UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CAMPUS DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SEM 391 - CAE

Aula 9

LABORATÓRIO CAD/CAE
São Carlos
Fevereiro, 2000

Fluxograma de um programa de MEF

Em termos práticos o fluxograma está dividido em 3 partes :

♈ **Pré- processador :**

- modelador sólido, e suporte CAD onde a geometria do domínio é feita.
- gerador de malhas
- entrada de dados adicionais, por exemplo propriedades de materiais

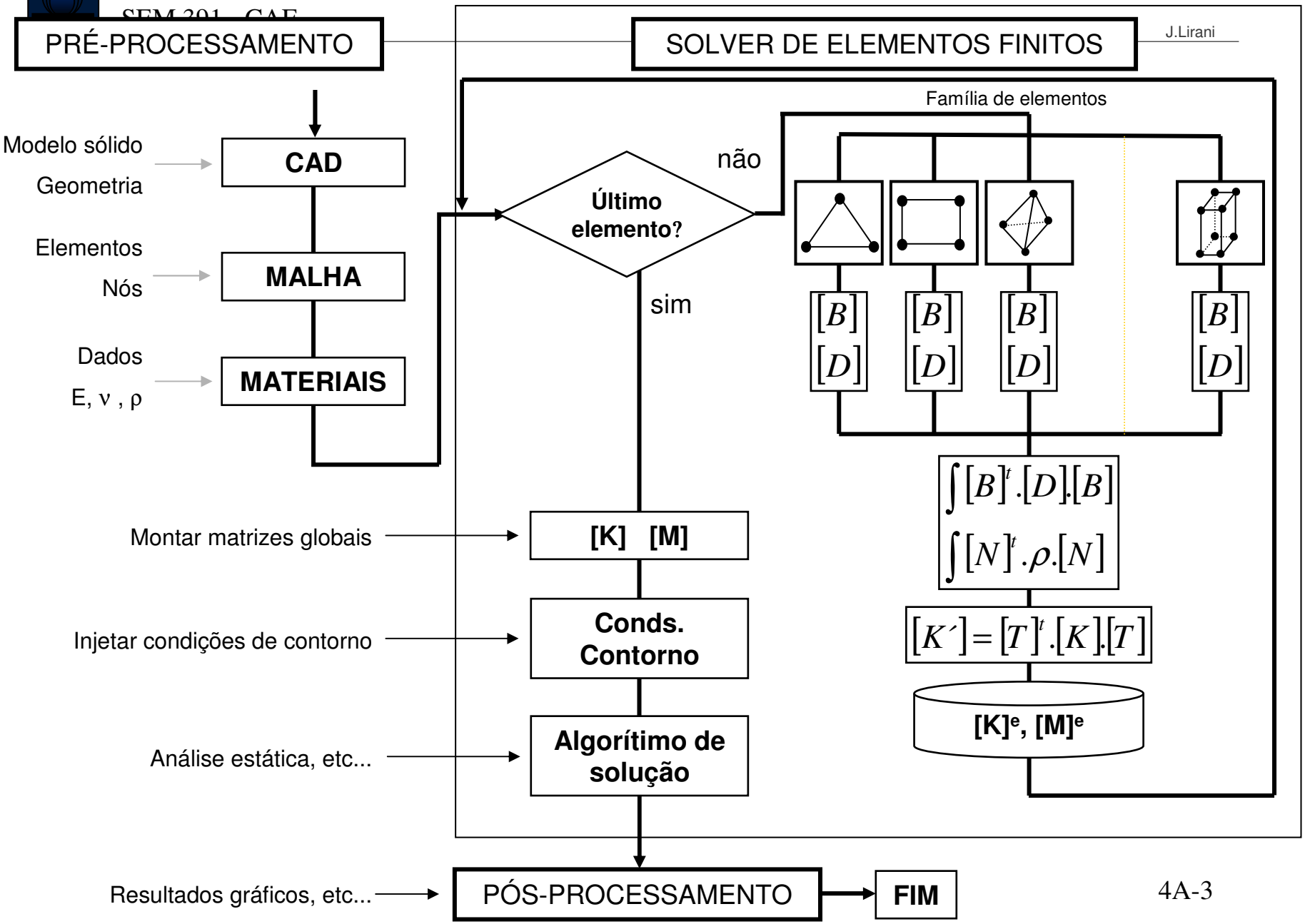
♈ **Solver :**

- coração do algoritmo, calcula as matrizes parcelas [B], [D], [N]
- faz a integração numérica
- faz transformação de coordenadas.
- cálculo das matrizes elementares
- montagem das matrizes globais e injeta c.c.
- faz análise apropriada - estática, dinâmica, térmica, etc

♈ **Pós-processador :**

- apresentação dos resultados nodais e elementares.
- apresenta forma

FLUXOGRAMA - MEF



Procedimento Padrão

PRÉ-PROC.

Análise

Tipos de Elementos

Material

Modelagem Sólida

Atributos da malha ⇨ Geração da malha

SOLVER

Condições de Contorno ⇨ Carregamentos

Tipo de análise ⇨ Solução

PÓS-PROC.

Resultados ⇨ Análise de resultados

Outras informações

Análise Preferences

- Determinação dos objetivos : Abstração do problema
- Escolha do modelo : 2D ou 3D
- Escolha entre elementos lineares ou de ordem mais elevada :
- Vantagens de simetrias : Geometria / Malha
- Verificar nível de detalhamento :
  - Modelamento sólido
  - Geração direta
- Estabelecer densidade apropriada de malha :
  - Malhas adaptativas
  - Otimização
- Modelar condições de contorno e carregamentos

Análise

Seleção do tipo de problema:

- **Estrutural**
- **Térmico**

Metodologias de otimização :

Método-p
Método-h

⇨ Citado em 2B-8

- Fluídico
- Eletromagnético

Tipos de Elementos Element Type

Discretização do Domínio :

- Uma importante tarefa do método dos elementos finitos :

  ⇨ Construção da malha de elementos (determinação dos nós)

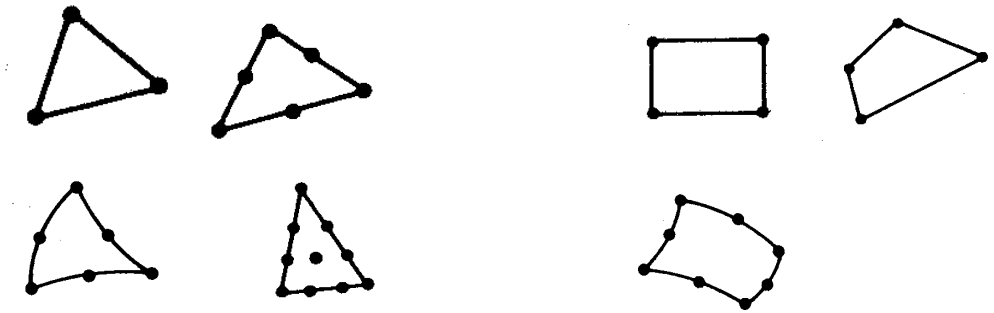
- Os elementos podem ser de tipos diferentes, porém pertencentes ao mesmo grupo (grupo dos elementos lineares, grupo dos elementos quadráticos, etc.)

Tipos de Elementos

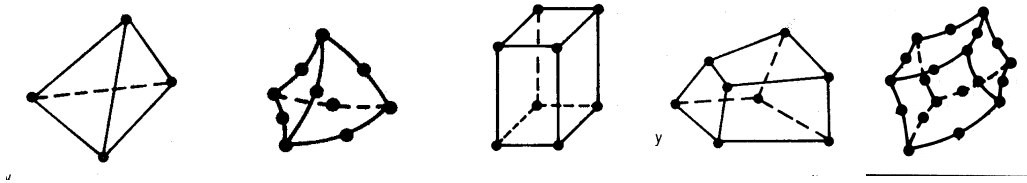
Escolha dos tipos de Elementos : Citado em 2A-19

- Casos mais comuns : Elementos triangulares (2D) e tetrahédricos (3D)
- Elementos comuns em análises mecânicas estruturais : **SHELL** e **SOLID**
- **Ver nomenclatura técnica na lista em anexo**
- Categorias : **Estruturais**, Contato, Hiperelásticos, Visco Sólidos, Fluídicos, Térmicos e outros

2D ou planos →



Sólidos →

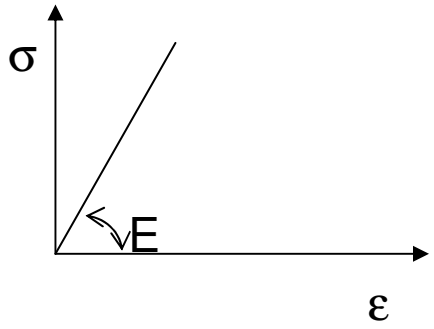


Material Material Properties

Propriedades de material Citado em 2A-11

- Propriedades lineares de vários materiais podem ser obtidas na biblioteca de materiais do Ansys

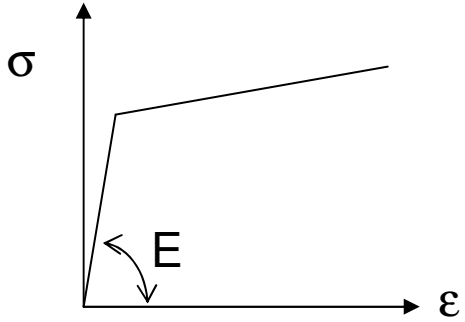
- Propriedades necessárias para análises estruturais lineares:
  - Densidade [kg/m^3]
  - Módulo de Young [N/m^2]
  - Coeficiente de Poisson



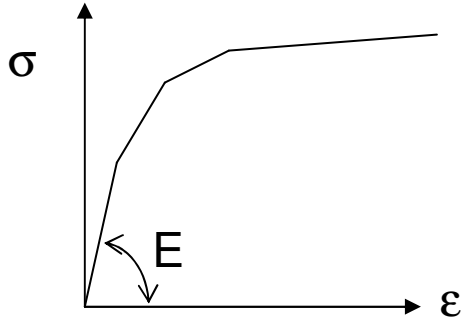
- Materiais podem ser considerados isotrópicos ou ortotrópicos

Material

Modelos de material considerando não linearidade:



Bilinear



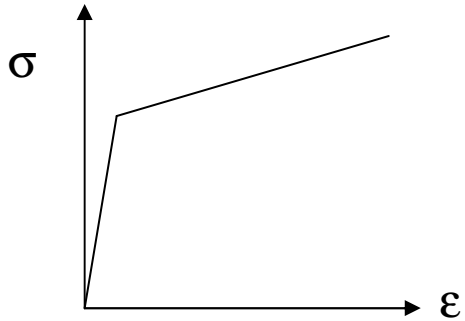
Multilinear

Citado em 2A-12

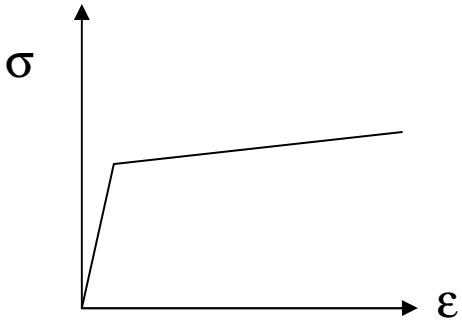
Anisotrópico

...

Certos modelos de material aceitam um comportamento variável em relação à temperatura:



Temperatura 1



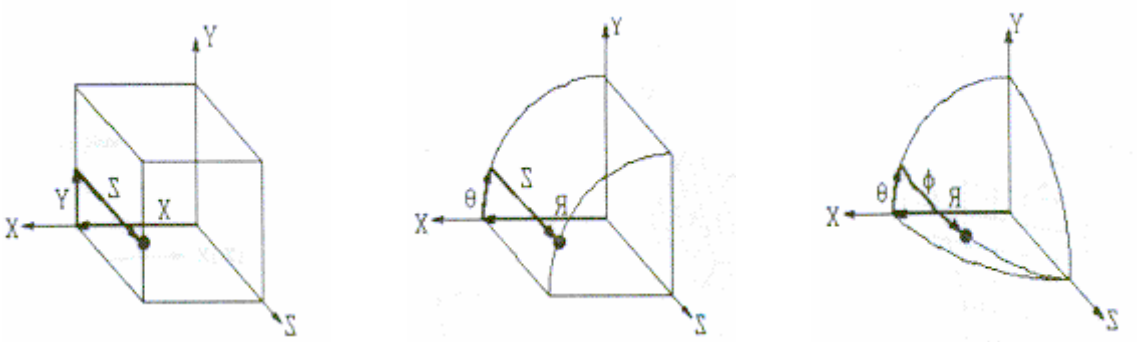
Temperatura 2

Citado em 2A-12

Modelamento Sólido Modeling

- Modelamento sólido ou modelamento geométrico
- Tipos de **sistemas de coordenadas** :
- Global e local : Localização de aspectos geométricos
- Display : Sistema para listagem e referência da geometria
- Nodal : Graus de liberdade (DOF) e resultados nodais
- Do elemento : Propriedades de material e resultados no elemento
- Resultados : Conversão para um caso de listagem, display ou operações do pós-processamento (POST1)

cartesiano cilíndrico esférico



Modelamento Sólido

Geração do modelo

- **Geração direta** da malha

OU

- **Modelamento sólido**, com posterior criação da malha

Modelamento Sólido

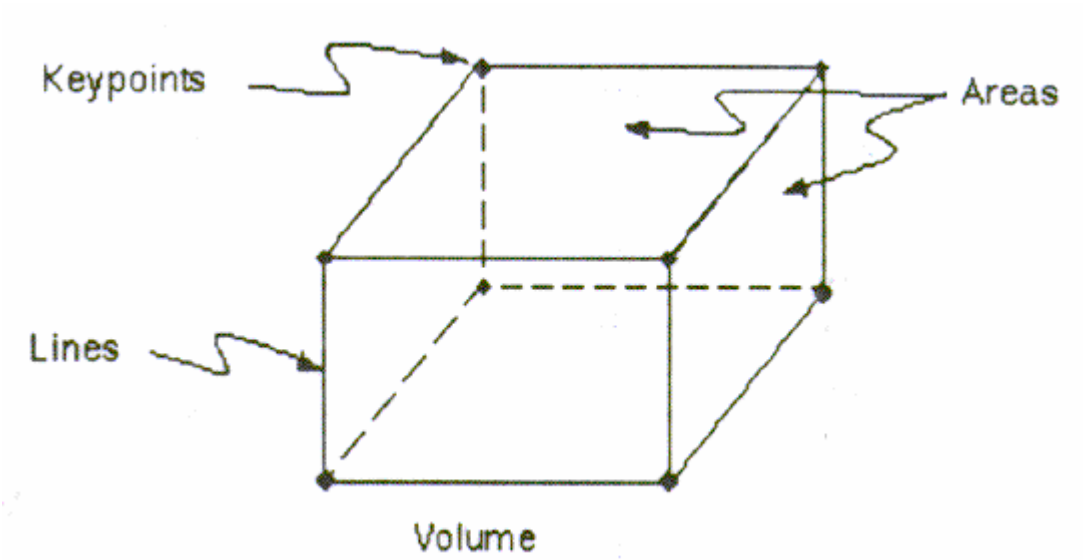
Geração direta da malha

- Modelos simples
- Criação direta de nós e elementos
- Podem ser feitas operações booleanas sobre nós e elementos

Modelamento Sólido

OBJETIVO : → **Estrutura para criação da malha**

Entidades primitivas :



Ordem :

Volumes
Areas
Lines
Keypoints

Modelamento Sólido

Construção do modelo baseia-se em :

1º caso) Modo "**Bottom Up**" : caso mais comum

Ordem de criação de entidades :

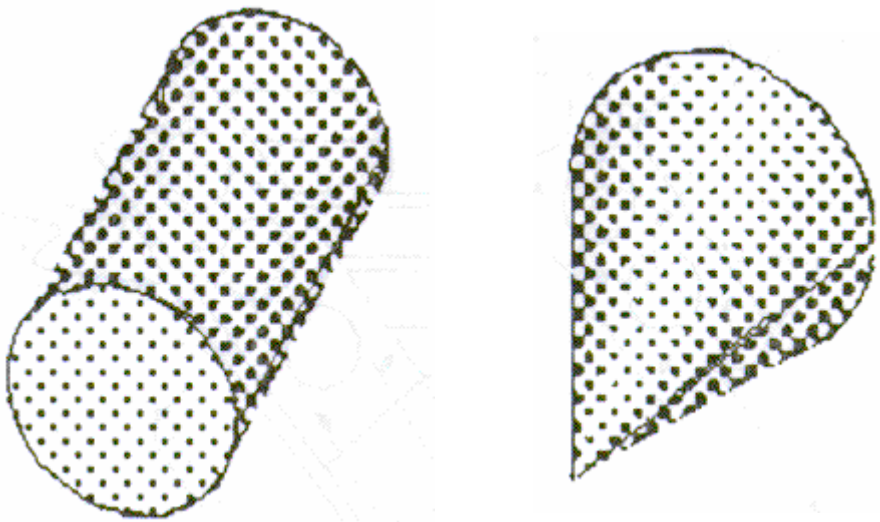
Keypoints ⇨ Lines ⇨ Areas ⇨ Volumes

Modelamento Sólido

2º caso) Modo "**Top Down**" :

- Primitivas cubo, esfera, cilindro, cone (3D) , etc.

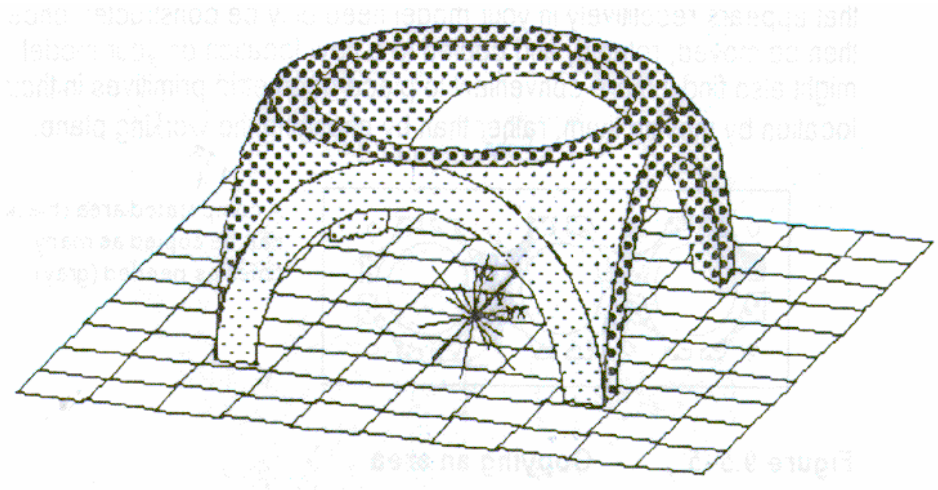
- Obs.: Criação automática de entidades de ordem inferior : areas, lines e keypoints



Modelamento Sólido

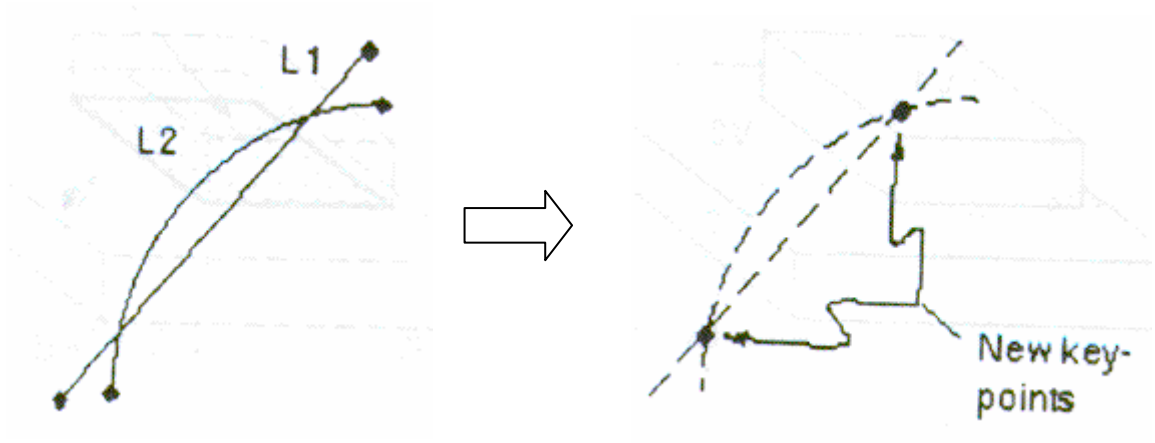
3º caso) Operações Booleanas : operações entre as diversas entidades

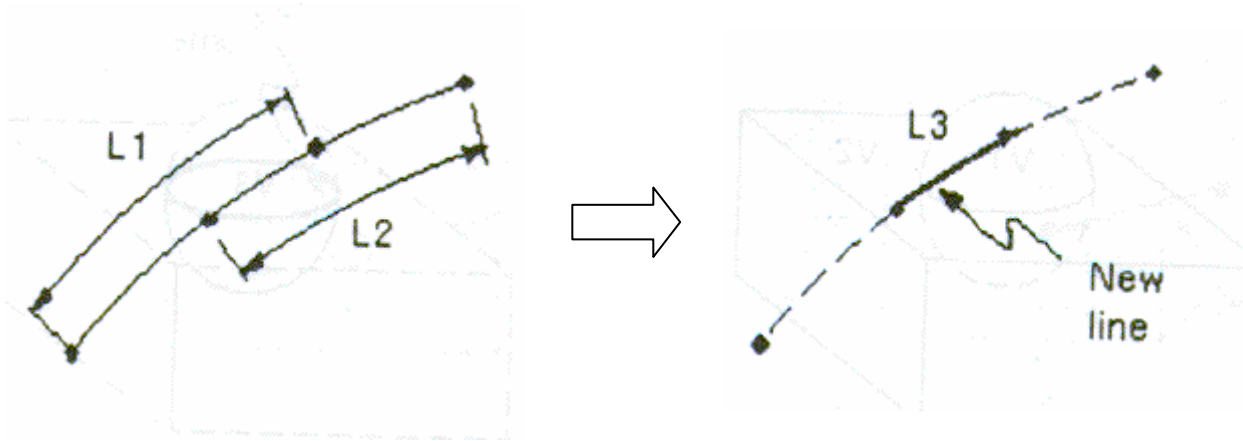
Exemplos gerais :



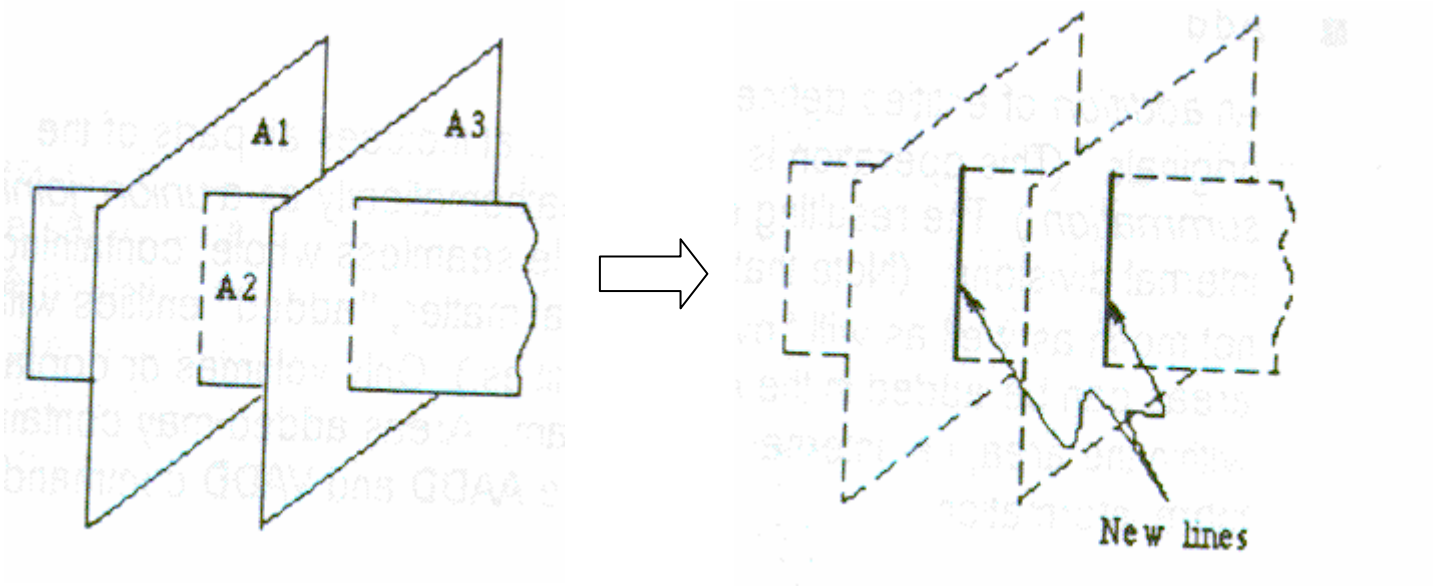
Modelamento Sólido

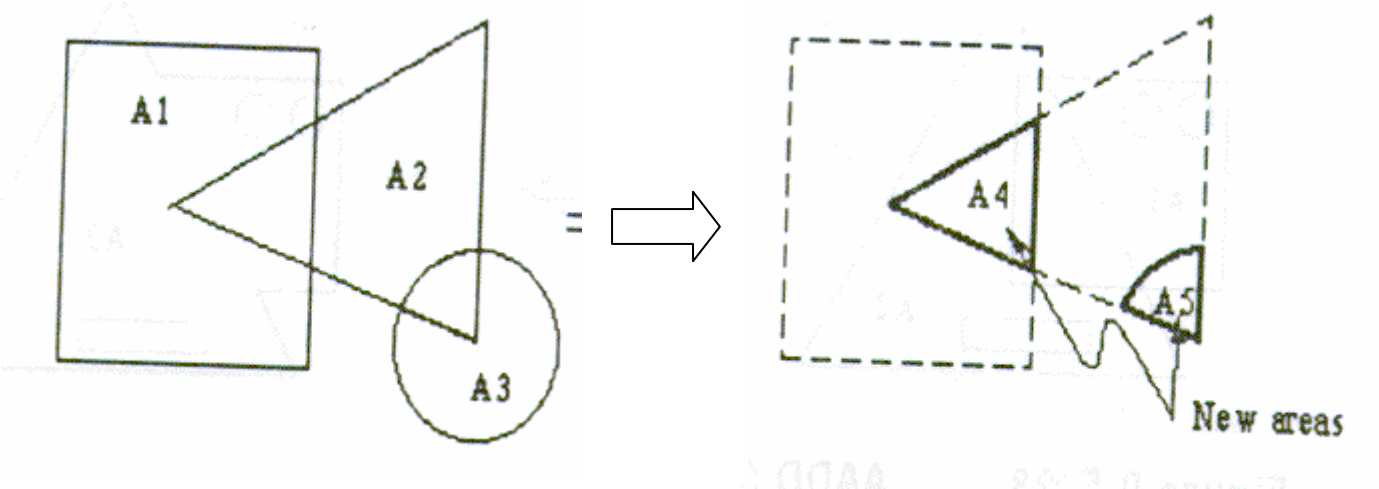
Operações Booleanas : **Intersect** $L1 \cap L2$



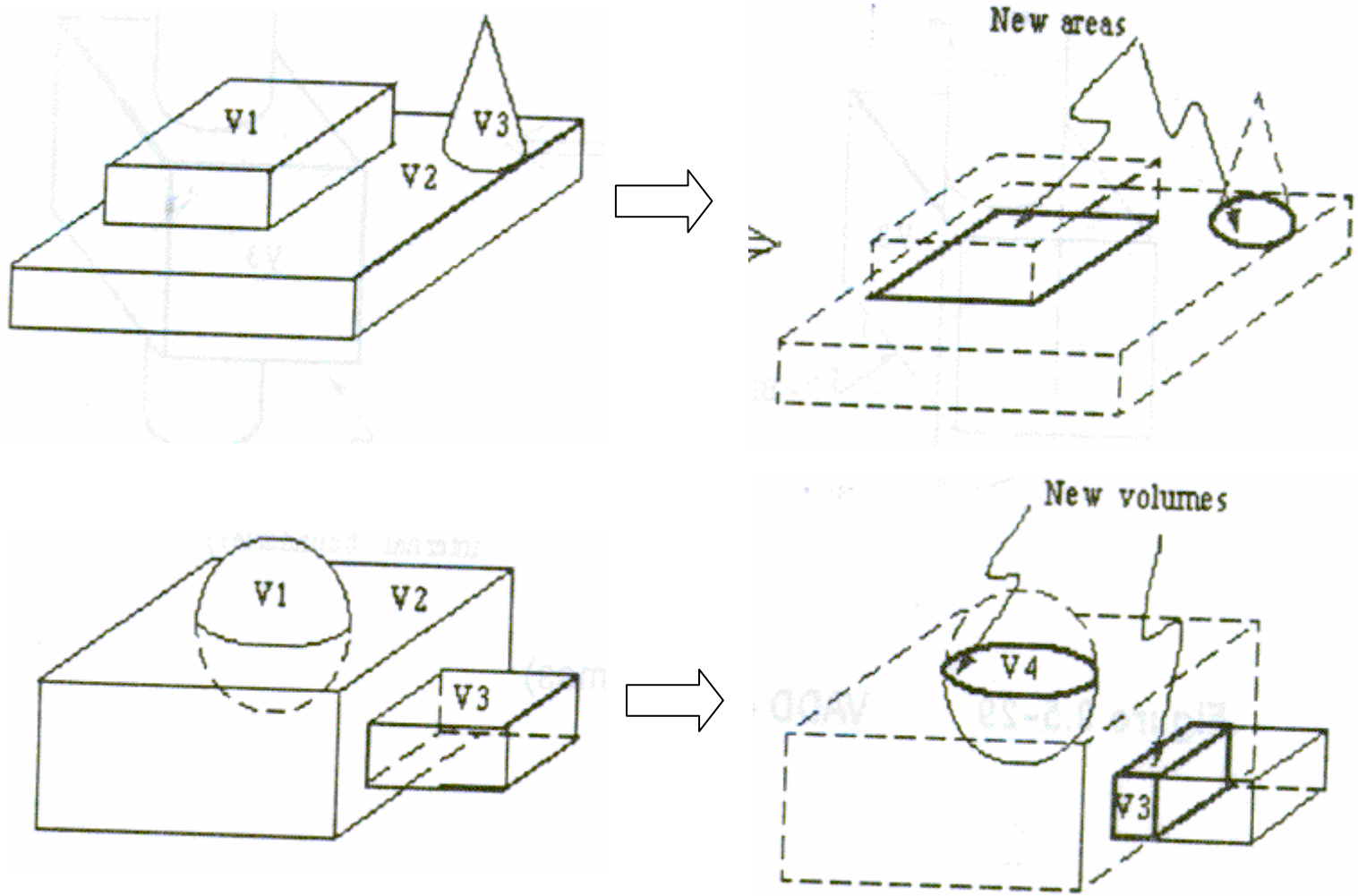


Operações Booleanas : **Intercept** $(A1 \cup A3) \cap A2$



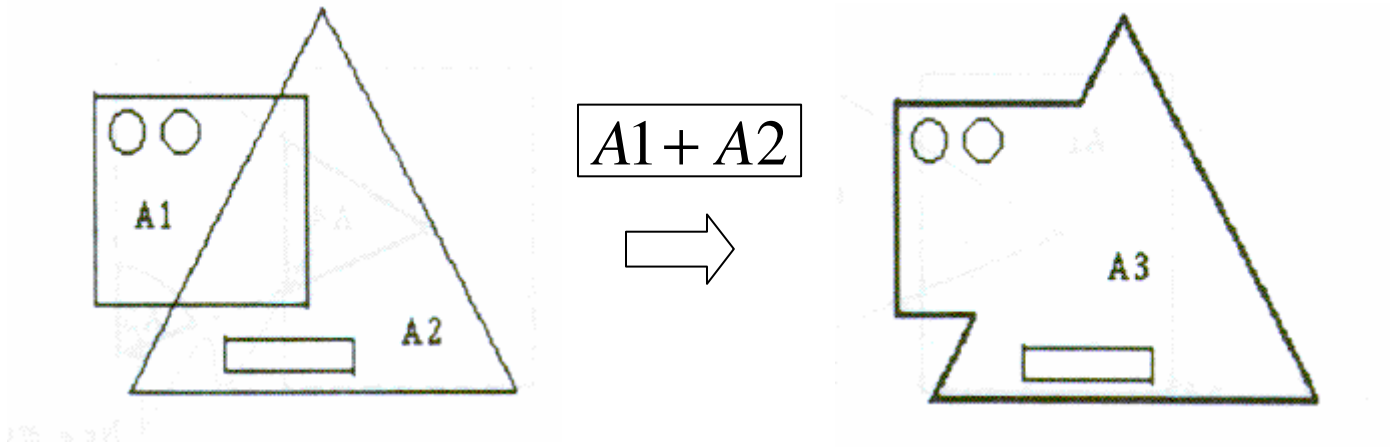


Operações Booleanas : **Intercept** $(V1 \cup V3) \cap V2$



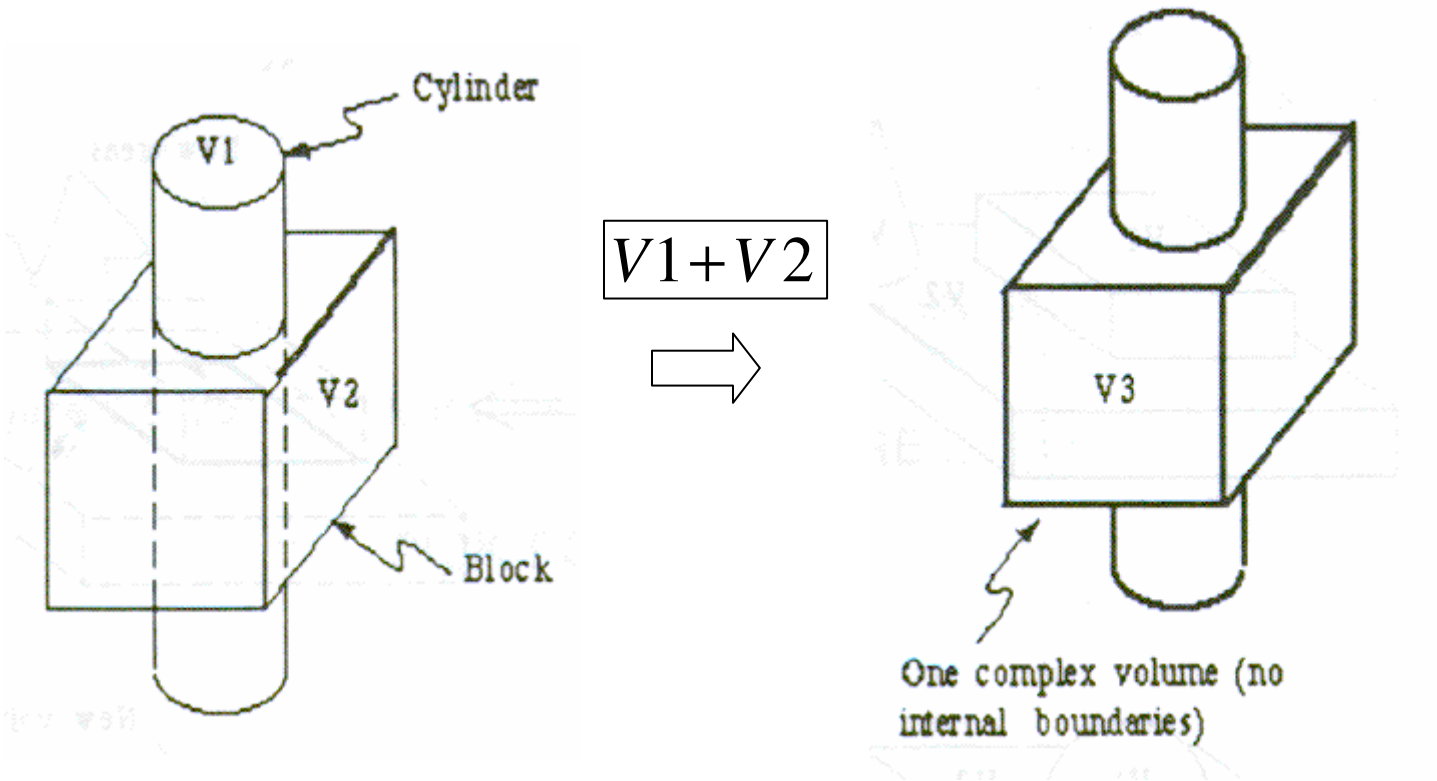
Modelamento Sólido

Operações Booleanas : **Add**



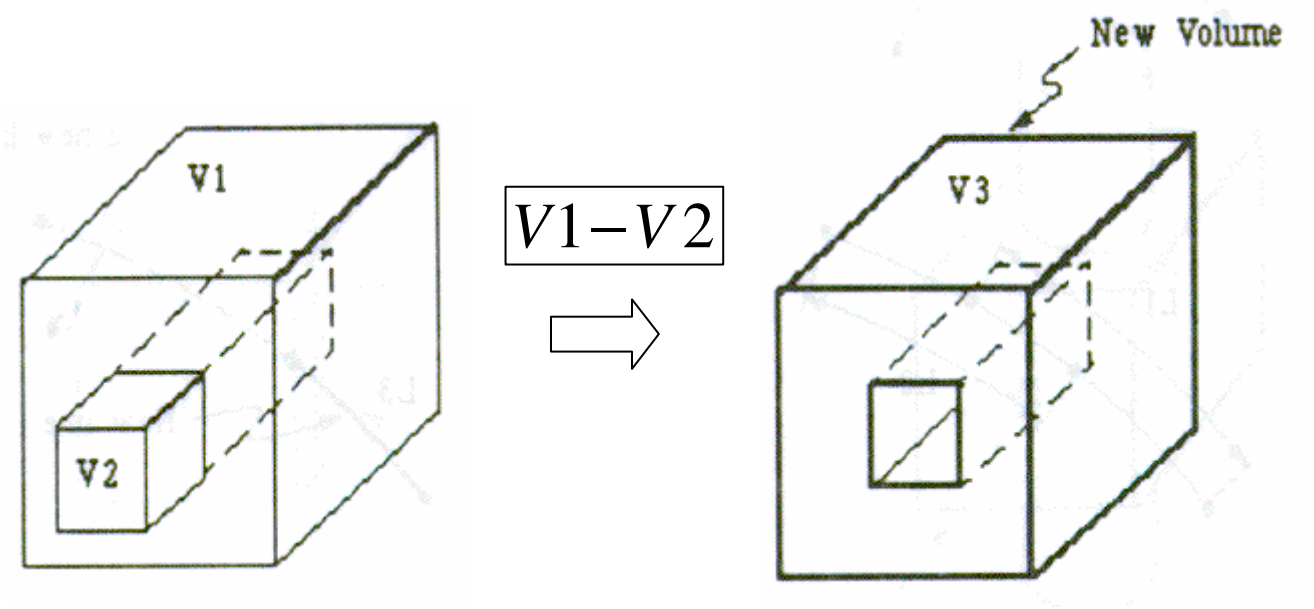
Modelamento Sólido

Operações Booleanas : **Add**



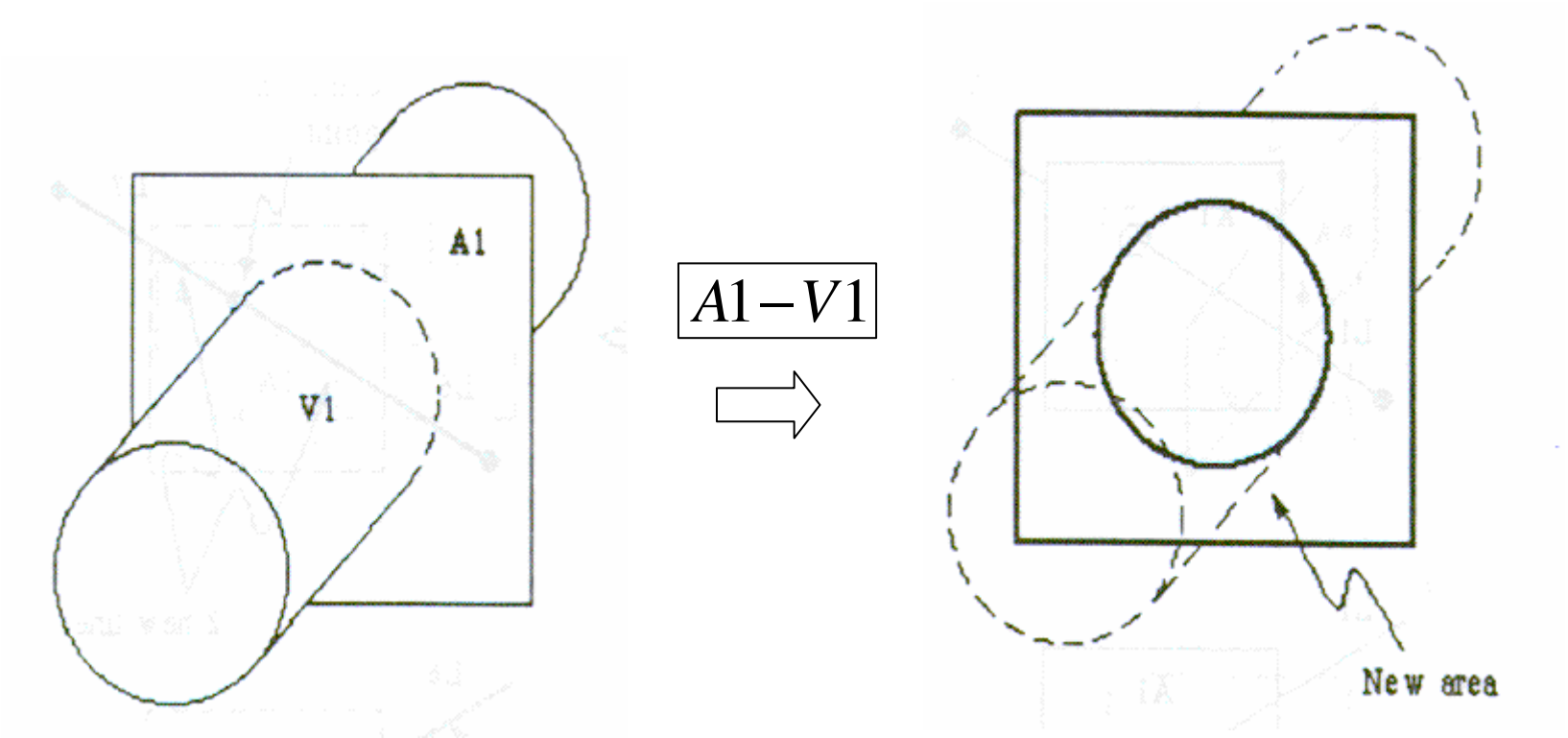
Modelamento Sólido

Operações Booleanas : **Subtract**



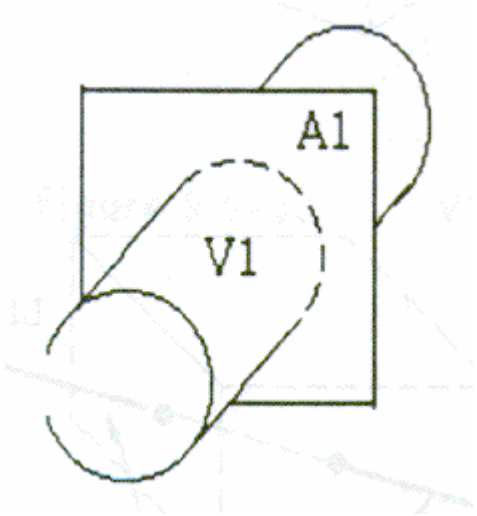
Modelamento Sólido

Operações Booleanas : **Subtract**

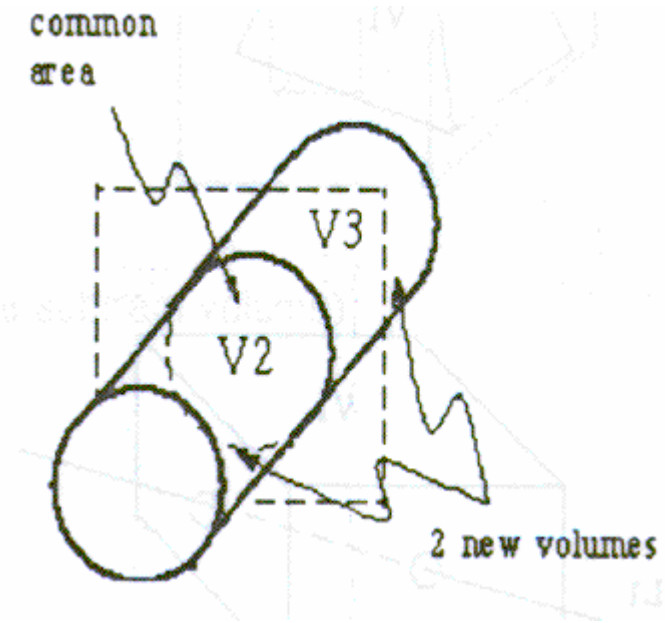


Modelamento Sólido

Operações Booleanas : **Subtract**



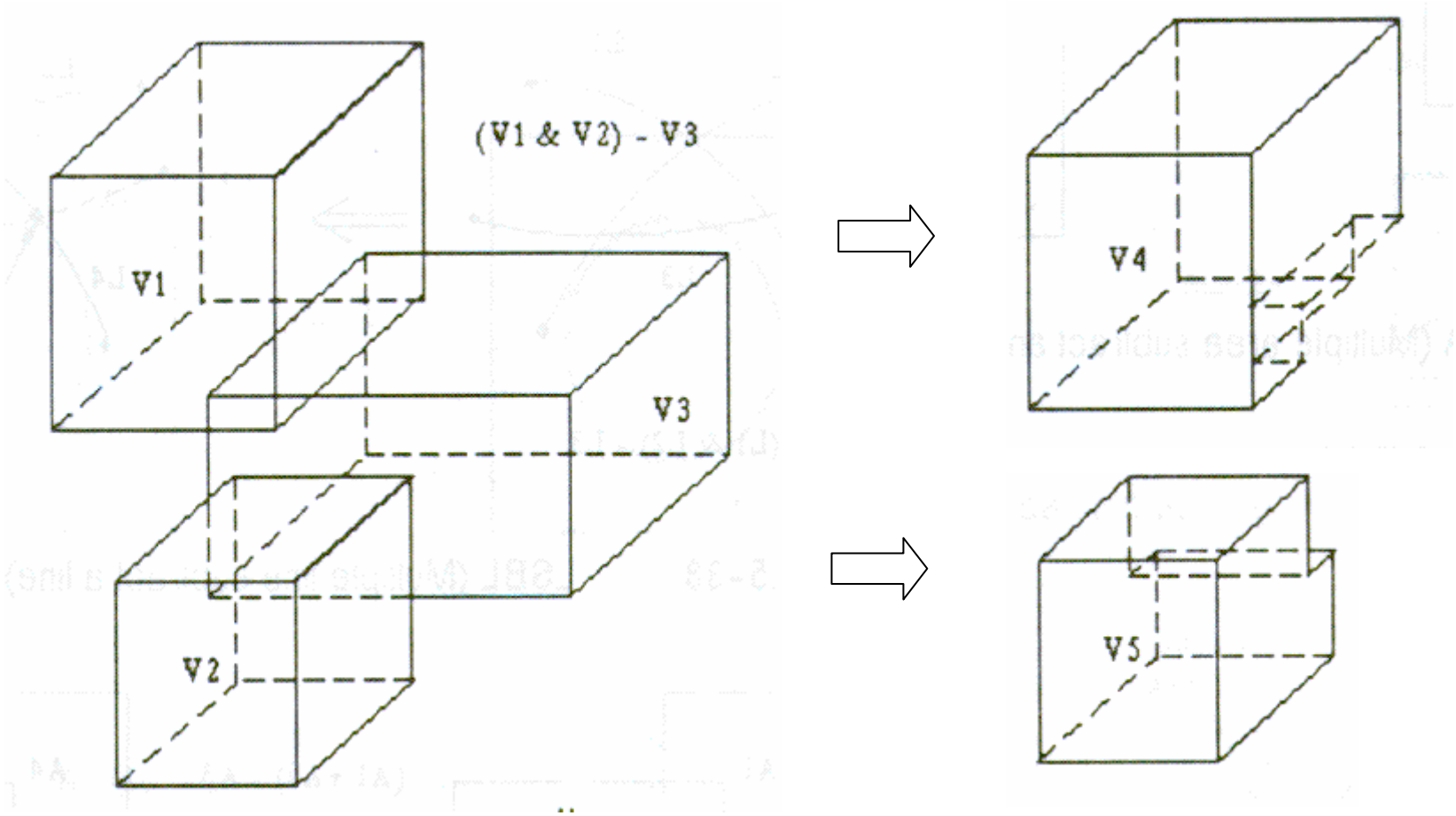
$$V1 - A1$$



Modelamento Sólido

Operações Booleanas : **Subtract**

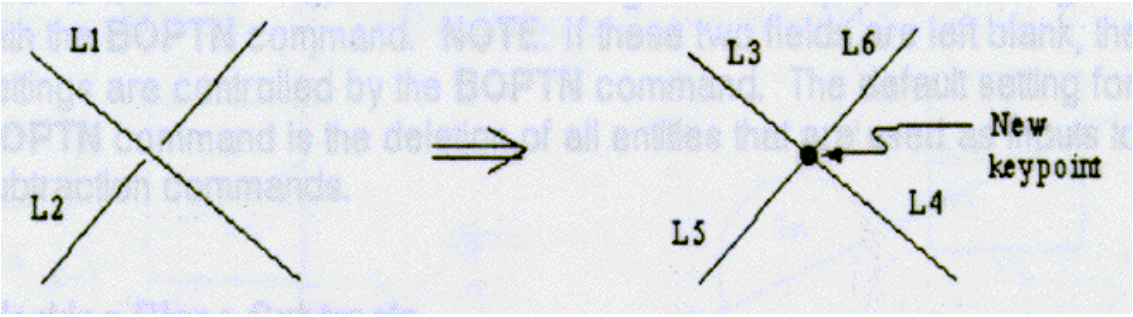
$$(V1 \cup V2) - V3$$



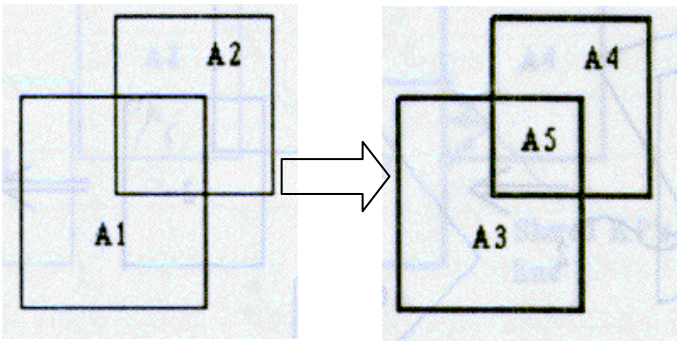
Modelamento Sólido

Outras operações Booleanas :

Classify



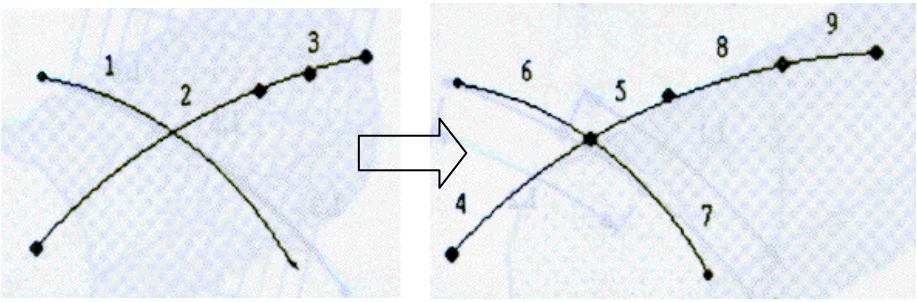
Overlap



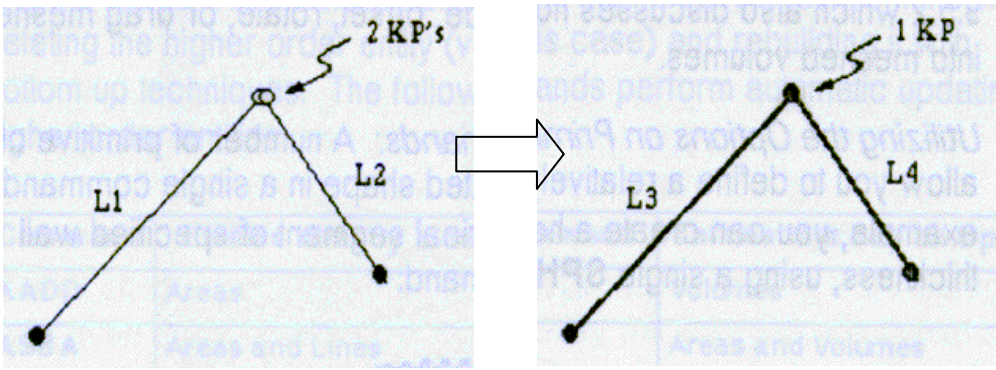
Modelamento Sólido

Outras operações Booleanas :

Partition

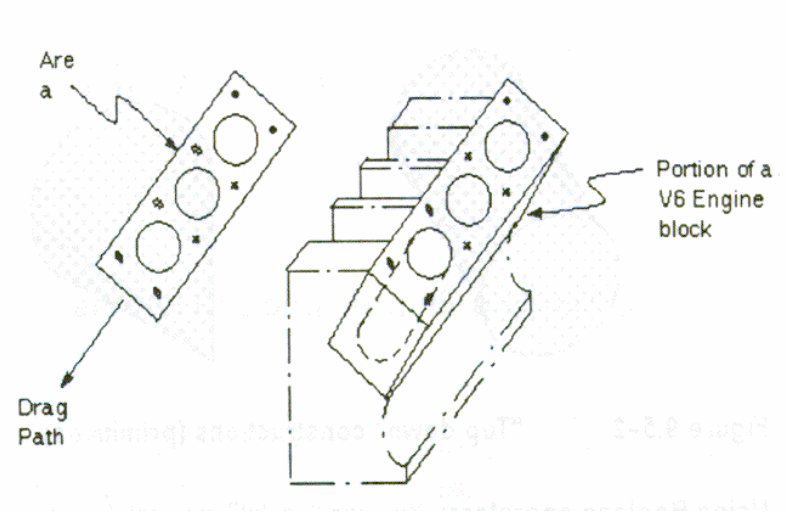


Glue ou **Merge**



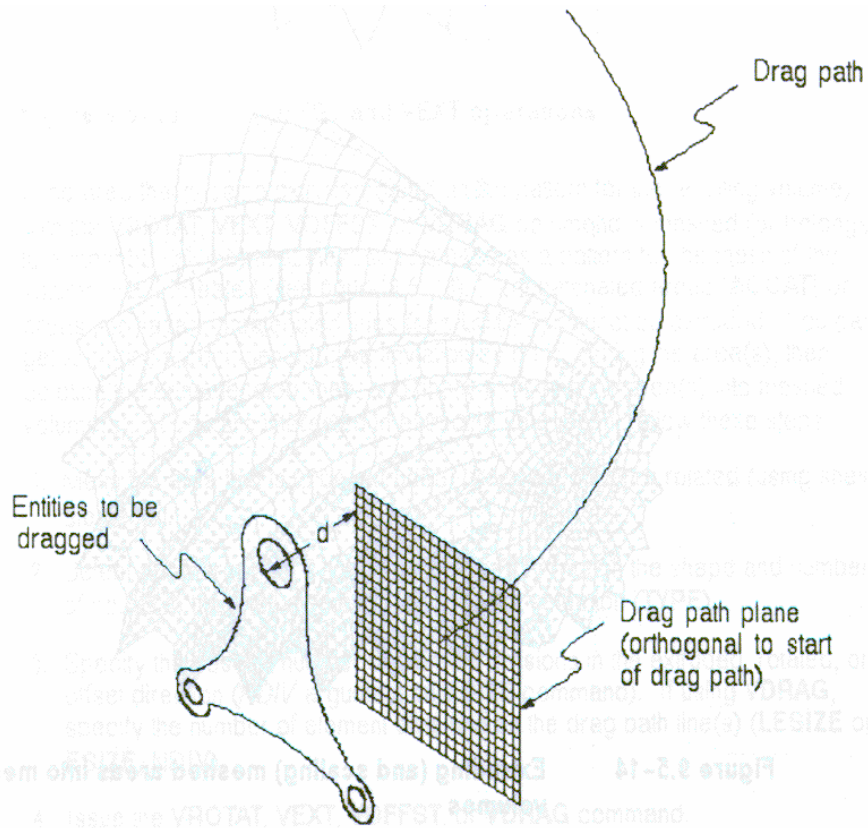
Modelamento Sólido

4º caso) Modo **Extrusão** / **Revolução** (Extrude/Sweep)



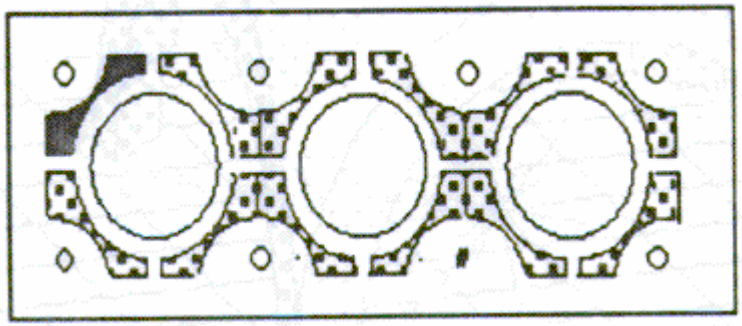
Extrude de Area (obtém-se Volume)

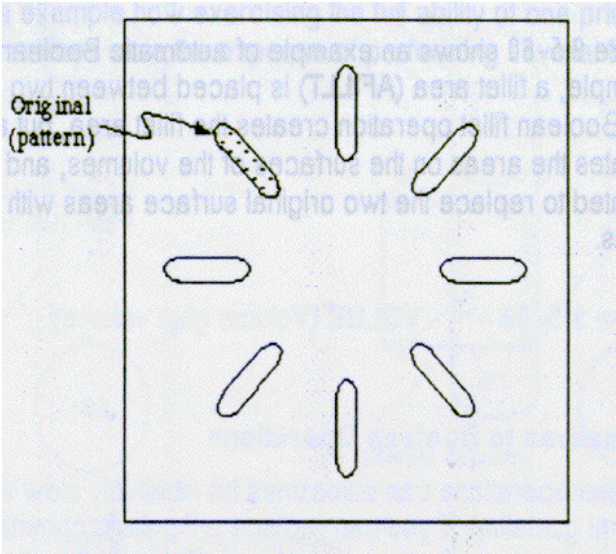
Extrude de Area com malha em um caminho



Modelamento Sólido

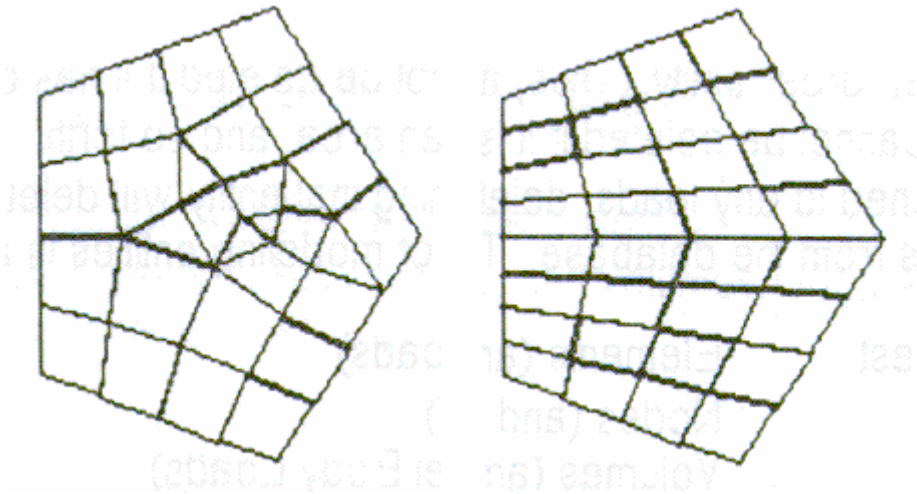
5º caso) Modo **Cópia** (Copy / Move)



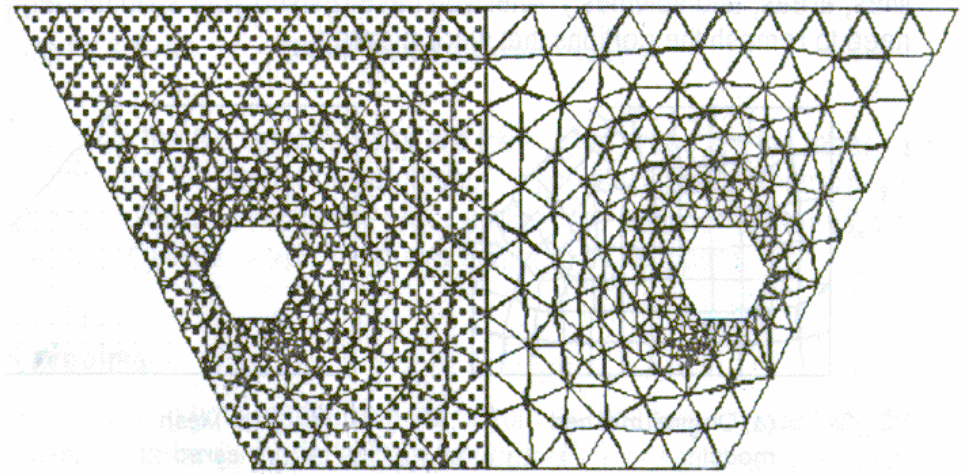


6º caso) Associação de operações citadas com a malha

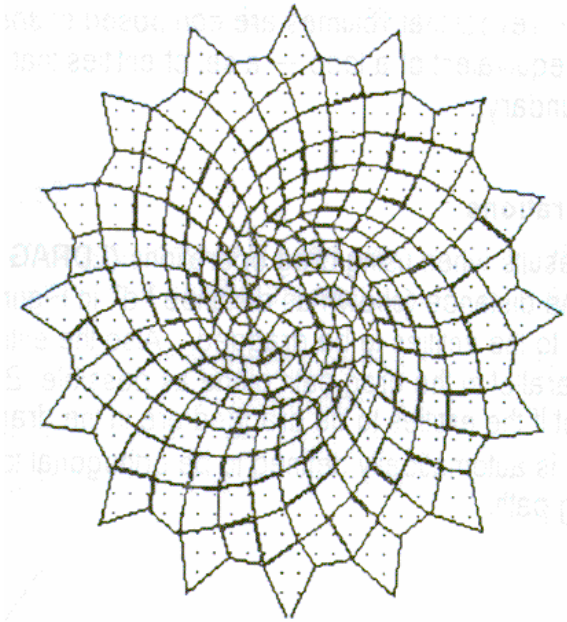
Copy e **Move**

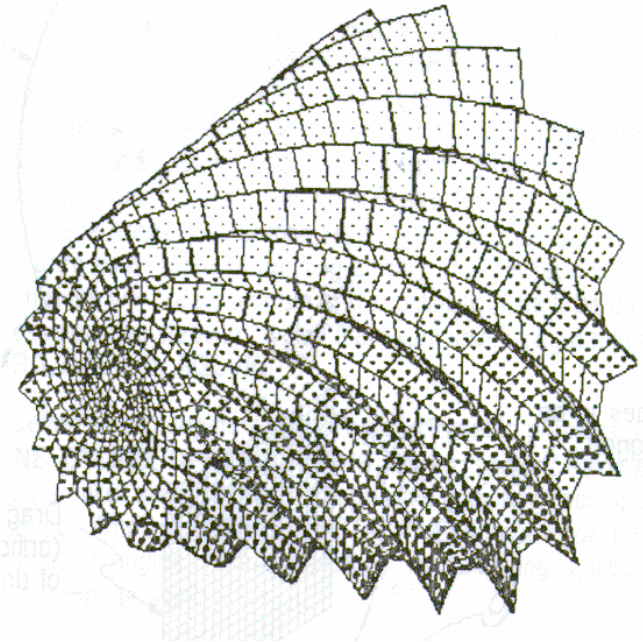


Copy e **Move**



Extrusão com escala aplicada a uma área inicialmente com malha





Atributos da malha Meshing Attributes

Associação das propriedades do material adotado ao elemento escolhido:

- Modelo geométrico
- Constantes reais
- Sistemas de coordenadas
- Propriedades do material

Discretização em Elementos Finitos:

- **Malha livre**
- **Malha mapeada**

Geração da malha Meshing

Malha automática : ferramentas

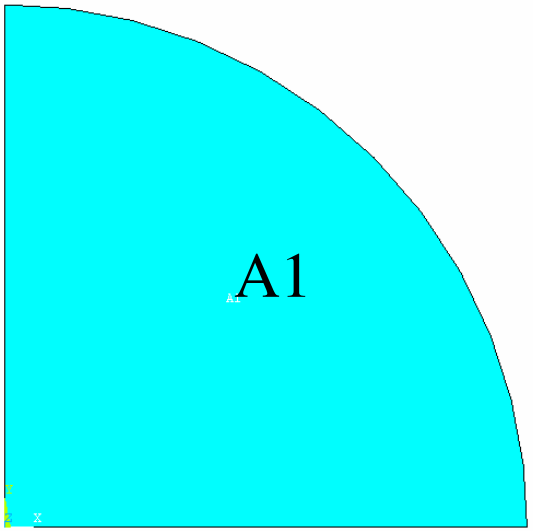
Número de elementos
Tamanho

Comando de exclusão :
CLEAR

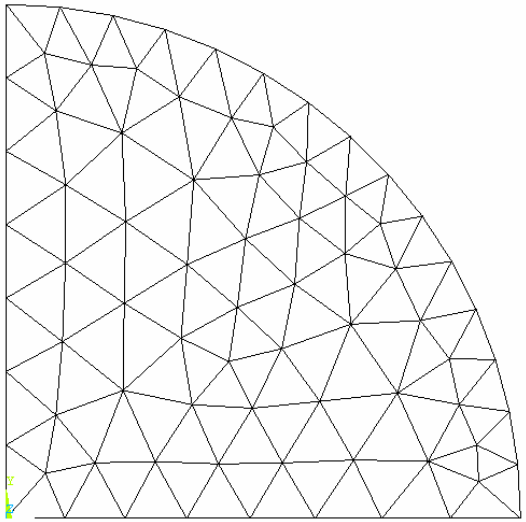
Geração da malha

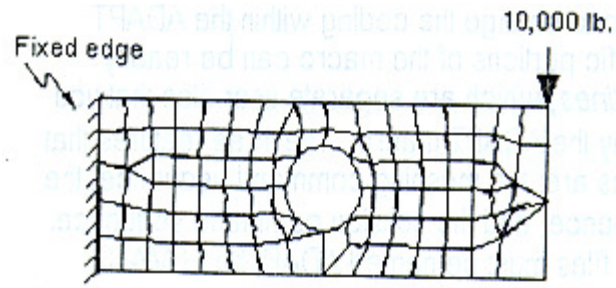
Geometria x Malha automática

Geometria complexa: Malha não homogênea ou regular



Malha livre





Geração da malha

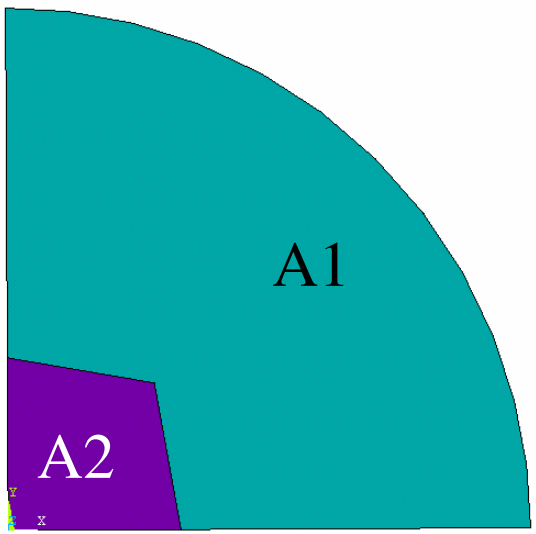
Geometria x Malha

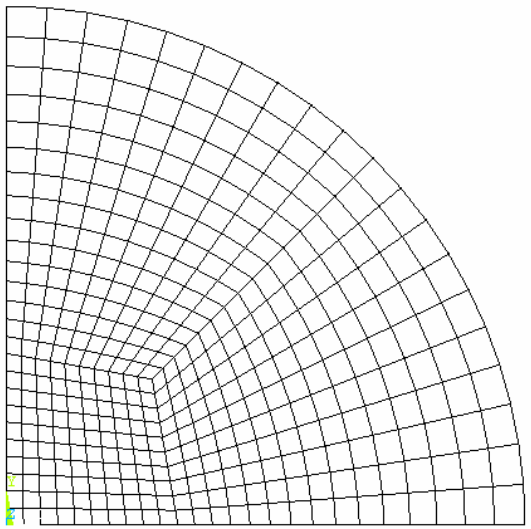
UMA SOLUÇÃO : ⇨ DIVIDIR O DOMÍNIO EM SUB-REGIÕES

Subdividir uma geometria complexa em volumes ou áreas **mais simples**, gerando-se uma malha mapeada em cada volume (área).

Geração da malha

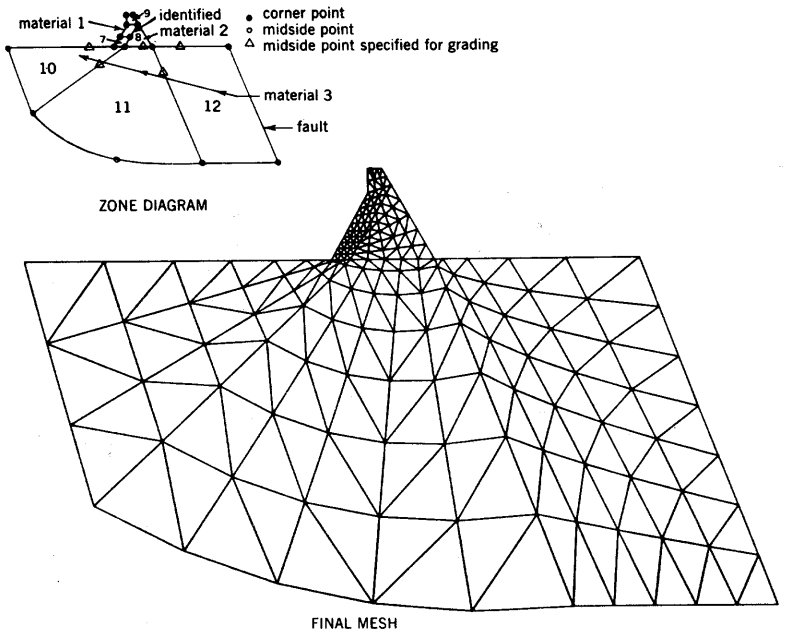
Geometria x Malha mapeada

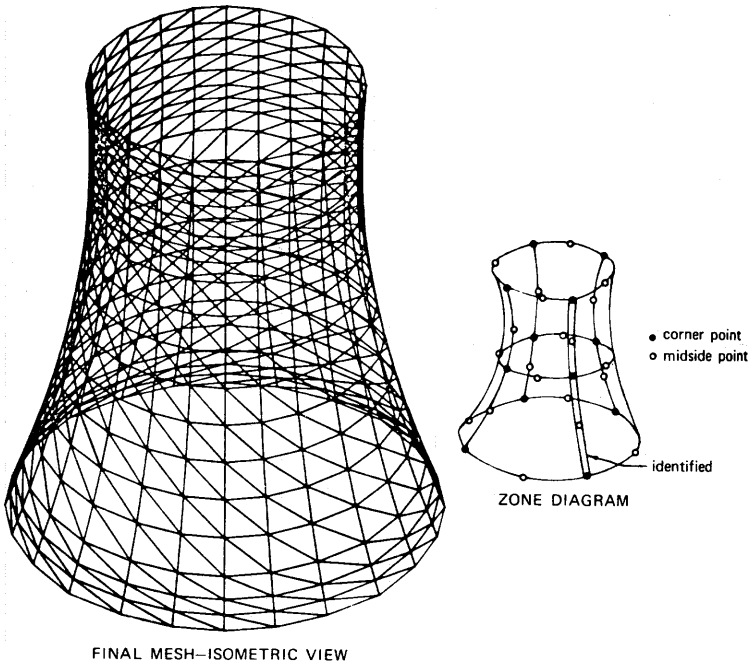




Geração da malha

Geometria x Malha mapeada





Geração da malha

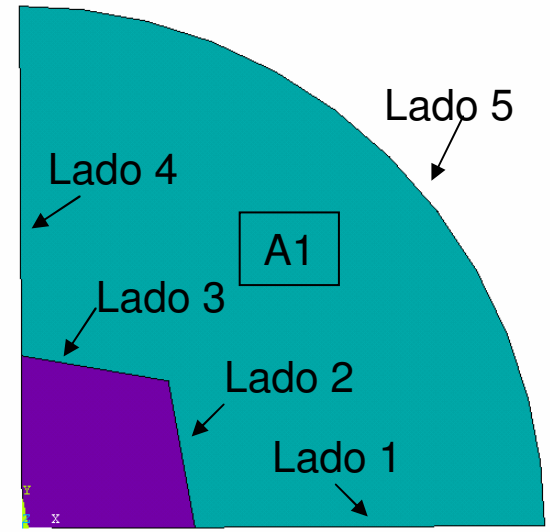
Geometria x Malha mapeada

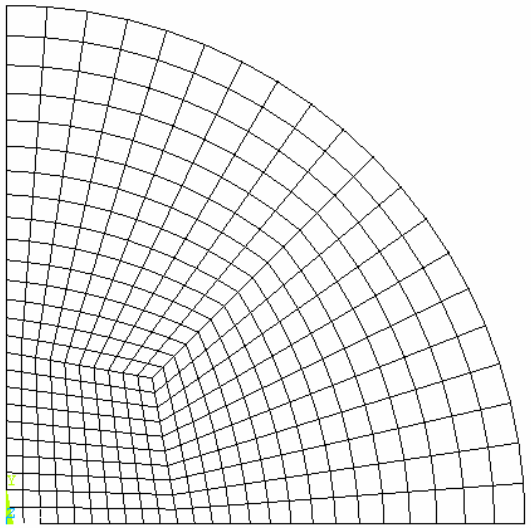
Requisitos para mapeamento de malha :

- Escolha e atribuição do elemento
- Efetuar as divisões do domínio em sub-domínios, se necessário
- Definir área ou volume a ser mapeado
- Definir a quantidade de divisões das figuras geométricas que limitam a área ou o volume
- Verificar a **compatibilidade** para a malha

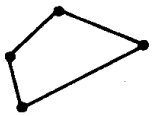
Geração da malha

Geometria x Malha mapeada



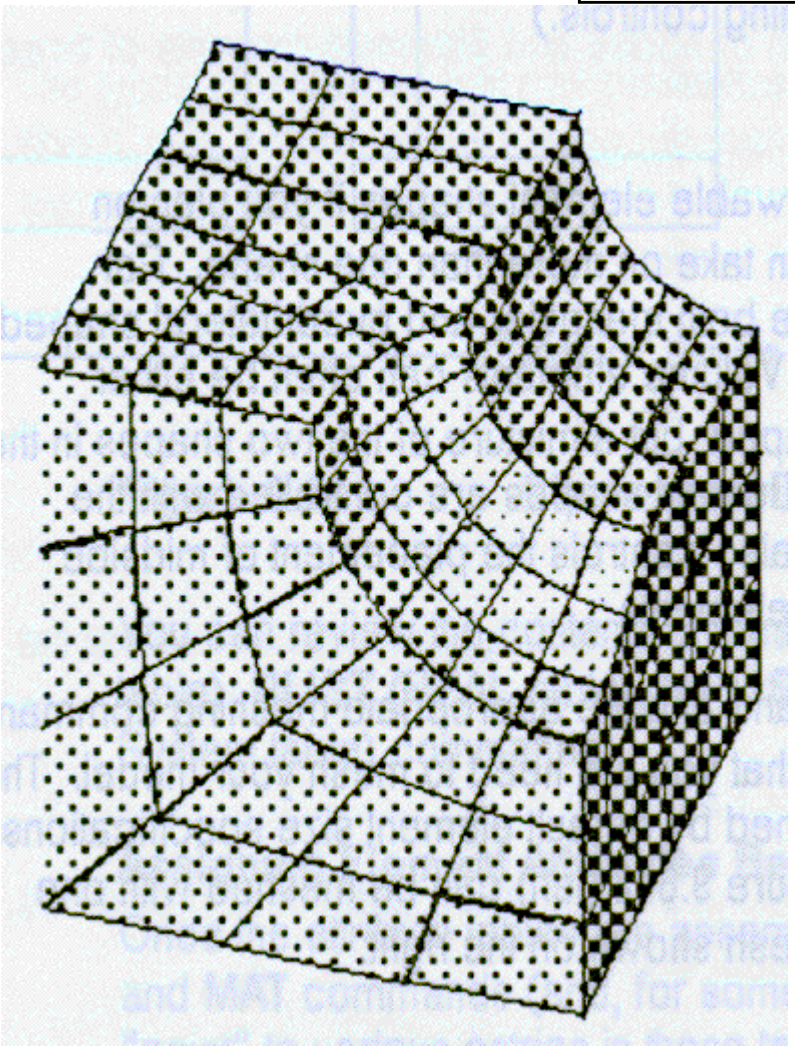


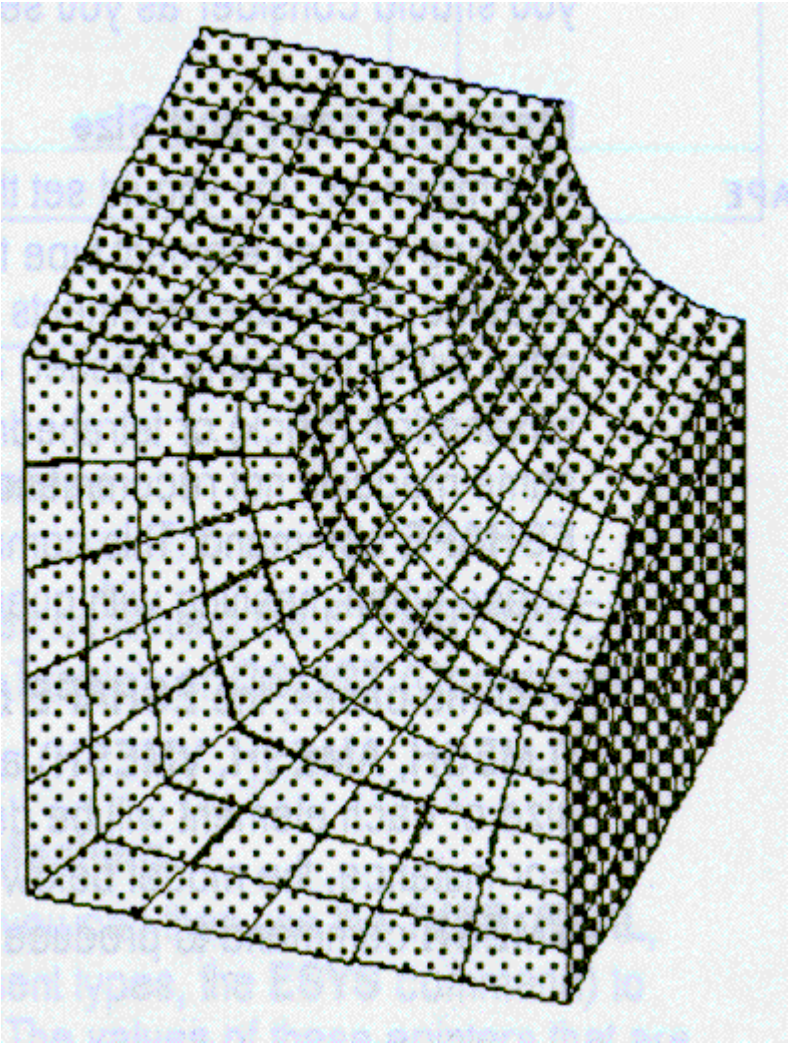
Utilizando-se elementos SHELL :



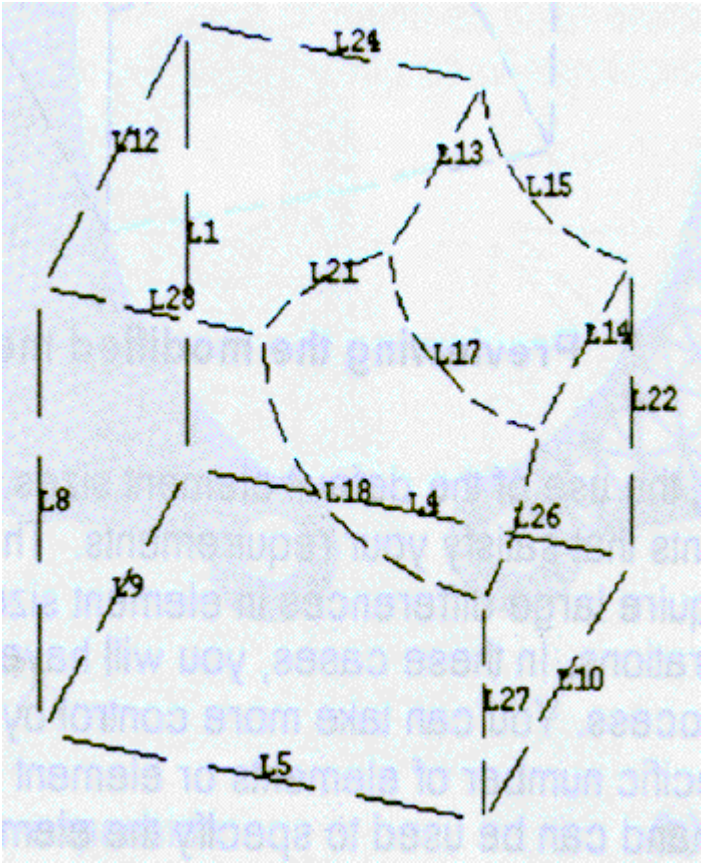
Malha para área A2 : OK, pois esta tem 4 linhas.
Para a malha A1, **concatenar** lados 2 e 3

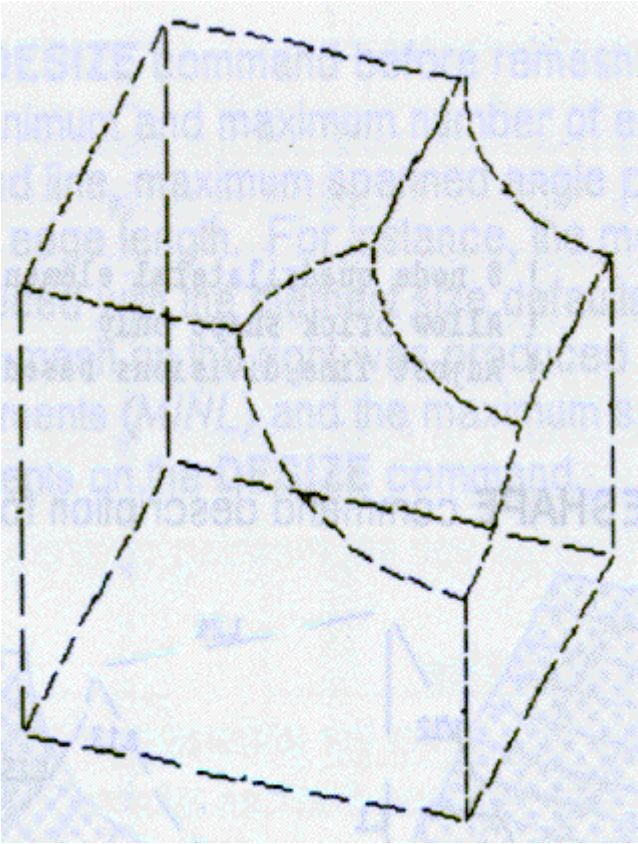
Geração da malha



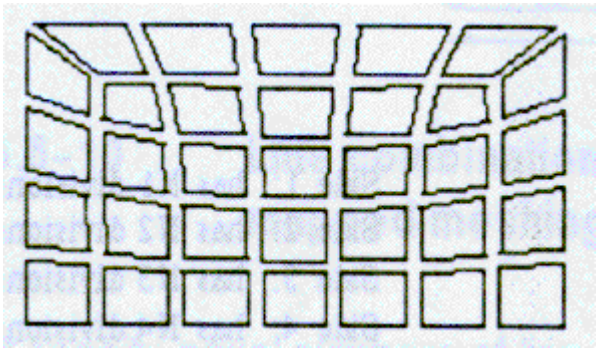


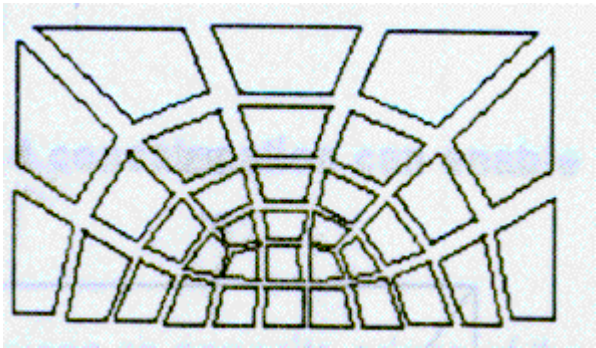
Geração da malha

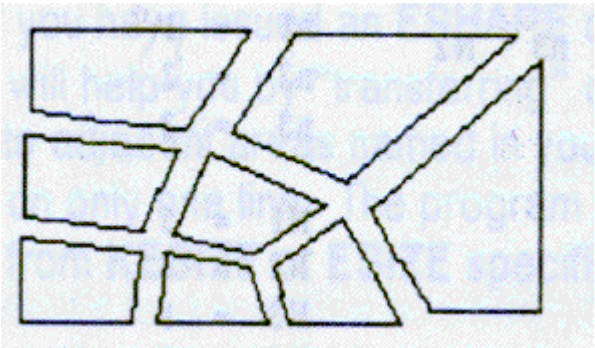


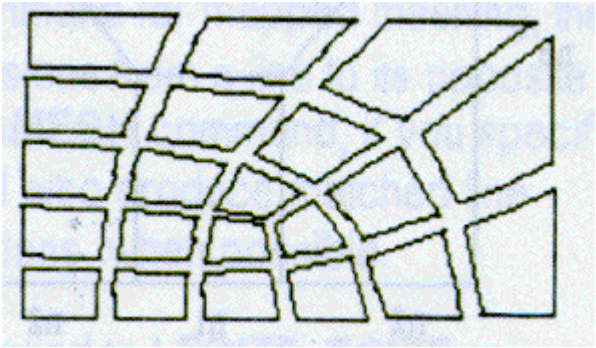


Geração da malha

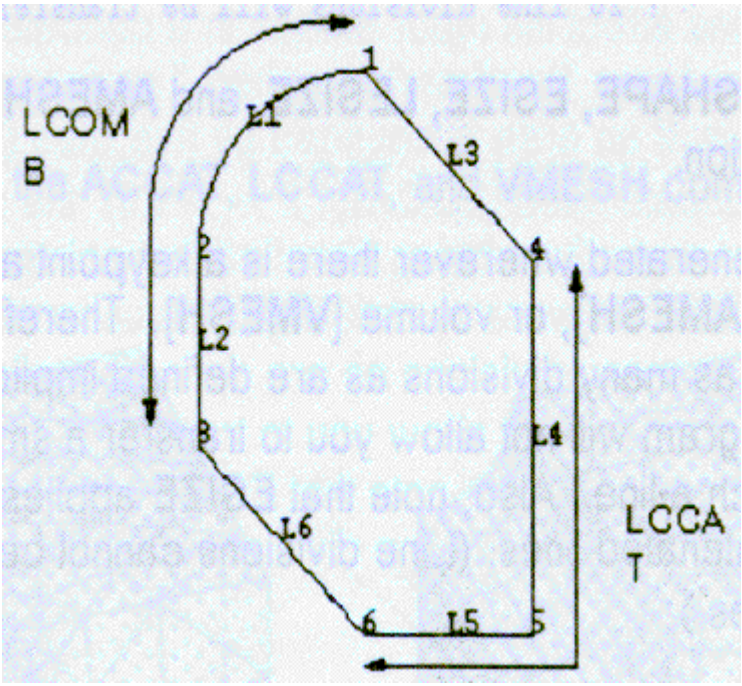


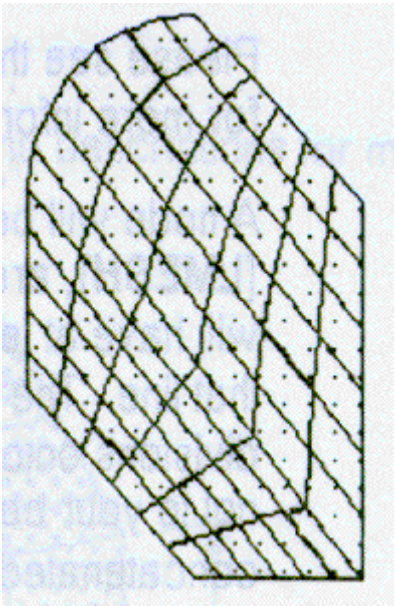






Geração da malha

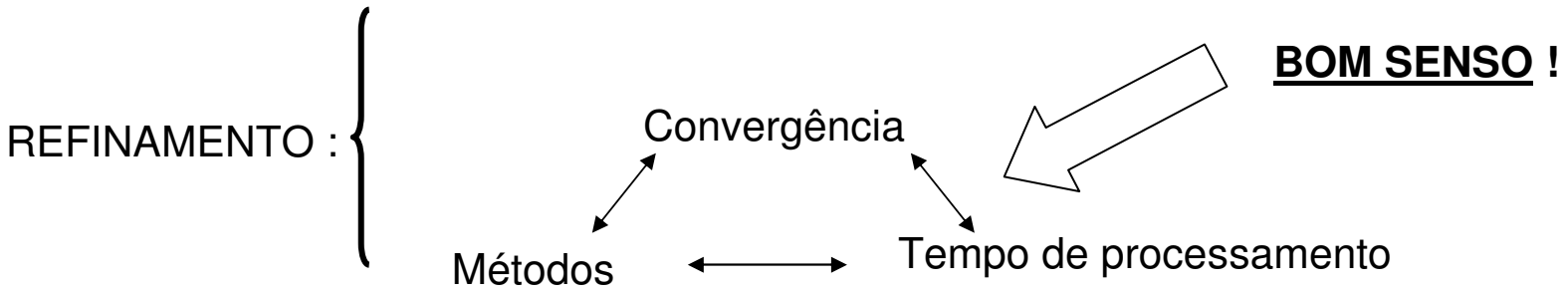




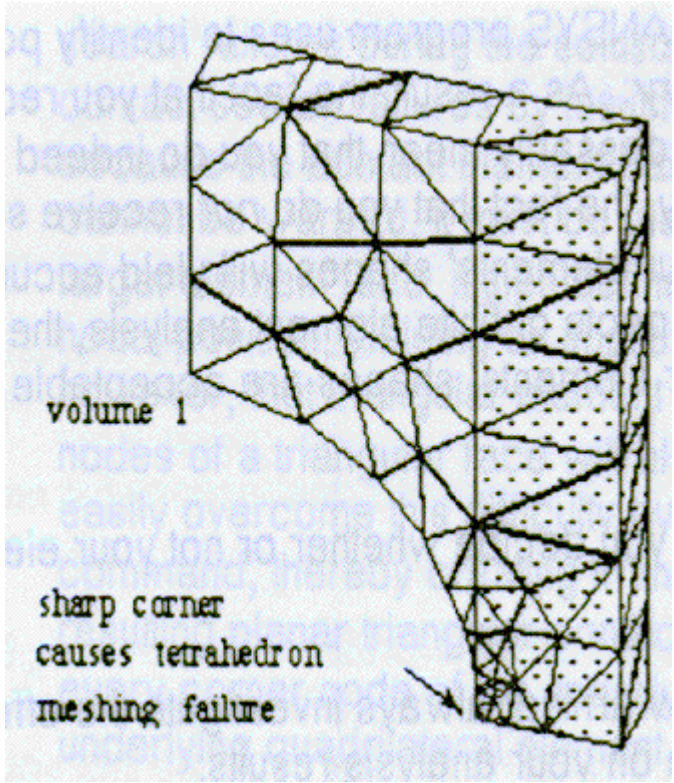
Geração da malha

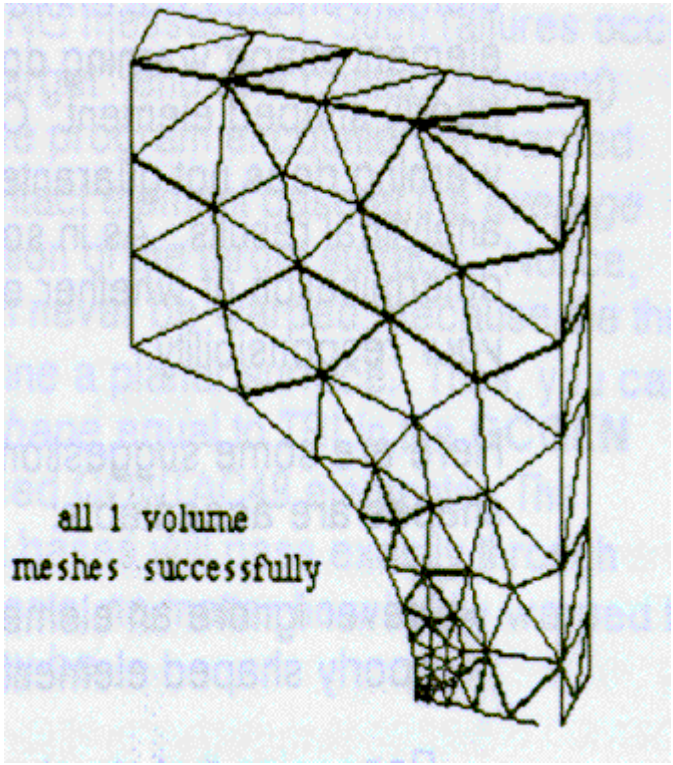
Escolha dos tipos de Elementos : Critérios

- Uniformidade da malha conforme o gradiente de uma determinada variável : malha mais fina em regiões de maiores gradientes
- Localização de nós e limites do elemento em regiões onde há ações externas (forças e pressões) ou em regiões de mudanças abruptas no domínio
- Utilização de mais elementos em regiões irregulares do que nas regiões regulares
- Discretizar o domínio de forma que o elemento tenha suas dimensões bem balanceadas
- Evitar elementos excessivamente distorcidos (solução incorreta)
- Ideal : Proporcionalidade de dimensões do elementos de acordo com o gradiente das propriedades no local (aspecto desconhecido)
- Uma estratégia : utilizar-se inicialmente elementos bem balanceados, com malha grosseira e depois: refinamento

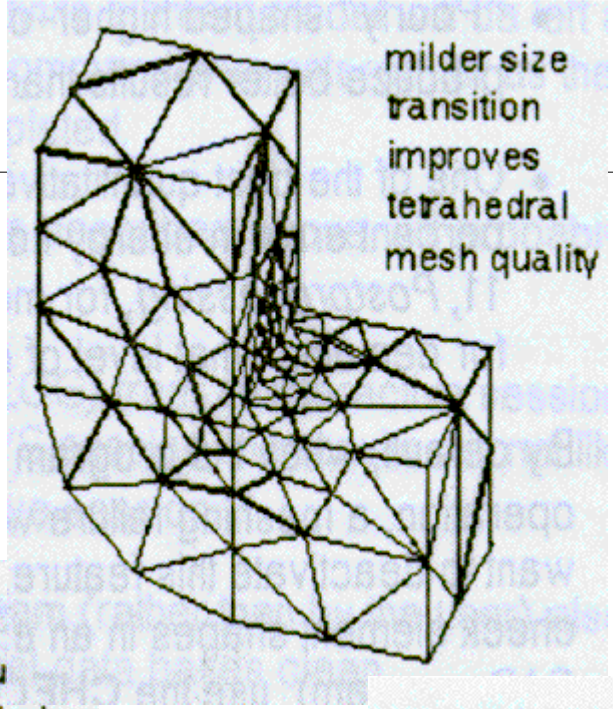


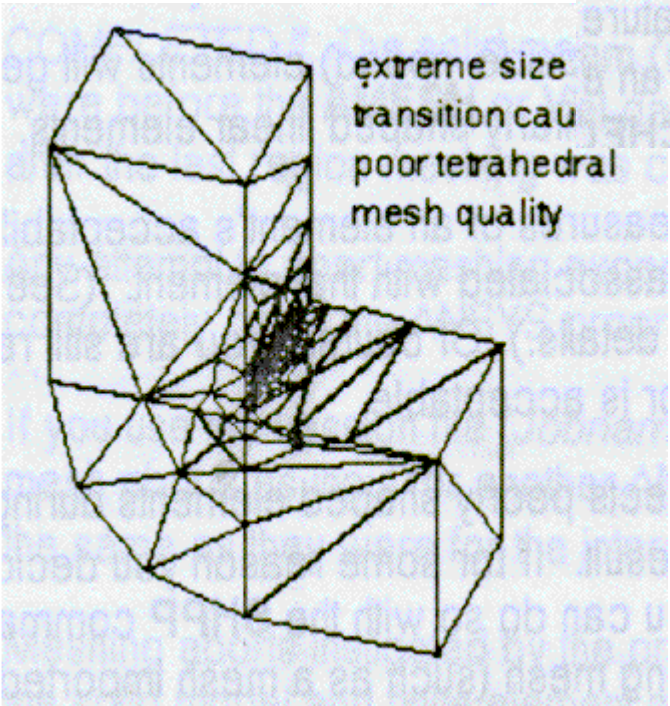
Geração da malha

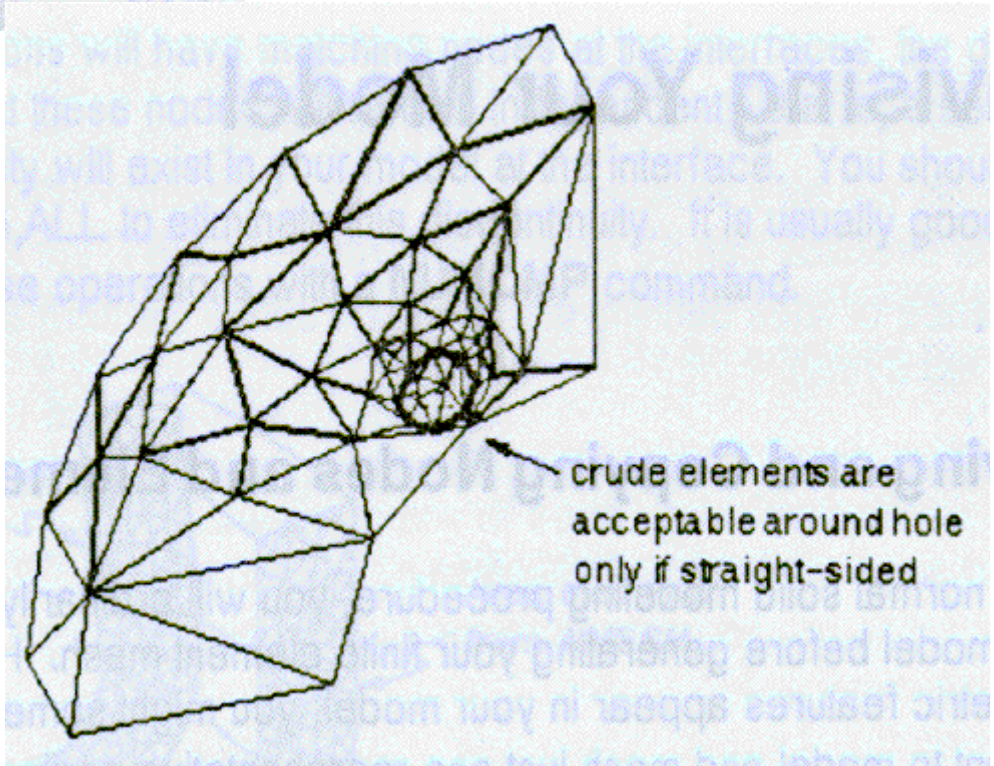




Geração da malha







Geração da malha

Malhas adaptativas

Teoria relativa :

- Técnica para determinar-se uma densidade apropriada da malha (acceptable energy error estimate criteria)
- Requer-se o **modelamento sólido** conveniente
- Padrão para análise estática linear e análise térmica

Geração da malha

Malhas adaptativas

- Tipos de elementos aceitos em malhas adaptativas - exemplos :

2-D Structural Solids :

PLANE2	2-D 6-Node Triangular Solid

3-D Structural Solids :

SOLID45	3-D 8-Node Isoparametric Solid

3-D Structural Shells :

SHELL43	Plastic Quadrilateral Shell

2-D Thermal Solids :

PLANE35	2-D 6-Node Triangular Solid

Geração da malha

Malhas adaptativas

- Procedimentos : definição do elemento e do material, modelamento sólido, especificação das áreas e volumes que terão malhas (sem mapeamento) , definição dos vínculos e carregamentos; execução da macro ADAPT

- Comando prompt : comando **adapt**

- Macro ADAPT : tamanho do elemento, gera a malha, executa a solução, estima erros, realiza iterações até que o valor exigido de erro seja alcançado, com verificação do formato dos elementos.

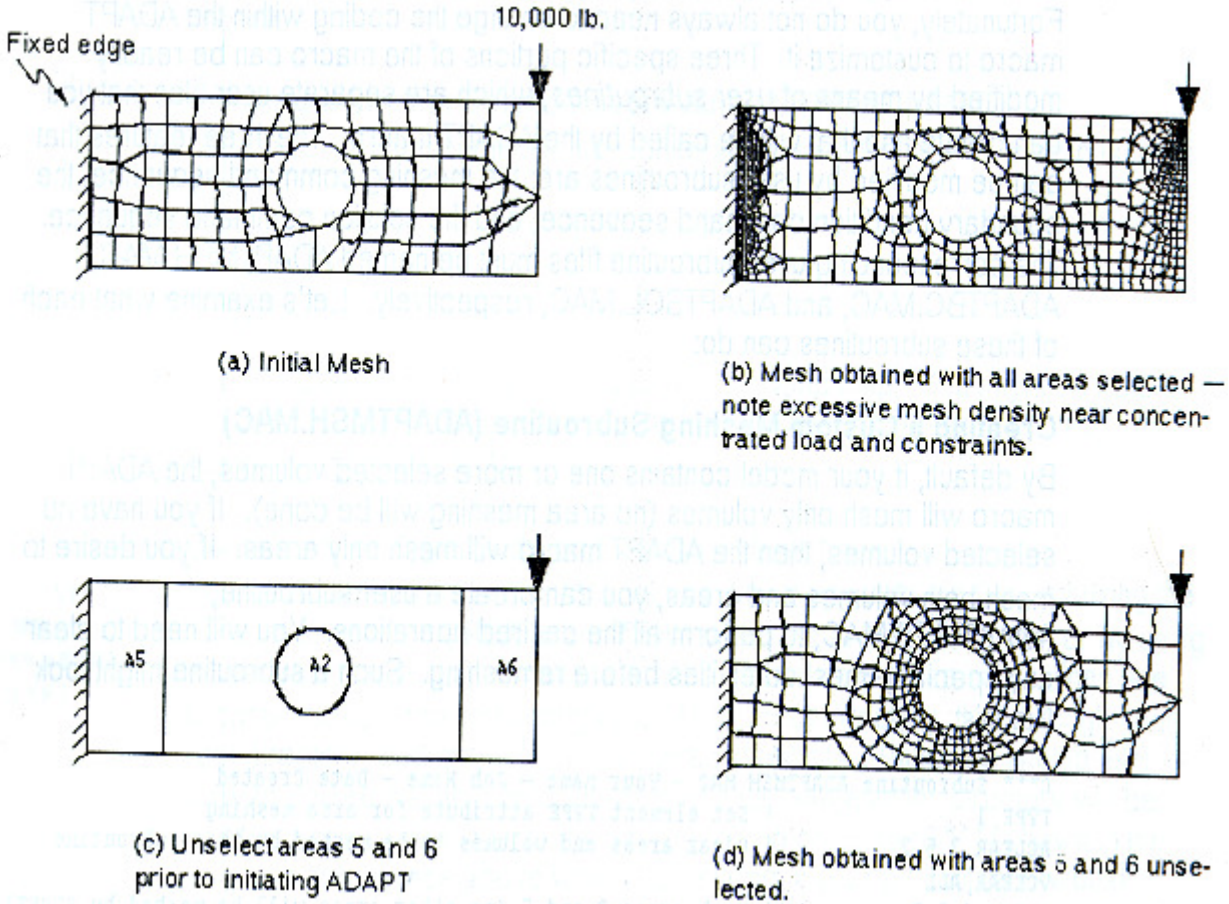
- Opções : Adaptatividade seletiva (evitar regiões contendo singularidades)

Geração da malha

Orientações para malhas adaptativas :

- Não é necessário especificar-se o tamanho de elemento, embora isto possa auxiliar na convergência.
- Elementos com nó central poderão ter desempenho melhor que elementos lineares no processo de adaptatividade
- Evitar singularidades (cargas concentradas substituídas por pressão em pequena área ou sua região excluída devido à adaptatividade seletiva
- Simplificação da região a ter malha adaptativa

Geração da malha



(a) Initial Mesh

(b) Mesh obtained with all areas selected — note excessive mesh density near concentrated load and constraints.

(c) Unselect areas 5 and 6 prior to initiating ADAPT

(d) Mesh obtained with areas 5 and 6 unselected.