS TENSOES
C NA FACE Z - TENSAO EQUIVALENTE
C*****

```

```

523 WRITE(6,523)
      FORMAT('NOME DO FICHEIRO DE TENSOES ENTRE PLICAS')

      READ(5,*) FITRES
      OPEN(UNIT=2,FILE=FITRES,STATUS='UNKNOWN')

      REWIND(2)

      WRITE(6,*) 'ESCREVA UM TITULO ENTRE PLICAS'
      READ(5,*) AA
5011 WRITE(2,5011) AA
      FORMAT(80A1)

      WRITE(2,5012) 1
5012 FORMAT(15)

      WRITE(6,*)'ESCREVA UM SUBTITULO ENTRE PLICAS'
      READ(5,*) SU1
5018 WRITE(2,5018) SU1
      FORMAT(80A1)

      WRITE(6,*)'ESCREVA UM SUB-SUBTITULO ENTRE PLICAS'
      READ(5,*) SU2
5019 WRITE(2,5019) SU2
      FORMAT(80A1)

      DO 5094 II=1,NELT
          STT(II)=SINGL(TT(II))
5094 CONTINUE

      DO 5194 II=1,NELT
          WRITE(2,5020) II,3,STT(II)
5194 CONTINUE
5020 FORMAT(2I8,/, (6E13.7))

      CLOSE(UNIT=2)

```

```

C*****
C
C ESCREVE NUM NOVO FICJHEIRO AS VELOCIDADES EXTRAPOLADAS
C DOS ELEMENTOS PARA OS NOS
C*****

```

```

2234 WRITE(6,2234)
      FORMAT('NOVO NOME PARA FICHEIRO NODAL VINDO DO ELEMENTAR')
      READ(5,*) FINREE
      OPEN(UNIT=2,FILE=FINREE,STATUS='UNKNOWN')
      REWIND(2)

      WRITE(2,2091) AAA
2091 FORMAT(A80)

      WRITE(2,2092) NNOD,0,0.,0,2
2092 FORMAT(2I9,E15.6,2I9)

```



```

C*****
C
C      INTRODUCAO DO VALOR DE Q
C*****
      WRITE(6,*)
      WRITE(6,*)
      WRITE(6,*) INTRODUZA O VALOR DE QT
      READ(5,*) MOME
      WRITE(6,*)
      WRITE(6,*)

```

```

C*****
C
C      DETERMINACAO DO VECTOR I'(UV)
C*****
      FSEN(NOUM)=MOME/D
      FSEN(NODOIS)=MOME/D

```

```

C*****
      DO 5552 II=1,NNOD
          DO 5553 IJ=1,NNOD
              KSENG(IJ,IJ)=KSEN(IJ,IJ)
              KSENE(IJ,IJ)=KSEN(IJ,IJ)
              KSENE(I,IJ)=KSEN(I,IJ)
          5553      CONTINUE
          FSEMP(IJ)=FSEN(IJ)
      5552      CONTINUE

```

```

C*****
C
C      DETERMINACAO DA U' COMO UM PROCESSO ITERATIVO DO SISTEMA
C      a(U',UV)=I'(UV)
C*****

```

```

      do 7751 ii=1,nnod
          if(ninfo(ii).eq.1) then
              ksene(ii,ii)=ksene(ii,ii)+1.0d30
          else
              goto 7751
          endif
      7751      continue

      7755      CALL SIS(KSENE,FSEN,SENGAT,NNOD,NNOX)

      DO 5556 II=1,NNOD
          SENGA(II)=SENGAT(II)
          FSEN(II)=FSEMP(II)
      5556      CONTINUE

```

```

C*****
C
C      PROCURA CONDICOES FRONTEIRA
C*****
      write(6,8107)
      format('escreva o ficheiro de sen. intermedio entre plicas')
      read(5,*) ficint
      open(unit=1,file=ficint)

```

```

      DO 5557 ITER=1,30

          WRITE(6,*)'*****'
          WRITE(6,*)'ITERACAO PARA SENSIBILIDADES',ITER,'VEZ'
          WRITE(6,*)'*****'

          DO 5560 II=1,NNOD
              IF(NINFO(II).EQ.1) THEN
                  IF(SENGA(II).LT.MIND) THEN
                      KSENE(I,IJ)=KSENE(I,IJ)+1.0d30
                      write(6,*)'no penalizado',ii

```

```

ELSE
    KSENEEN(II,II)=KSENEEN(II,II)
write(6,*)'no com pressao nula nao penalizado',ii
ENDIF

ELSE
    GOTO 5560

ENDIF

5560    CONTINUE

CALL SIS(KSENEEN,FSEN,SENGAN,NNOD,NNOX)

do 6764 ii=1,nnod
do 6765 ij=1,nnod
    ksenen(ii,ij)=ksen(ii,ij)
6765    continue
6764    continue
        fsen(ii)=fscmp(ii)

DO 5561 II=1,NNOD
    ERROR(II)=DABS((SENGAN(II)-SENGA(II))/SENGA(II))
8115 write(1,8115) ii,'SN',SENGA(ii),'SA',SENGAN(ii),'e',error(ii)
    format(i4,a2,d16.9,a2,d16.9,a1,d16.9)
    SENGA(II)=SENGAN(II)

5561    CONTINUE
    DO 5562 II=1,NNOD
        IF(ERROR(II).LT.1.D-15) THEN
            GOTO 5562
        ELSE
            GOTO 5557
        ENDIF

5562    CONTINUE
    GOTO 888

5557    CONTINUE
    CLOSE(1)

888    WRITE(6,*) '_____
    WRITE(6,*) '_____
    WRITE(6,*) 'ESCREVA O NOME DO FICHEIRO QUE CONTEM AS SENSIBIL.'
    WRITE(6,*) 'DADES RELATIVAMENTE A POSICAO DA GATE(ENTRE PLICAS)'
    WRITE(6,*) '_____
    WRITE(6,*) '_____

    READ(5,*) FISENG
    OPEN (UNIT=2,FILE=FISENG,STATUS=UNKNOWN)
    REWIND(2)

    WRITE(6,*) 'ESCREVA UM TITULO ENTRE PLICAS'
    READ(5,*) AAA
    WRITE(2,5732) AAA
5732    FORMAT(A80)

    WRITE(2,5733) NNOD,0.0,.0,1
5733    FORMAT(2I9,E15.6,2I9)

    WRITE(2,5734) SUB1
5734    FORMAT(A80)

    WRITE(2,5735) SUB2
5735    FORMAT(A80)

    DO 3359 II=1,NNOD
        SSENGA(II)=SNGL(SENGA(II))

```

```

3359  CONTINUE
      DO 3360 II=1,NNOD
          WRITE(2,5736) II,SSENGA(II)
3360  CONTINUE
5736  FORMAT(18,(5E13.7))
      CLOSE(2)
      GOTO 7676

```

```

C*****
C
C      CALCULO DA SENSIBILIDADE RELATIVAMENTE A ESPESSURA
C*****

```

```

6355  WRITE(6,*)'_____';
      WRITE(6,*)'_____';
      WRITE(6,*)'QUAL A ZONA COM VARIACAO DE ESPESSURA, ORIGINADA'
      WRITE(6,*)'PELO COMANDO PFEG DO PATRAN'
      WRITE(6,*)'_____';
      WRITE(6,*)'_____';

      READ(5,*) IPER

      DO 4421 II=1,NPELE
          TMODIF(II)=0.0
4421  CONTINUE

      TMODIF(IPER)=3*ESPES(IPER)**2/(12*VISC(IPER))

      DO 4422 IELT=1,NELT

          CALL KELEI(NNE,IELT,NPG,VPESPG,JACIN,JACINT,DETJAC,TMODIF,
          +         NPELEM,IPE,NELX,B3PG,BT3PG,B6PG,BT6PG,KEINMO)

          DO 4423 II=1,NNE
              IN=NODELT(IELT,II)
              DO 4424 IJ=1,NNE
                  JN=NODELT(IELT,IJ)
                  KSENH(IN,JN)=KSENH(IN,JN)+KEINMO(II,IJ)
4424  CONTINUE
4423  CONTINUE
4422  CONTINUE

```

```

C*****
C
C      DETERMINACAO DA SEGUNDA PARCELA DO SEGUNDO MEMBRO DA
C      EQUACAO EM U'. TRATA-SE DO CALCULO DE A'(U,UV)
C*****

```

```

      CALL MULSEN(KSENH,U,FSENNH,NNOD,NNOX)

      DO 7715 II=1,NNOD
          FENNH(II)=-FSENNH(II)
          DO 7716 IJ=1,NNOD
              KSENE(II,IJ)=KSEN(II,IJ)
              KSENE(II,IJ)=KSEN(II,IJ)
7716  CONTINUE
7715  CONTINUE

```

```

C*****
C
C      DETERMINACAO DA PRIMEIRA PARCELA DO SEGUNDO MEMBRO. TRATA-SE
C      DO CALCULO DE L'(UV)
C*****

```

```

      DO 1271 II=1,NELT

          if(ipe(ii).eq.ipcr) then
              LDIS(II)=1.0
          else
              LDIS(II)=0.
          endif
1271  CONTINUE

      DO 1128 IELT=1,NELT

```

```

CALL QOINT(NNE,IELT,NPG,VPESPG,LDIS,VN3PG,VN6PG,DETJAC,LLIN)
      DO 1129 II=1,NNE
            IN=NODELT(IELT,II)
            LLD(IN)=LLD(IN)+LLIN(II)
1129      CONTINUE
1128      CONTINUE

```

```

C*****
C
C      parte de l' correspondente a forca concentrada
C*****

```

```

C
C
C      DO 4343 II=1,GATES
            LLD(INO(II))=LLD(INO(II))-FNODZ(INO(II))/ESPES(IPER)
c4343      CONTINUE

```

```

C*****
C
C      DETERMINACAO DE U' COMO UM PROCESSO ITERATIVO DO SISTEMA
C      A(U,UV)=L'(UV)-A'(U,UV)
C*****

```

```

      ksenc(1,1)=ksenc(1,1)+1.0d30

      DO 1130 II=1,NNOD
            FTDUDH(II)=FENNH(II)+LLD(II)
            FTDUNH(II)=FTDUDH(II)
1130      CONTINUE

```

```

CALL SIS(KSENE,FTDUDH,SENET,NNOD,NNOX)

      do 4446 ii=1,nnod
            senesp(ii)=senet(ii)
4446      continue

```

```

      write(6,8807)
      format('escrava o ficheiro de sen. intermedio entre plicas')
      read(5,*) ficint
      open(unit=1,file=ficint)

      DO 4561 II=1,NNOD

            ERROR(II)=DABS((SENESN(II)-SENESE(II))/SENESE(II))
4561      CONTINUE

```

```

      DO 3737 ITER=1,30

      DO 3741 II=1,NNOD
            FTDUDH(II)=FTDUNH(II)
3741      CONTINUE

```

```

      WRITE(6,*)'*****'
      WRITE(6,*)'ITERACAO PARA SENSIBILIDADES',ITER,' VEZ'
      WRITE(6,*)'*****'

      DO 9954 II=1,NNOD

```

```

            IF(NINFO(II),EQ,1) THEN
c              IF(SENESE(II).LT.mini) THEN
c                KSENEEN(II,II)=KSENEEN(II,II)+PEN
c              write(6,*) 'no penalizado,isto e derivada de u=0',ii
c              ELSE
c                KSENEEN(II,II)= KSENEEN(II,II)
c              write(6,*)'no com pressao nula nao penalizado',ii
c              ENDF
            ELSE

```

```

                                GOTO 9954
ENDIF

9954      CONTINUE

                                CALL SIS(KSENEF,FTDUDH,SENEFN,NNOD,NNOX)

do 6735 ii=1,nnod
do 6736 ij=1,nnod
ksenen(ii,ij)=ksen(ii,ij)
6736      continue
6735      FTDUDH(ii)=FTDUNH(ii)
        continue

DO 4462 II=1,NNOD

        ERROR(II)=DABS((SENEFN(II)-SENEFP(II))/SENEFP(II))

8815      write(1,8815) ii,'SN',sencan(ii),'Sp',sencsp(ii),'c',error(ii)
        format(i4,a2,d16.9,a2,d16.9,a1,d16.9)

        SENEFP(II)=SENEFN(II)

4462      CONTINUE

DO 8562 II=1,NNOD

        IF(ERROR(II).LT.1.0D-15) THEN

                                GOTO 8562

        ELSE

                                GOTO 3737

        ENDIF

8562      CONTINUE

        GOTO 777

3737      CONTINUE
        close(1)

777      WRITE(6,*) '_____
WRITE(6,*) '_____
WRITE(6,*) 'ESCREVA O NOME DO FICHEIRO QUE CONTEM AS SENSIBIL-'
WRITE(6,*) 'DADES RELATIVAMENTE A ESPESSURA (ENTRE PLICAS)'
WRITE(6,*) '_____
WRITE(6,*) '_____

        READ(5,*) FISENH

        OPEN (UNIT=2,FILE=FISENH,STATUS='UNKNOWN')

        REWIND(2)

        WRITE(6,*) 'ESCREVA UM TITULO ENTRE PLICAS'
        READ(5,*) AAA
        WRITE(2,7732) AAA
7732      FORMAT(A80)

        WRITE(2,7733) NNOD,0.0,.0,1
7733      FORMAT(2I9,E15.6,2I9)

        WRITE(2,7734) SUB1
7734      FORMAT(A80)

        WRITE(2,7735) SUB2
7735      FORMAT(A80)

        DO 7359 II=1,NNOD

                                SSENSN(II)=SNGL(SENEFN(II))
7359      CONTINUE

        DO 7360 II=1,NNOD

                                WRITE(2,7736) II,SSENSN(II)

7360      CONTINUE
7736      FORMAT(I8,(5E13.7))
        CLOSE(2)

9999      GOTO 7676
        STOP
        END

```

BIBLIOGRAFIA

- [1]-"Applications of Computer Aided Engineering in injection molding", HANSER PUBLISHERS,1987,pag137 a 171.
- [2]-"Une presentation de la méthode des éléments finis",Gouri Dhatt et Gilbert Touzot, 2ème édition, MALOINE S.A. ÉDITEUR, Paris 1984.
- [3]-"A theoretical model for the cavity filling processe in injection molding", TRANSACTIONS OF THE SOCIETY OF RHEOLOGY 19:3, 423-444, 1975.
- [4]-"Viscous Flow",Frederick S. Sherman, MCGRAW HILL PUBLISHING COMPANY,1990.
- [5]-"Fundamentals of polymer processing",Stanley Middleman, MCGRAW HILL BOOK COMPANY, U.S.A, 1977, pag. 260-294.
- [6]-"Flow Analysis manual", MOLDFLOW, release 8.
- [7]-"Design sensitivity analysis of structural systems"; Edward Haug, Kyung Choi, Vadim Komkov; ACADEMIC PRESS INC.; USA; 1986.
- [8]-"Nonlinear Programming, theory and algorithms"; Mokhitar Bazaraa, C.M. Shetty; JOHN WILEY AND SONS; USA; 1979.
- [9]-"Sensitivity analysis of problems of elasticity with unilateral constraints"; Bendsøe, Olhoff, Sokolowski; Journal Structural Mechanics, pag. 201-222; 1985.
- [10]-"Advanced Engineering Mathematics"; Michael D. Greenberg; PRENTICE HALL; USA; 1988.
- [11]-"Boundary Layer theory"; Hermann Schlichting; MCGRAW HILL series in mechanical Engineering, 7 th edition; USA; 1979.
- [12]-"Developments in injection moulding"; A whelan, J.P. Goff; ELSEVIER APPLIED SCIENCE PUBLISHERS; USA; 1985.
- [13]-"Computation Analysis of polymer processing"; J.R.A. Pearson, S.M. Richardson; APPLIED SCIENCE PUBLISHERS; USA; 1983.

[14]-"A theoretical model for the cavity filling"; E. Broyer, C. Gutfinger, Z. Tadmor; TRANSACTIONS OF THE SOCIETY OF RHEOLOGY 19:3, 423-444 (1975).

[15]-"Finite element simulation of the mold filling process"; M.P. Reddy, J.N.Reddy; ADM-vol125; Advances in finite deformation problems in material processing and structures-ASME 1991.

[16]-"Numerical simulation of mold filling in reaction injection molding"; R.E. Hayes, H.H. Dannelongue, P.A. Tanguy; Polymer Engineering and Science, Mid-June, vol.31, n°11; 1991.

[17]-"Optimization in injection molding design.part i: gate location optimization"; Ioannis Pandelidis, Qin Zou; Polymer Engineering and Science; Mid-August, vol.30, Mid-August, vol. 30, n°15; 1991.

[18]-"Optimization in injection molding design.part ii: molding conditions optimization"; Ioannis Pandelidis, Qin Zou; Polymer Engineering and Science; Mid-August, vol.30, Mid-August, vol. 30, n°15; 1991.

[19]-"Finite element / finite difference simulation of the injection-molding filling process"; C.A. Hieber, S.F. Shen; Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics; 7(1980) 1-32.

[20]-"Fdm approximations of variational inequalities with an application to injection moulding"; Jörg Steinbach; International series of Numerical mathematics, vol99; 1991.

[21]-"A variational inequality approach to Hell Shaw flow with a moving boundary"; C.M. Elliott, V. Janovsky; Proceedings of the Royal Society of Edinburgh - 88 A, 93-107;1981.

[22]-"Flow analysis reference manual"; Peter Kennedy; Moldflow Pty, Lda.; Australia; 1993.