

Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

Comissão de Inspeção de Equipamentos

**Workshop: Teste Hidrostático em Equipamentos,
Tubulações e Dutos**

**Teste Hidrostático
Comentários Técnicos**

**Autor: Guilherme Victor P. Donato
PETROBRAS/CENPES/PDP/TMEC
donato@petrobras.com.br**

Conteúdo:

Objetivo;

1 – Tipos de Tensões Atuantes em um Vaso de Pressão;

2 – Funções do Teste Hidrostático;

3 – Comportamento à Fratura de

Descontinuidades com Característica Planar;

4 – Códigos de Inspeção;

5 – Conclusões;

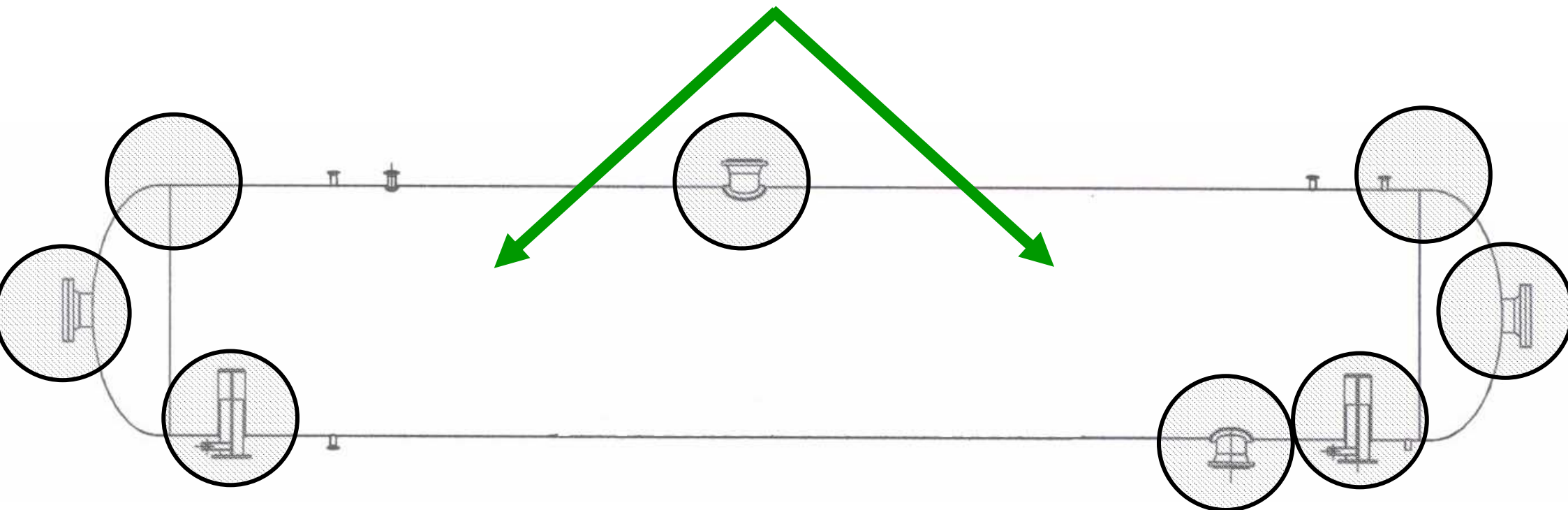
6 – Recomendações

- Discutir aspectos relacionados ao comportamento de tensões e deformações em vasos de pressão;
- Avaliar o nível de tensões em regiões de mudanças geométricas;
- Apresentar características representativas de fraturas frágil e dúctil;
- Propor recomendações de estudos futuros

1 - TIPOS DE TENSÕES ATUANTES EM UM VASO DE PRESSÃO



Tensões Generalizadas Primárias



● **Tensões Localizadas Primárias + Secundárias**

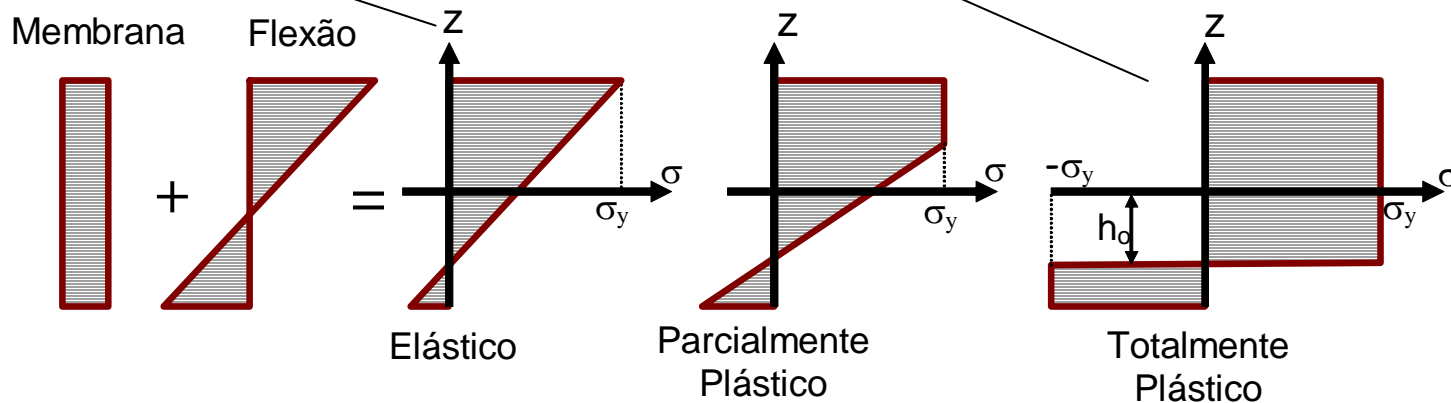
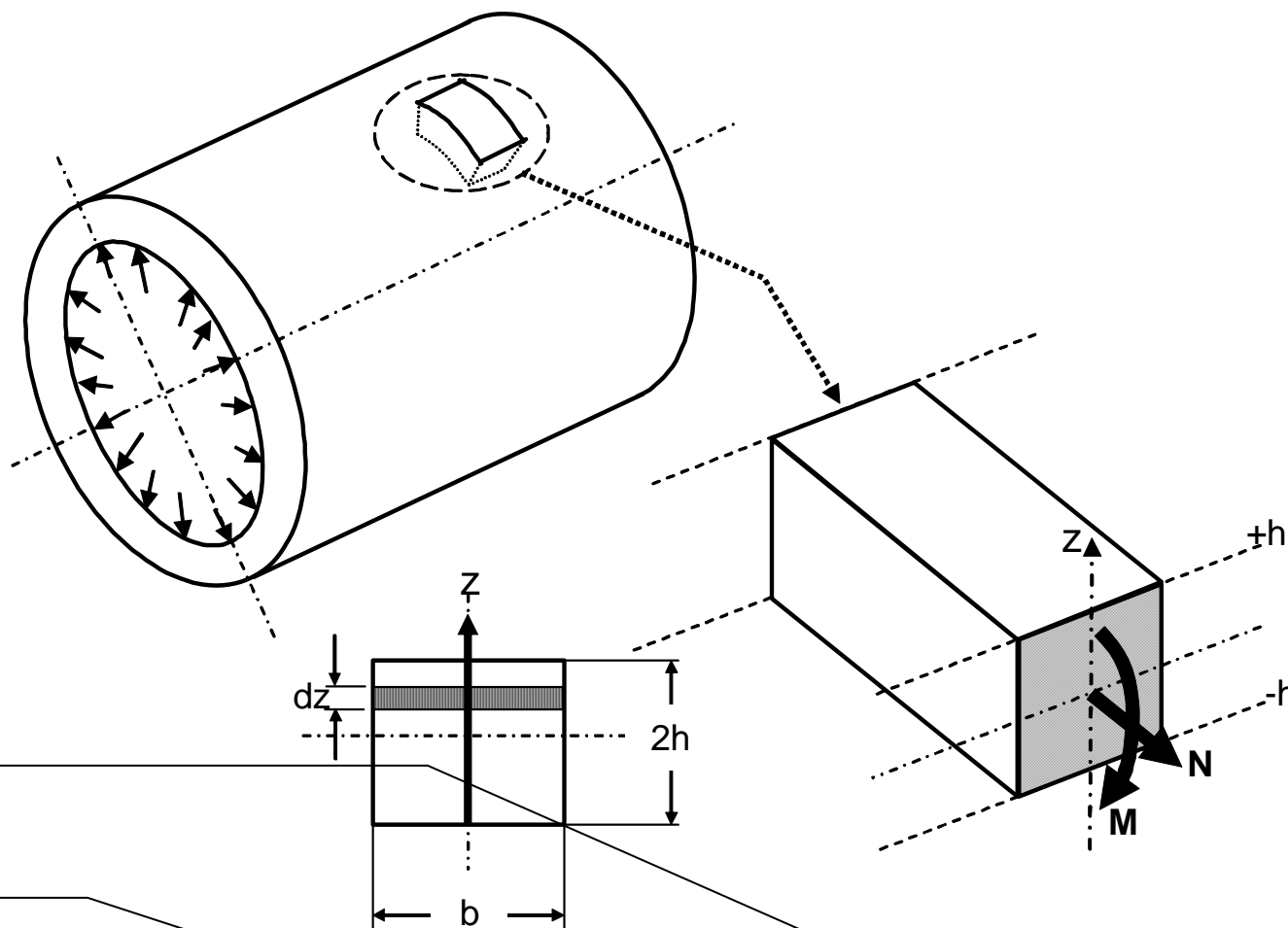
- São as tensões necessárias para satisfazer as leis de equilíbrio da estrutura, desenvolvidas pela ação de carregamentos impostos.
- Sua principal característica é de que não é auto-limitante, ou seja, enquanto o carregamento estiver sendo aplicado a tensão continua atuando, não sendo aliviada por deformações da estrutura.
- Como exemplo temos as tensões de membrana circunferenciais e longitudinais em vasos cilíndricos submetidos ao carregamento de pressão interna.

- Se aumentarmos a pressão interna do vaso sem limite, o equipamento irá falhar por tensões primárias com deformações plásticas excessivas;
- Similar a um teste de tração no material;
- Normalmente romperá na direção longitudinal do costado cilíndrico.

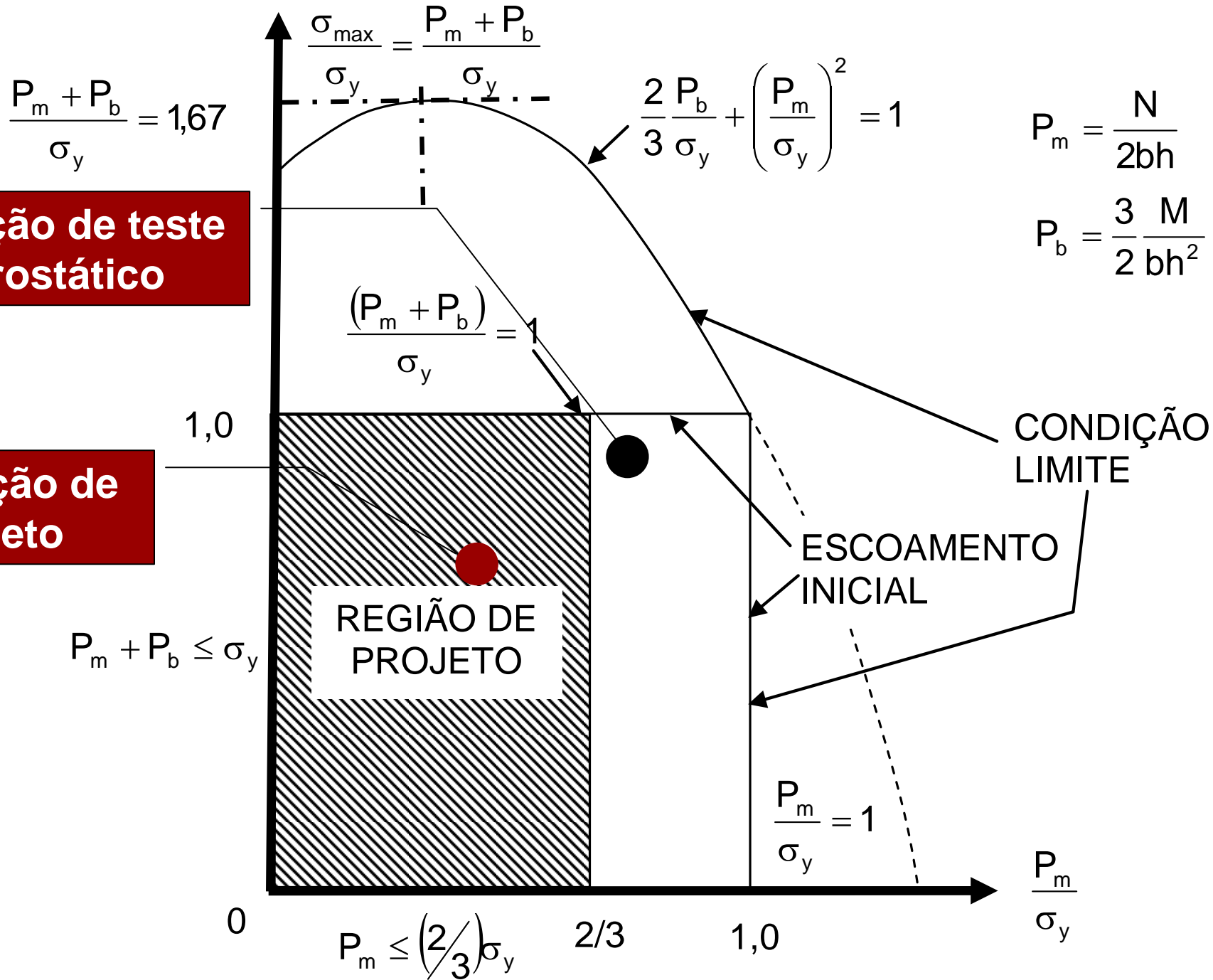
Critério de Dimensionamento:
Escoamento inicial da fibra mais solicitada.

Rótula plástica

Critério de dimensionamento



- Nenhum ponto do equipamento em operação será submetido a **tensões primárias** superiores ao limite de escoamento mínimo do material;
- Durante o teste hidrostático a **tensão de membrana primária máxima** é limitada a uma fração do limite de escoamento mínimo do material (80% a 90%);
- Em resumo, todo o costado do equipamento, em regiões de **tensões primárias generalizadas**, trabalha em regime puramente elástico.





Condição de teste hidrostático

Condição de projeto

- **Código ASME (conservadorismo):**
- 1. Dimensionamento para o escoamento inicial da fibra mais solicitada enquanto que a falha ocorre com a formação da rótula plástica;
- 2. Não considera a reserva do material em função do encruamento;

Código ASME (conservadorismo):

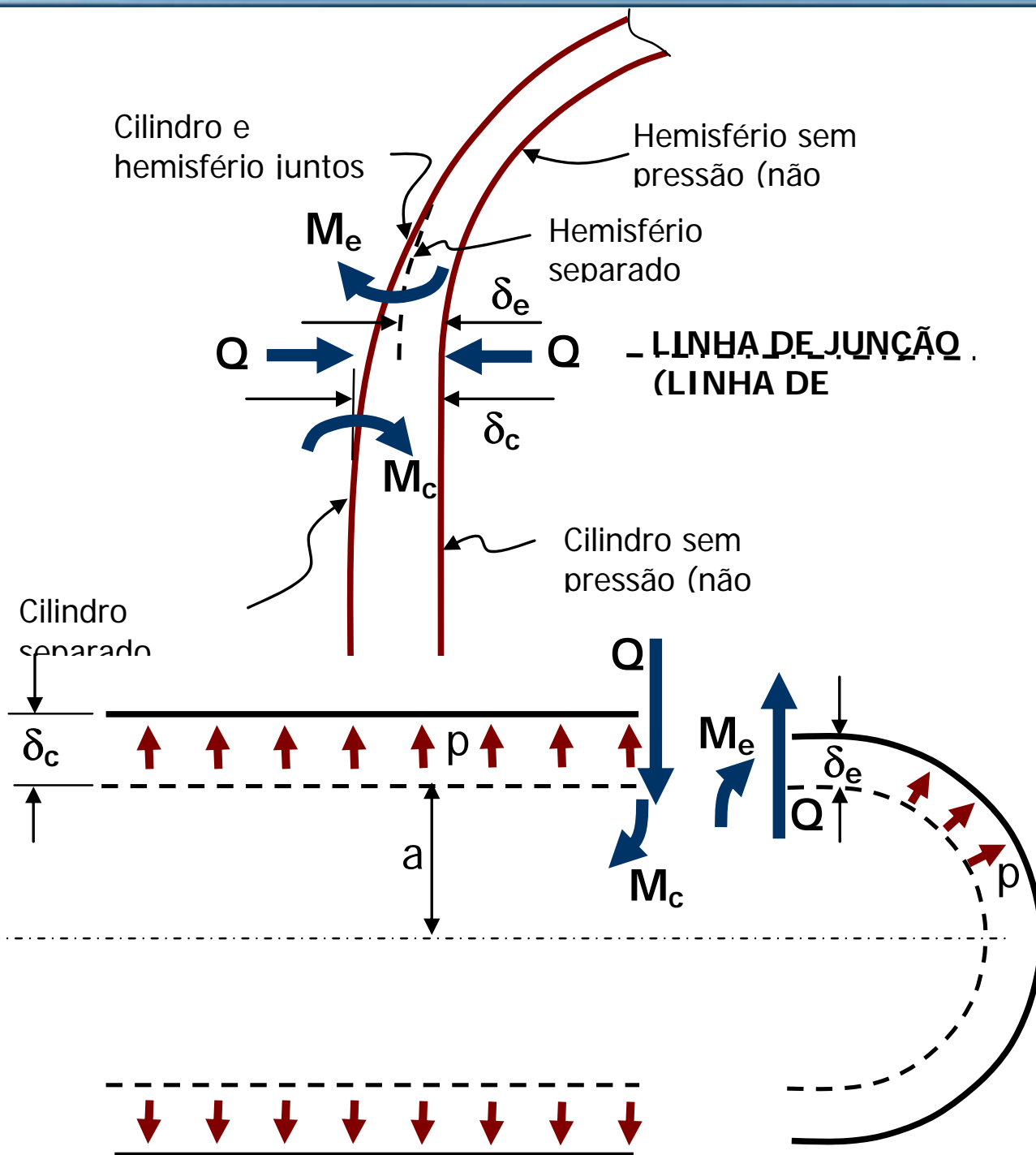
-  3. Tensão admissível é definida como o menor valor entre $S_y/1,5$ ou $S_u/3,5$ (ASME Seção VIII – Divisão 1 – Edição atual), no entanto, decorrente dos mecanismos de falha de um vaso de pressão, poderia ser definida como sendo $S_y/1,5$;
-  O material real possui propriedades mecânicas superiores aos valores mínimos definidos nas tabelas do código para a especificação do material (> 20%).

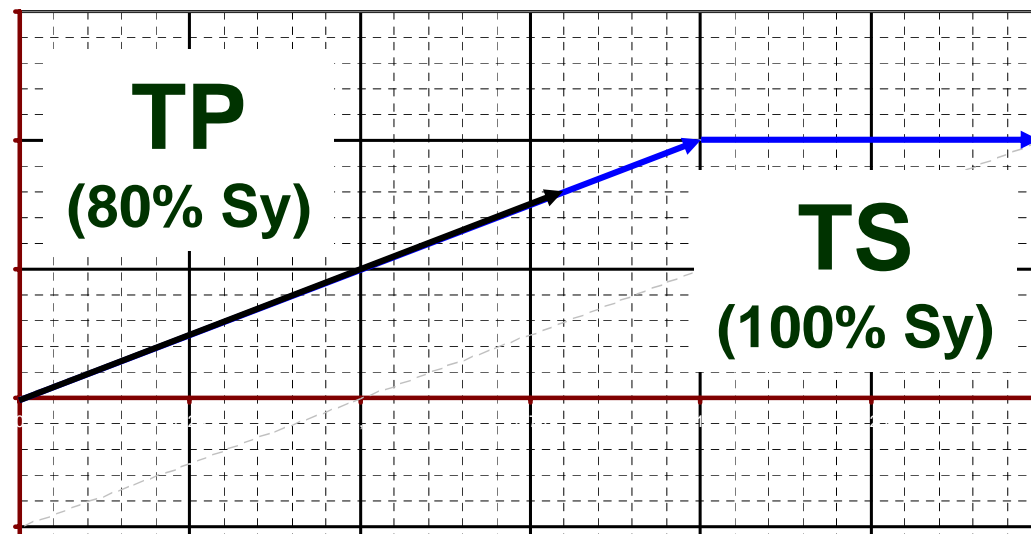
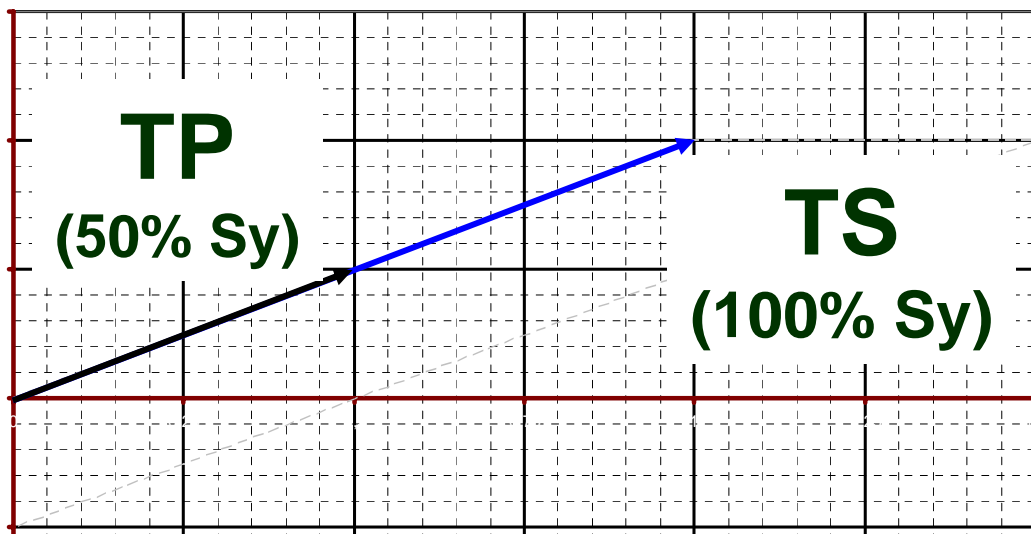
- **Código ASME (conservadorismo):**
- Um vaso ASME Seção VIII – Divisão 1, antes de 1988, projetado para uma pressão de 20,0 kgf/cm², **sem descontinuidades relevantes**, irá falhar (perder capacidade de contenção) em uma pressão entre 60,0 e 80,0 kgf/cm²;
- Com uma pressão bastante inferior à pressão de falha, o vaso já perde sua função (deformações permanentes visíveis), mas mantem o fluido sob contenção;

- **Código ASME (conservadorismo):**
- Se houver uma descontinuidade relevante no material, o vaso projetado para $20,0 \text{ kgf/cm}^2$, poderá falhar quando alcançar $10,0 \text{ kgf/cm}^2$, por exemplo;
- Descontinuidades com característica planar localizadas em regiões de tensões primárias irão evoluir e **normalmente** para a falha, desde que as dimensões sejam críticas (observar o conservadorismo das metodologias de análise).

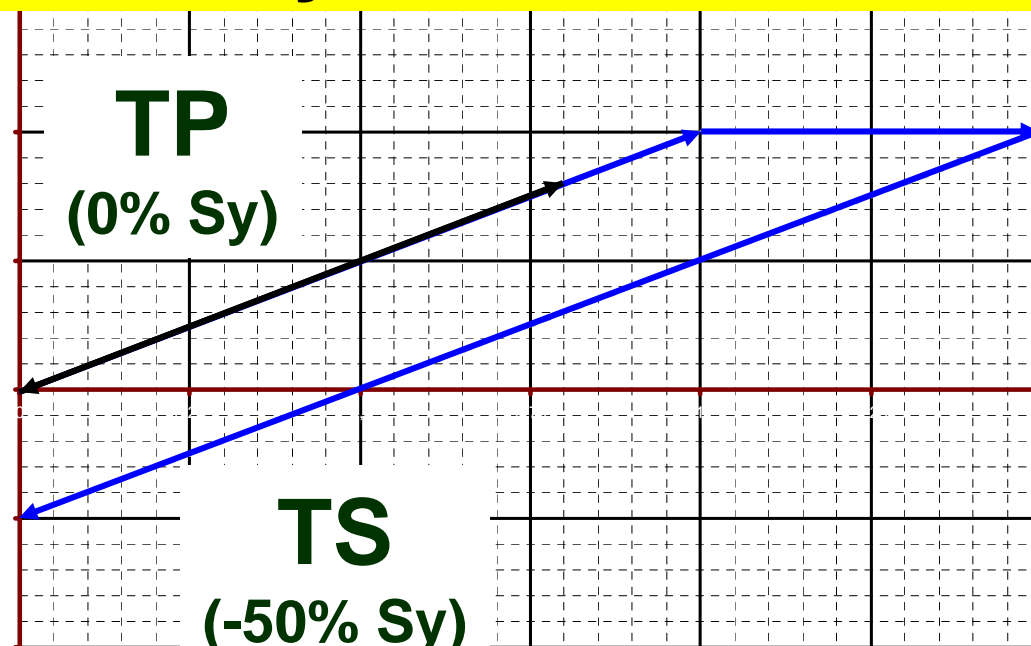
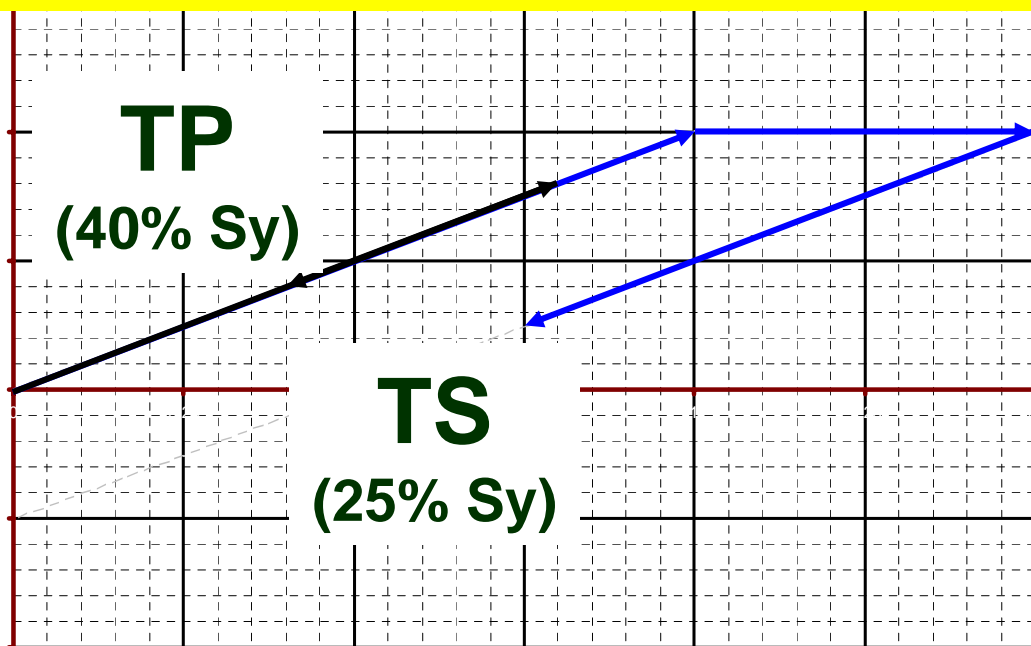
- São as tensões desenvolvidas por restrições a deformações e compatibilidade de deslocamentos em pontos de descontinuidades. A característica básica desse tipo de tensão é sua capacidade de auto-limitação pela deformação. Como exemplo temos tensões devido à dilatação térmica restrita ou tensões residuais de soldagem.

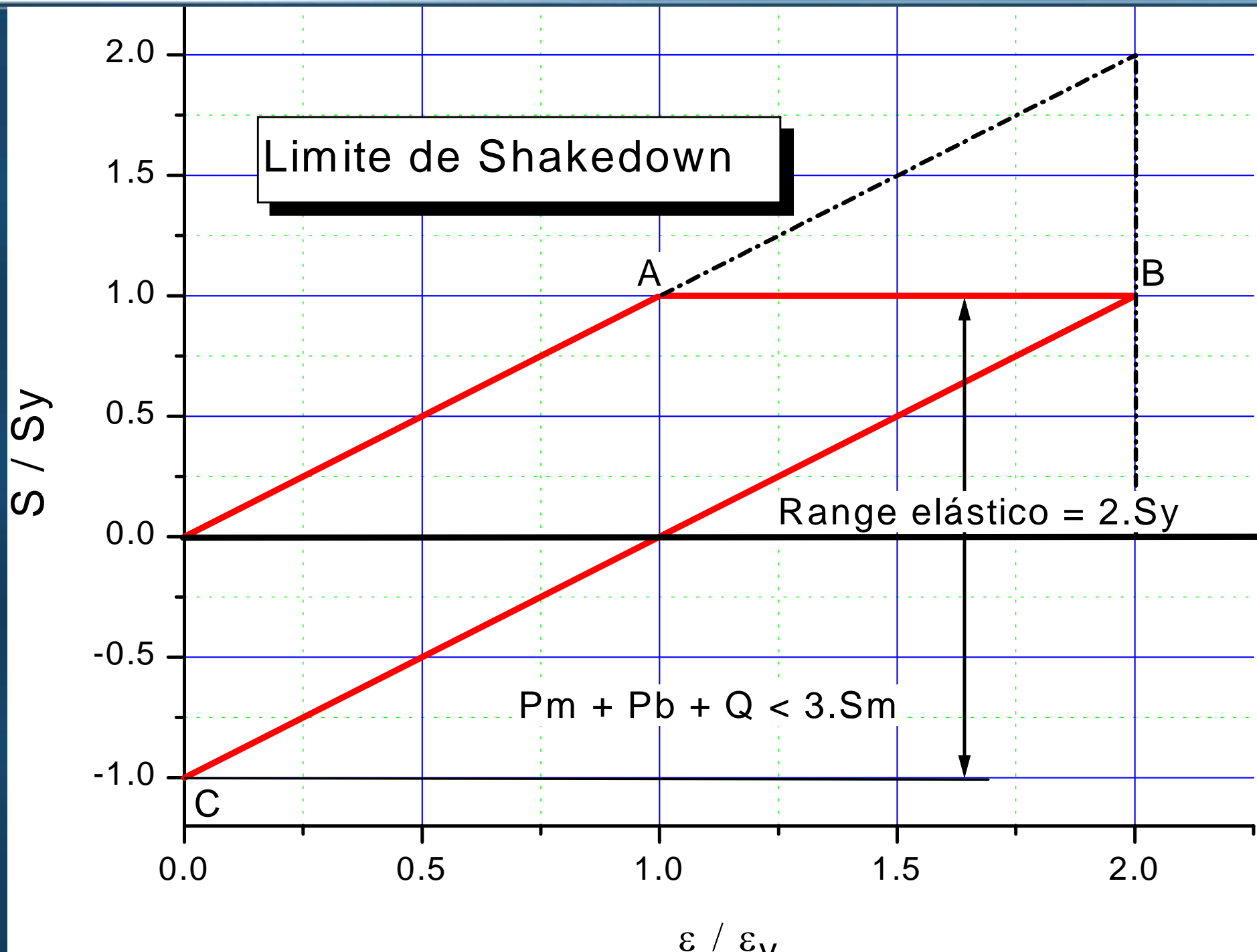
Em função da restrição a deslocamentos e rotações, as tensões locais geradas são bastante superiores as tensões primárias em regiões afastadas





EVOLUÇÃO DAS TENSÕES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS DURANTE PRESSURIZAÇÃO



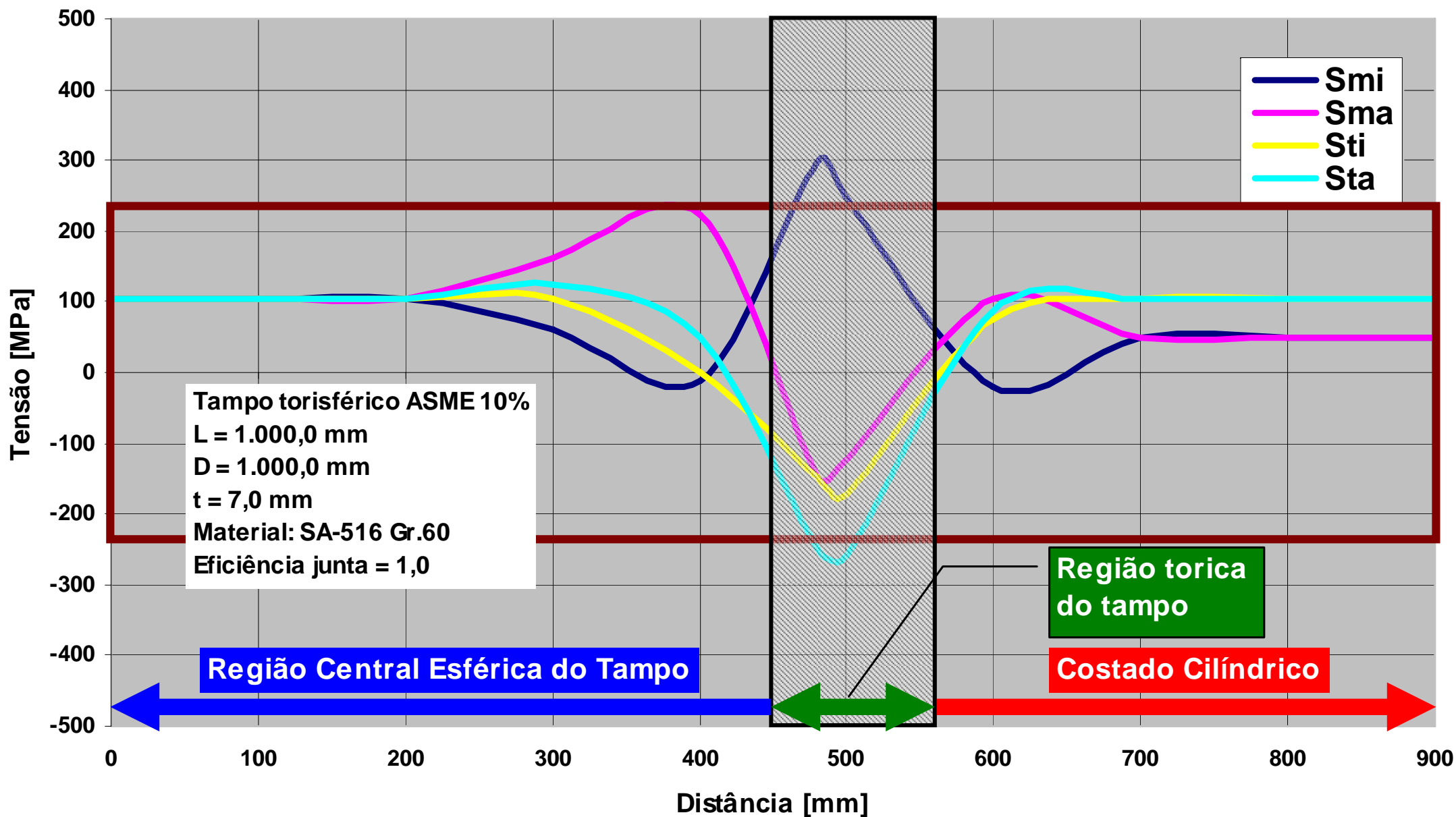


- O aumento sem limite da pressão interna irá ocasionar uma necessidade crescente de compatibilização de deslocamentos e rotações nas regiões de mudança geométrica.
- A consequência é o aumento das deformações locais e o nível de plastificação.
- Como o processo é uma resposta ao carregamento crescente, são geradas tensões de flexão e de membrana superiores as existentes em regiões de tensões generalizadas, mas que são continuamente aliviadas pelas deformações permanentes;

- Descontinuidades com característica planar em regiões de tensões secundárias podem ter um comportamento diferente, decorrente das tensões e deformações mais elevadas na região;
- A descontinuidade não reconhece a diferença entre tensões primárias e secundárias;
- Como consequência, descontinuidades em regiões de mudança geométrica podem evoluir durante a pressurização mas não falharem devido ao alívio do nível de tensões durante a deformação local.

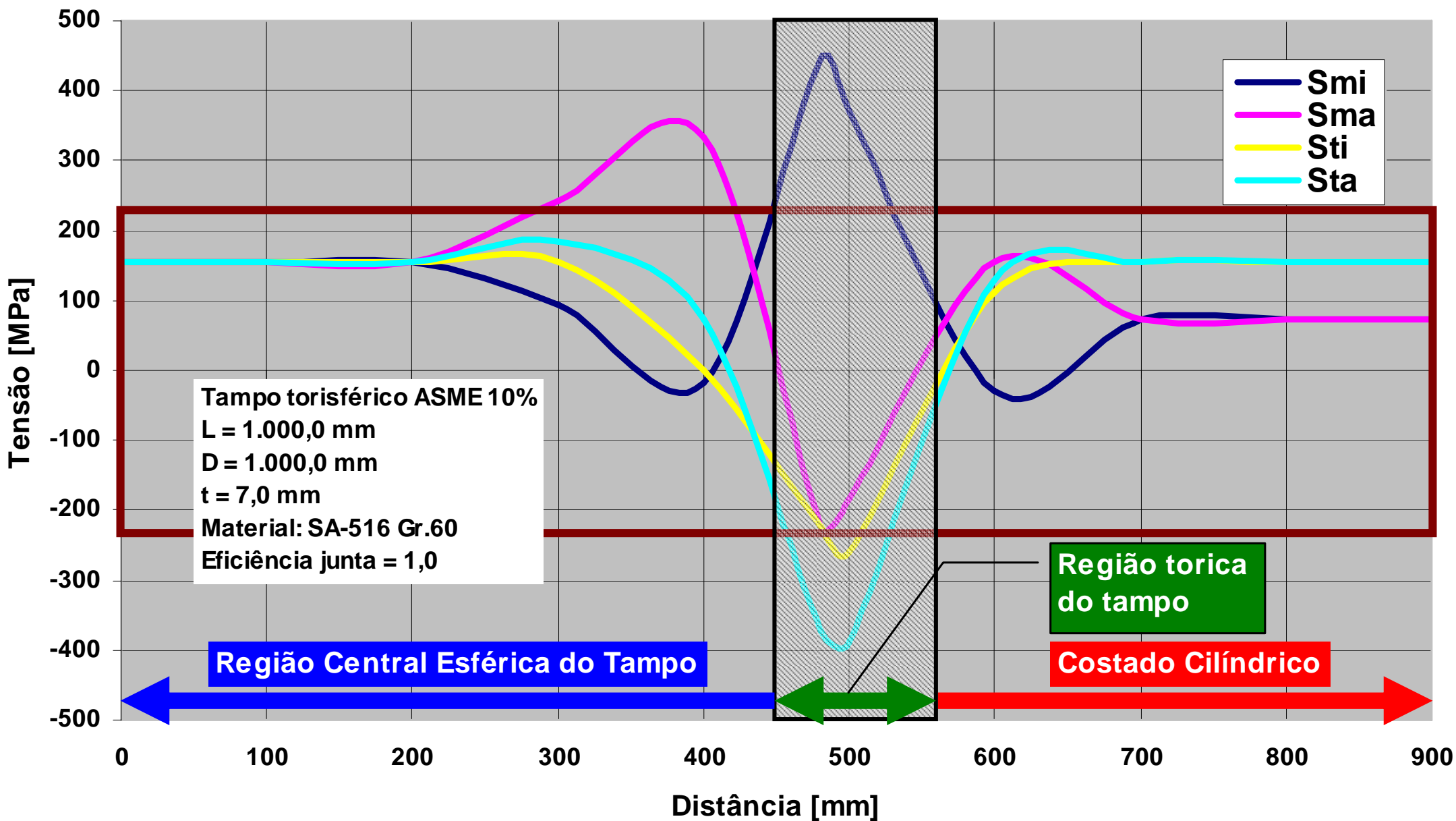
Tensões atuantes na junção costado x tampo

PMA = 14,6 kgf/cm²



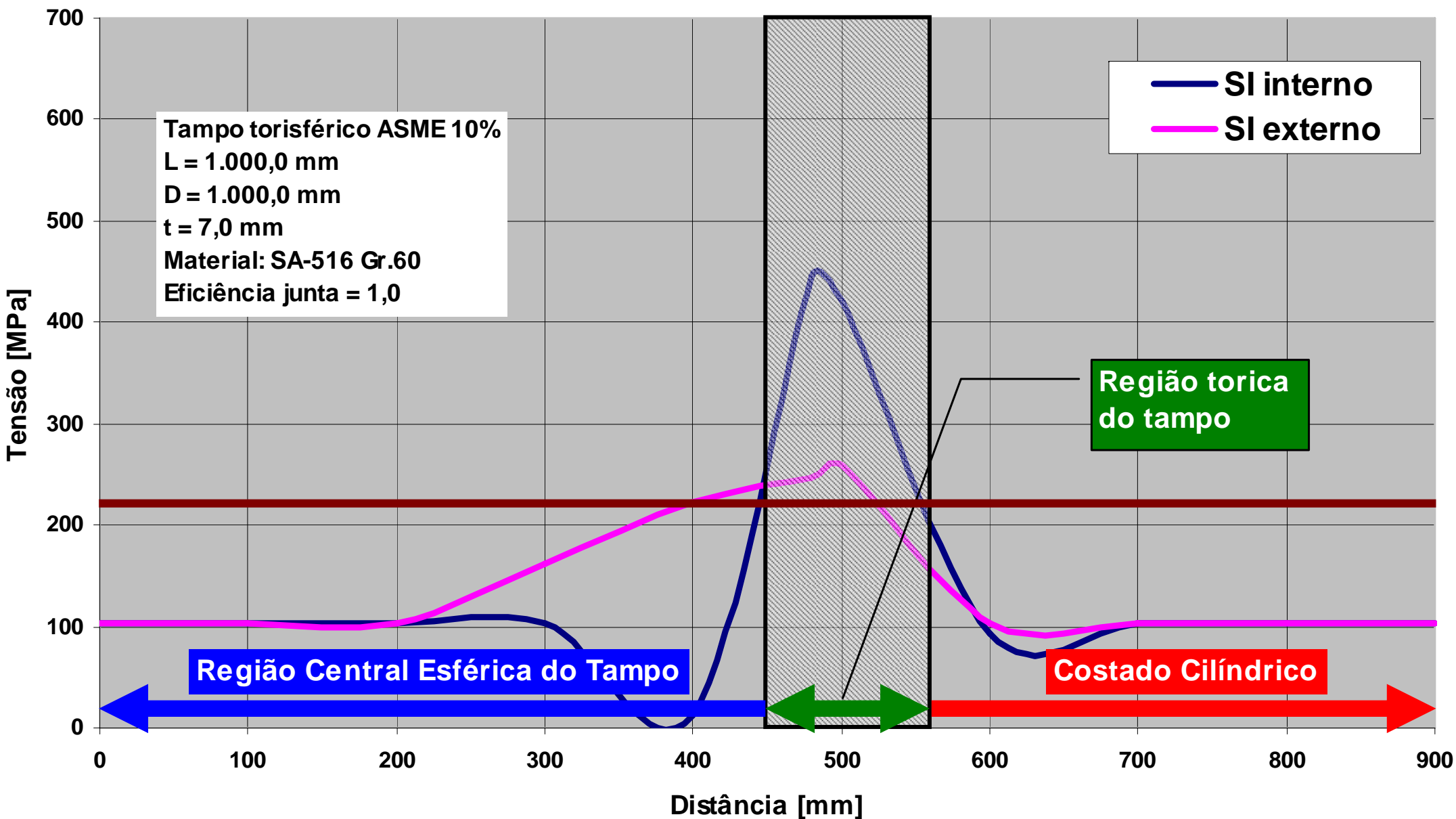
Tensões atuantes na junção costado x tampo

PTH = 21,9 kgf/cm²



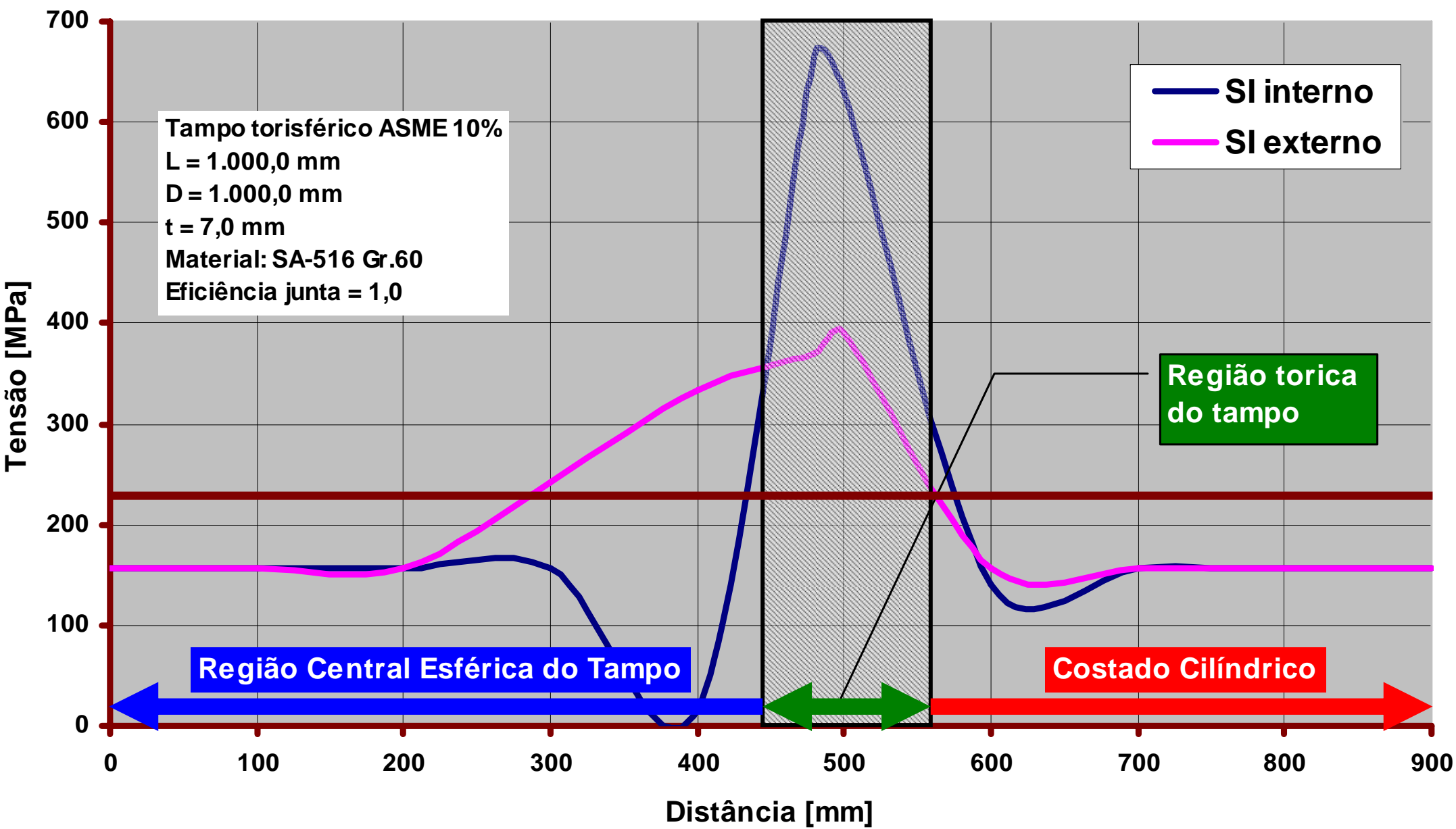
Tensões equivalentes na junção costado x tampo

PMA = 14,6 kgf/cm²



Tensões equivalentes na junção costado x tampo

PTH = 21,9 kgf/cm²



ANSYS

APR 25 2007

14:09:22

DISPLAC

STEP=1

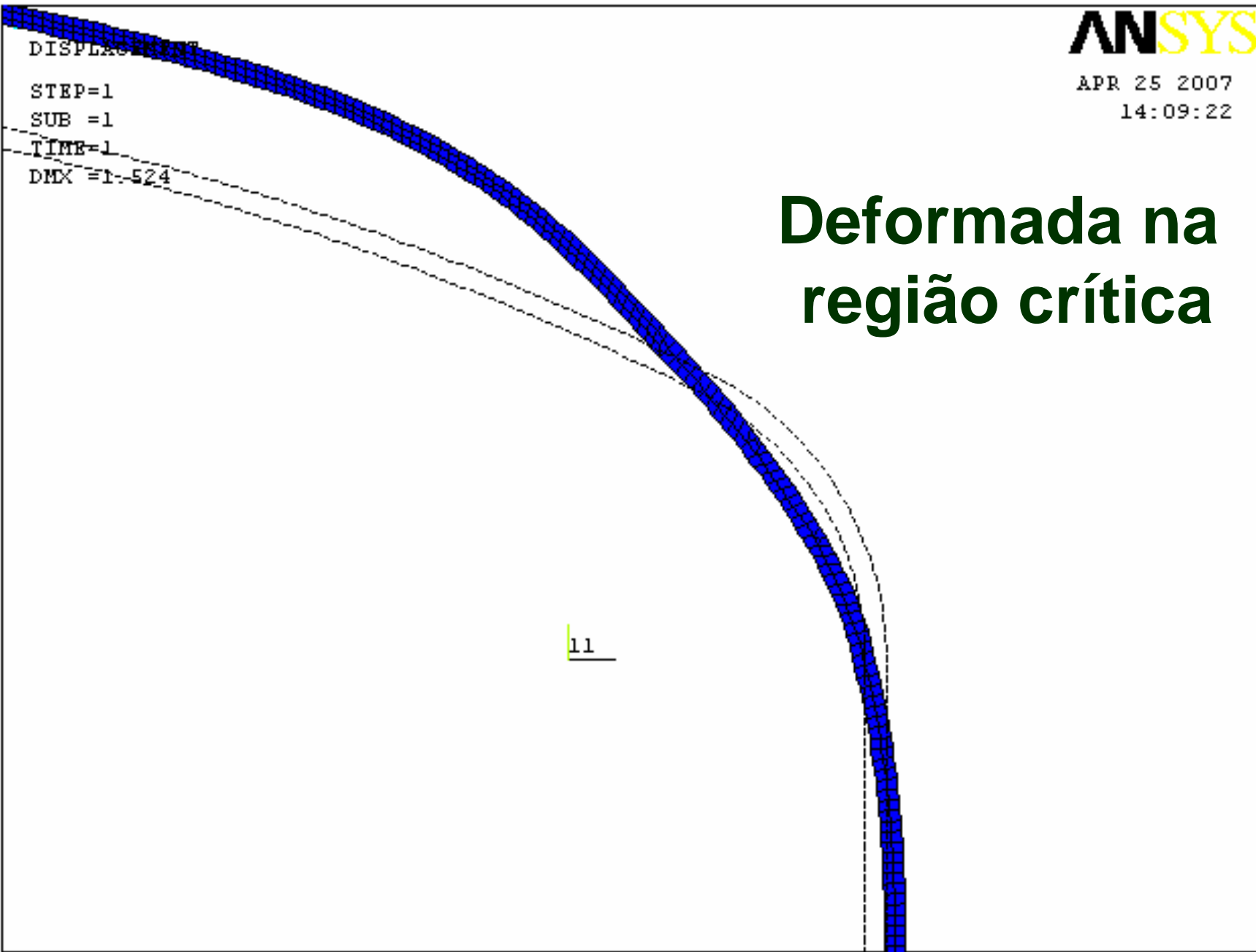
SUB =1

TIME=1

DMX =1.524

**Deformada na
região crítica**

11



ANSYS

APR 25 2007

14:09:38

NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB =1

TIME=1

SINT (AVG)

DMX =1.524

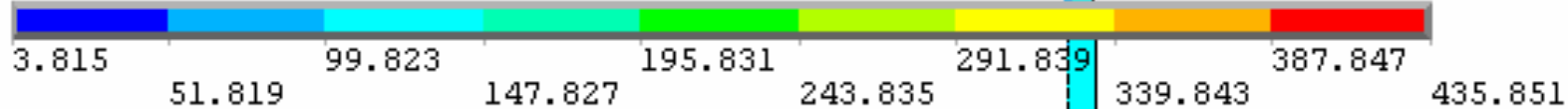
SMN =3.815

SMX =435.851

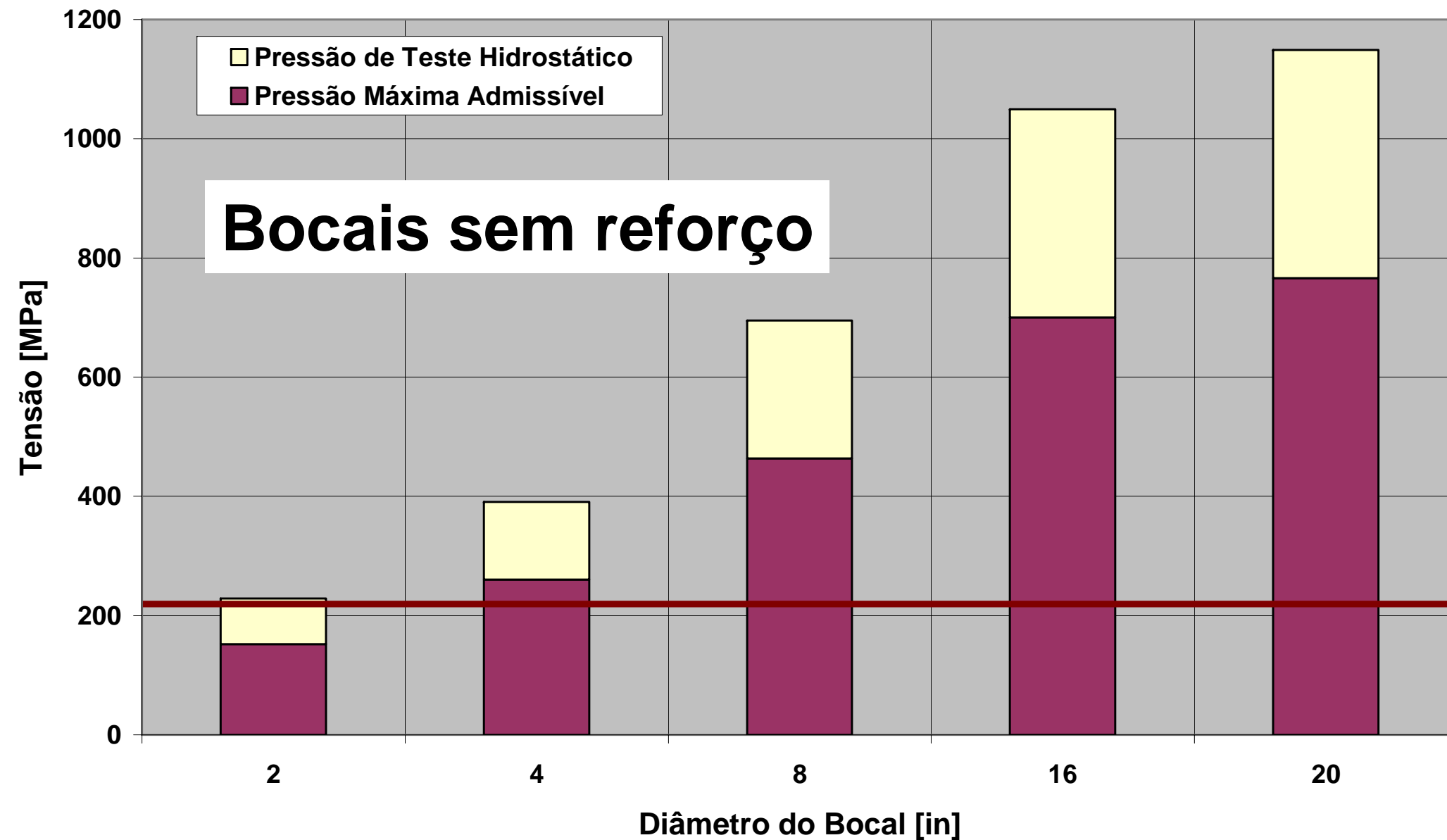
Tensão equivalente

MEK

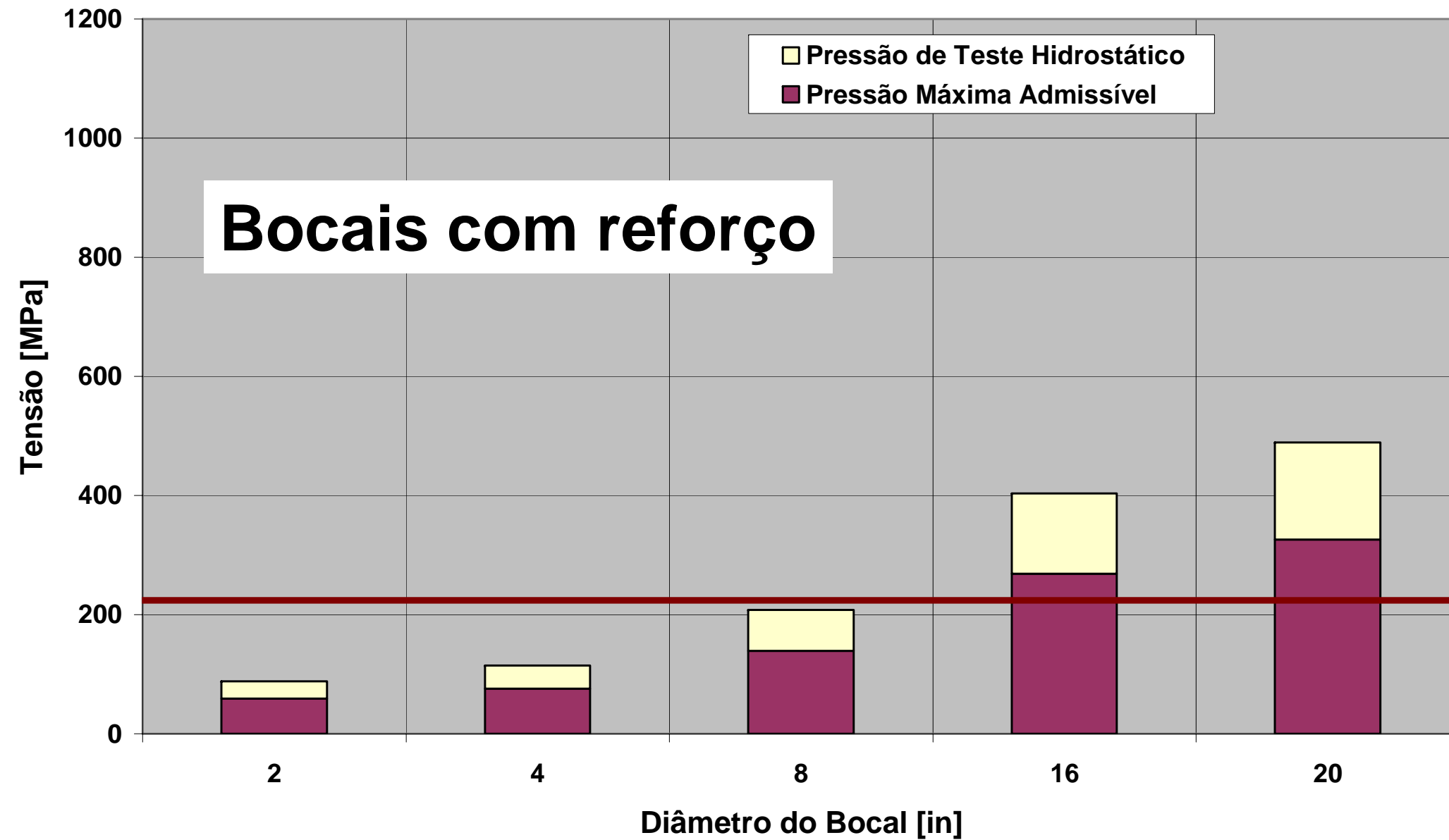
11

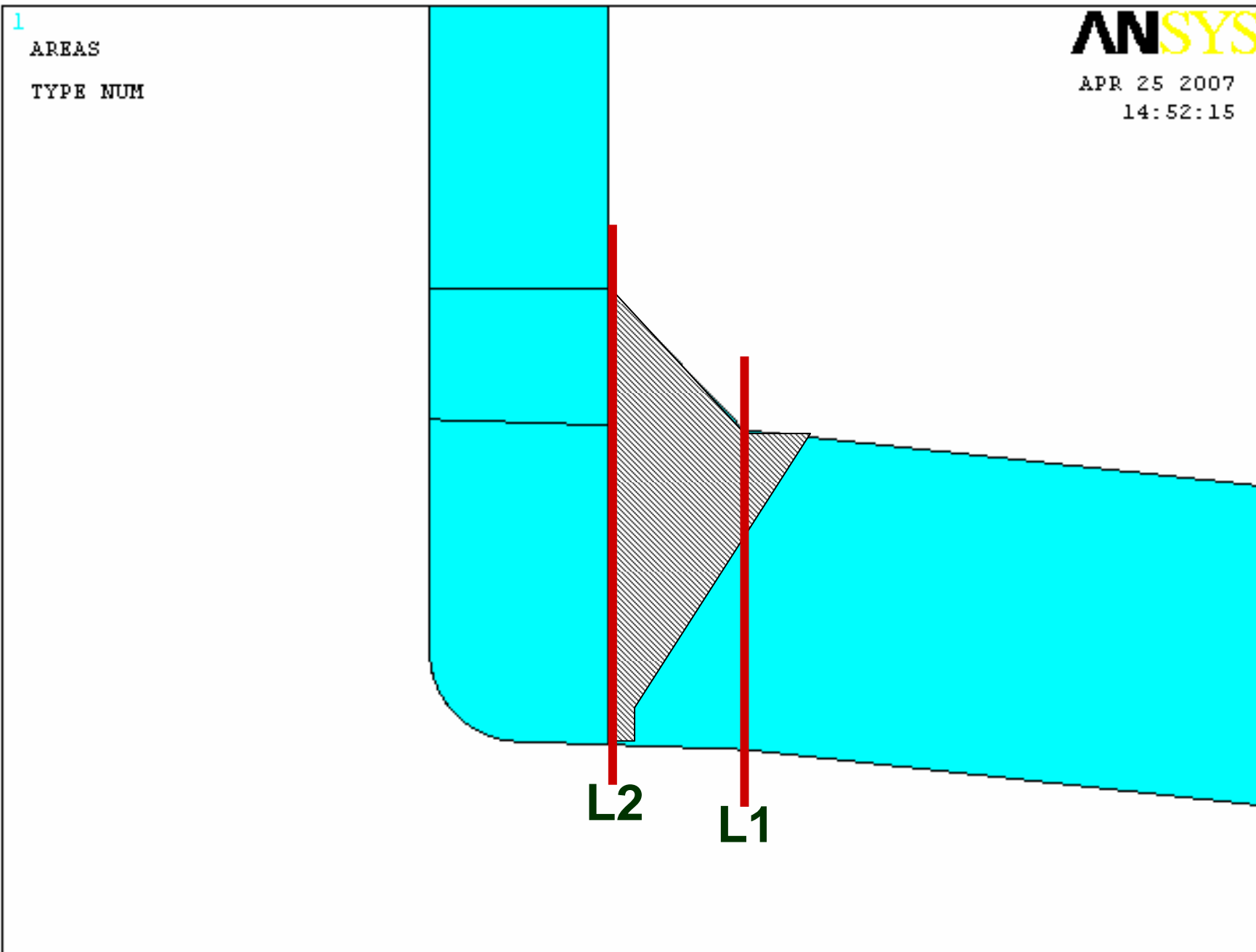


Tensões Equivalentes Bocais



Tensões Equivalentes Bocais





1

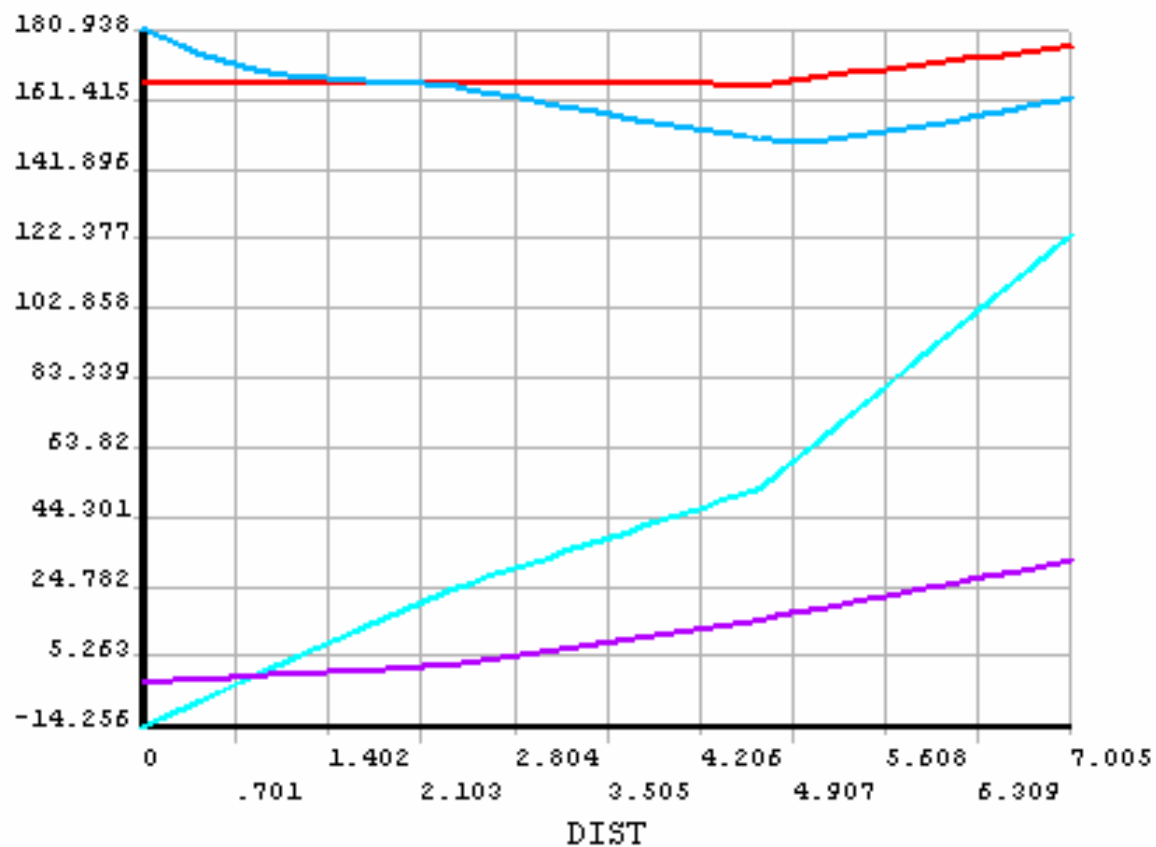
POST1
SUB =1
TIME=1
PATH PLOT
NOD1=1673
NOD2=1431
SXX
SYY
SZZ
SI

Linha L1

ANSYS

APR 25 2007

14:20:19



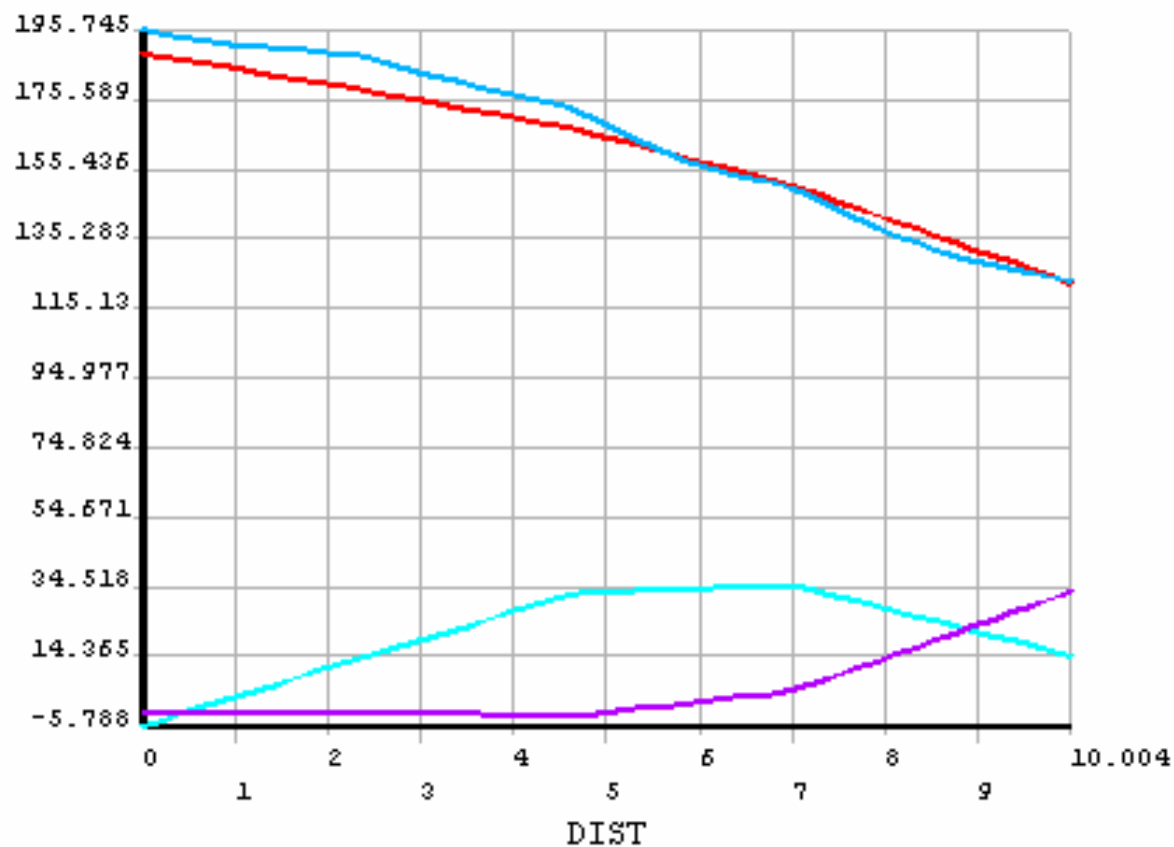
Linha L2

ANSYS

APR 25 2007

14:21:33

1
POST1
SUB =1
TIME=1
PATH PLOT
NOD1=2761
NOD2=2790
SXX
SYY
SZZ
SI



- Regiões de mudança geométrica podem estar submetidas a tensões elevadas, que para a estrutura não implica em falha, mas sim em deformações;
- Uma descontinuidade localizada em região de mudança geométrica pode ser submetida a uma tensão elevada que, no entanto, se reduz ao longo da pressurização e geração de deformações permanentes;

- ❏ Descontinuidades localizadas em bocais de pequenas dimensões podem não estar sendo avaliadas em uma pressurização (operação ou teste hidrostático);
- ❏ Nesse casos, o melhor seria a inspeção para a detecção da descontinuidade;
- ❏ Mesmo em bocais de dimensões maiores, descontinuidades localizadas na região de ligação da solda com o pescoço do bocal são submetidas a tensões reduzidas.



PETROBRAS

2 - FUNÇÃO DO TESTE HIDROSTÁTICO



- Promover deformações e acomodação do material em regiões de mudança geométrica;
- Não avalia a qualidade de fabricação do equipamento. Exemplo: bocal com uma trinca de fabricação na solda de ligação do pescoço com o costado do equipamento “sobrevivendo” ao teste hidrostático;
- Alívio restrito de tensões residuais de soldagem;
- Pode promover a distribuição de deformações em pontos de concentração de tensões
- Necessário para atender ao código e definir responsabilidade do fabricante.

- Definir uma sobrepressão suficiente para qualificar uma condição operacional;
- Não tem mais função estrutural já que as deformações de acomodação do material já ocorreram no teste de fábrica;
- Somente ocorreriam deformações adicionais no caso de pressurização a um valor superior ao aplicado na fábrica;
- Pode não apontar descontinuidades planares, presentes no material mas não ativadas até a falha (exemplo: tensões de abertura reduzidas em bocais).

- O teste hidrostático de fábrica tem objetivos diversos do teste de campo, no que se relaciona a sua função estrutural;
- A pressão de teste de fábrica é função do projeto / fabricação do equipamento;
- A pressão de teste de campo é função do estado físico do equipamento e o nível de acompanhamento (inspeção).

3 - COMPORTAMENTO À FRATURA DE DESCONTINUIDADES COM CARACTERÍSTICA PLANAR

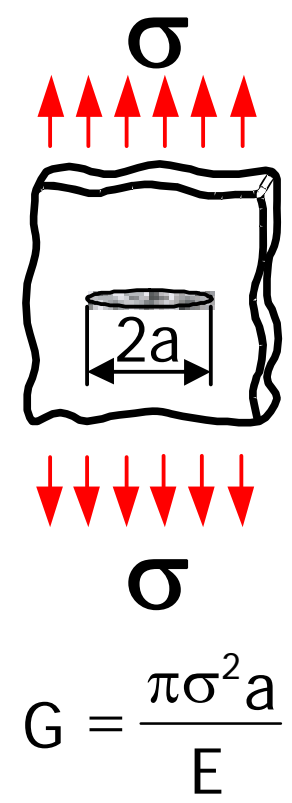
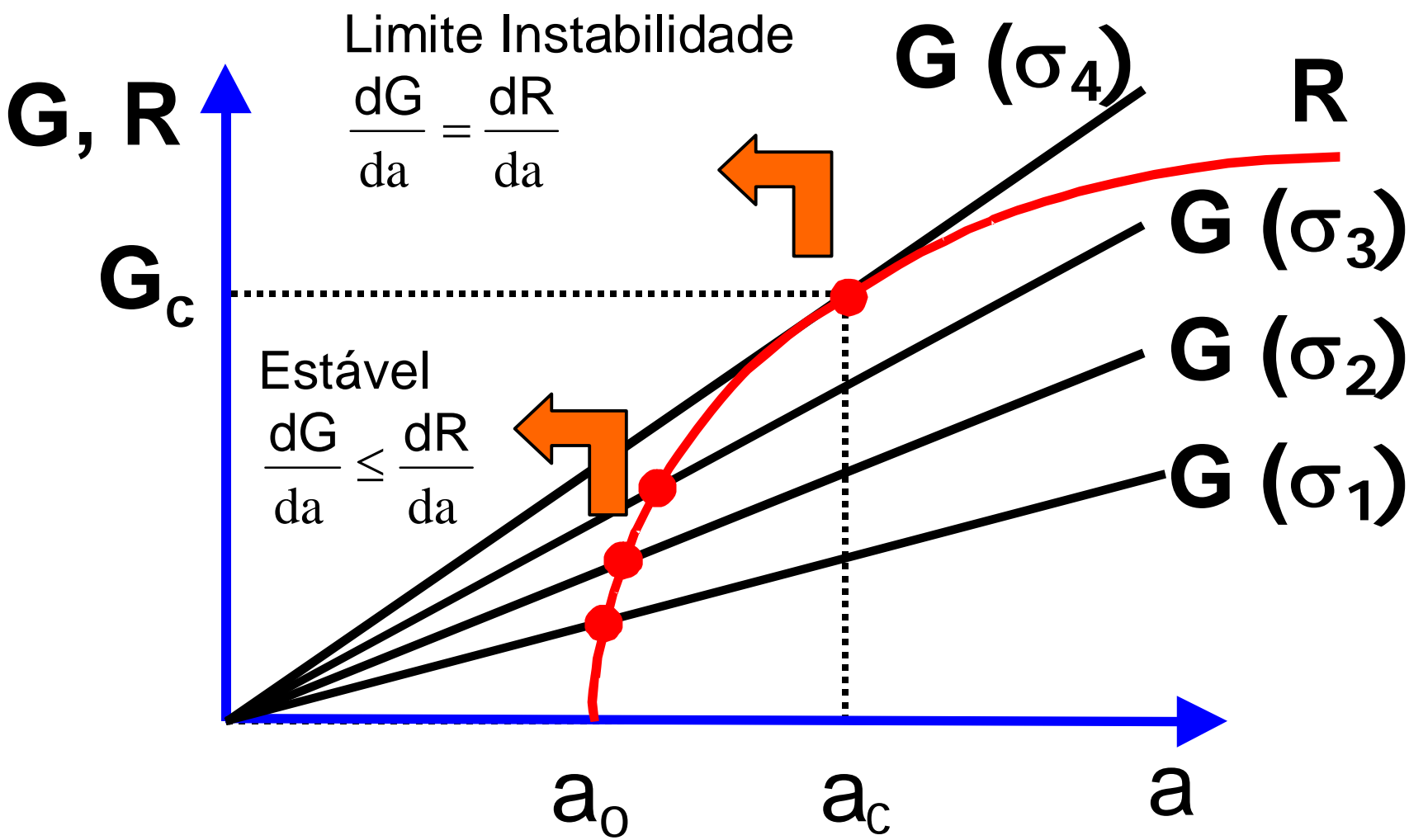
- Característica catastrófica e relacionada a presença de um estado plano de deformações e/ou fragilização do material;
- Algumas razões para a fragilização:
 - Estado de tensões (espessura);
 - Temperatura baixa (aços ferríticos);
 - Taxa de aplicação do carregamento;
 - Presença de hidrogênio na matriz.
- A presença de uma trinca de dimensão crítica na estrutura irá falhar quando se alcance o carregamento necessário no material;

- Sem a ocorrência de propagação estável anterior à falha;
- A energia cedida ao material é dispendida integralmente em abertura de superfície, sem plastificação do material (mecanismo de propagação);
- Equipamentos, principalmente com espessuras elevadas, operando em altas temperaturas, podem estar sujeitos a falhas por fratura frágil durante a pressurização no teste hidrostático. Em muitos casos, em operação, o equipamento não falharia.

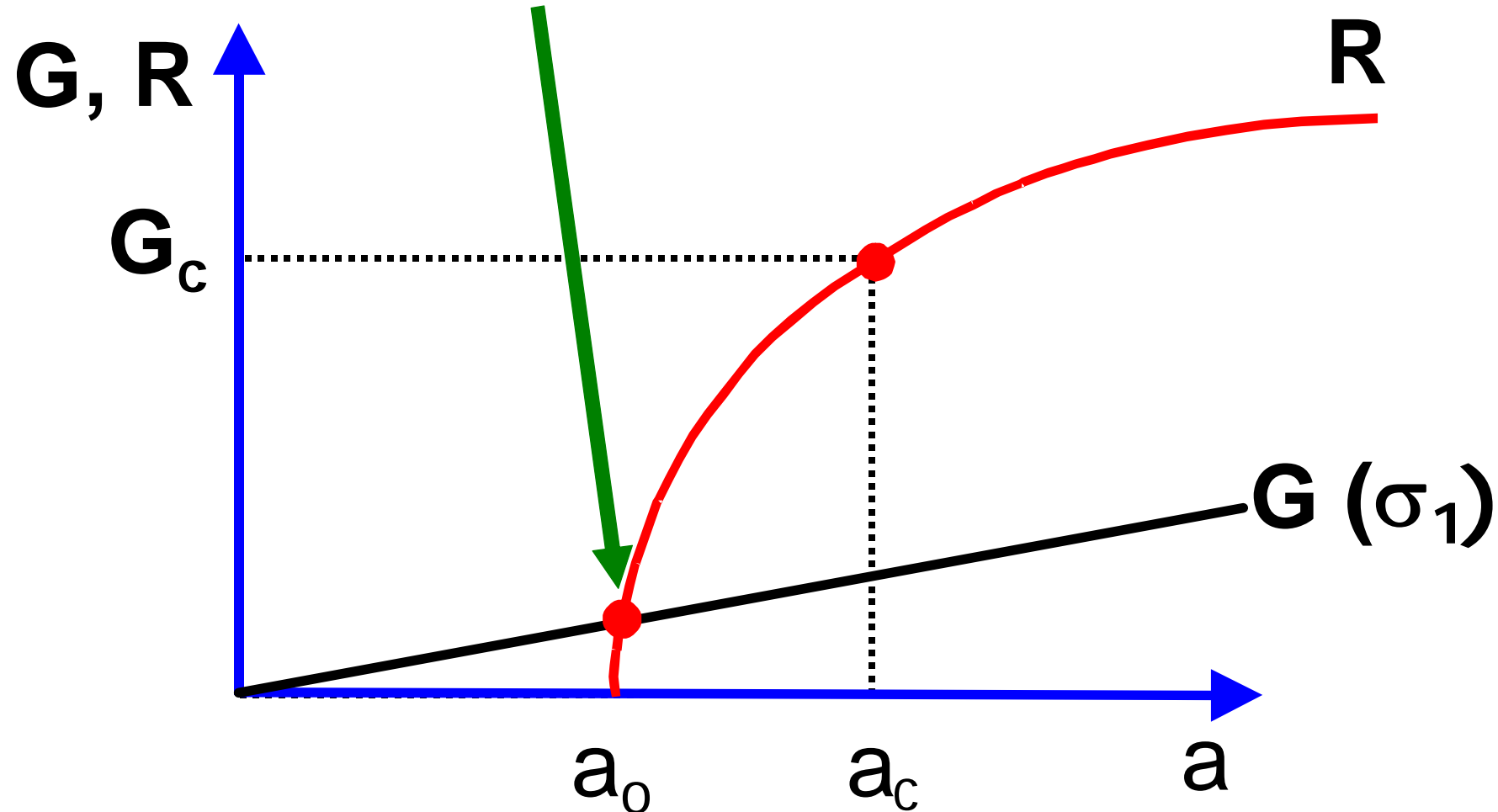
- Tipo de fratura relacionada a materiais com boa tenacidade (não fragilizados) e associados a um estado plano de tensões (espessuras mais baixas);
- Parte considerável da energia cedida ao material é dispendida para a sua plastificação;
- O comportamento dúctil do material favorece a um crescimento estável (mecanismo de propagação)

- ❏ O comportamento dúctil pode ocasionar as seguintes respostas do componente trincado:
 - **Deformação na ponta de trinca quando do carregamento (blunting)** – efeito benéfico no comportamento de trincas em processo de crescimento estável em operação (fadiga);
 - **Crescimento subcrítico da descontinuidade sem a falha** – efeito deletério da pressurização, que pode afetar a integridade futura do equipamento;
 - **Crescimento subcrítico estável levando à fratura dúctil;**
 - **Rasgamento do material (colapso plástico)**

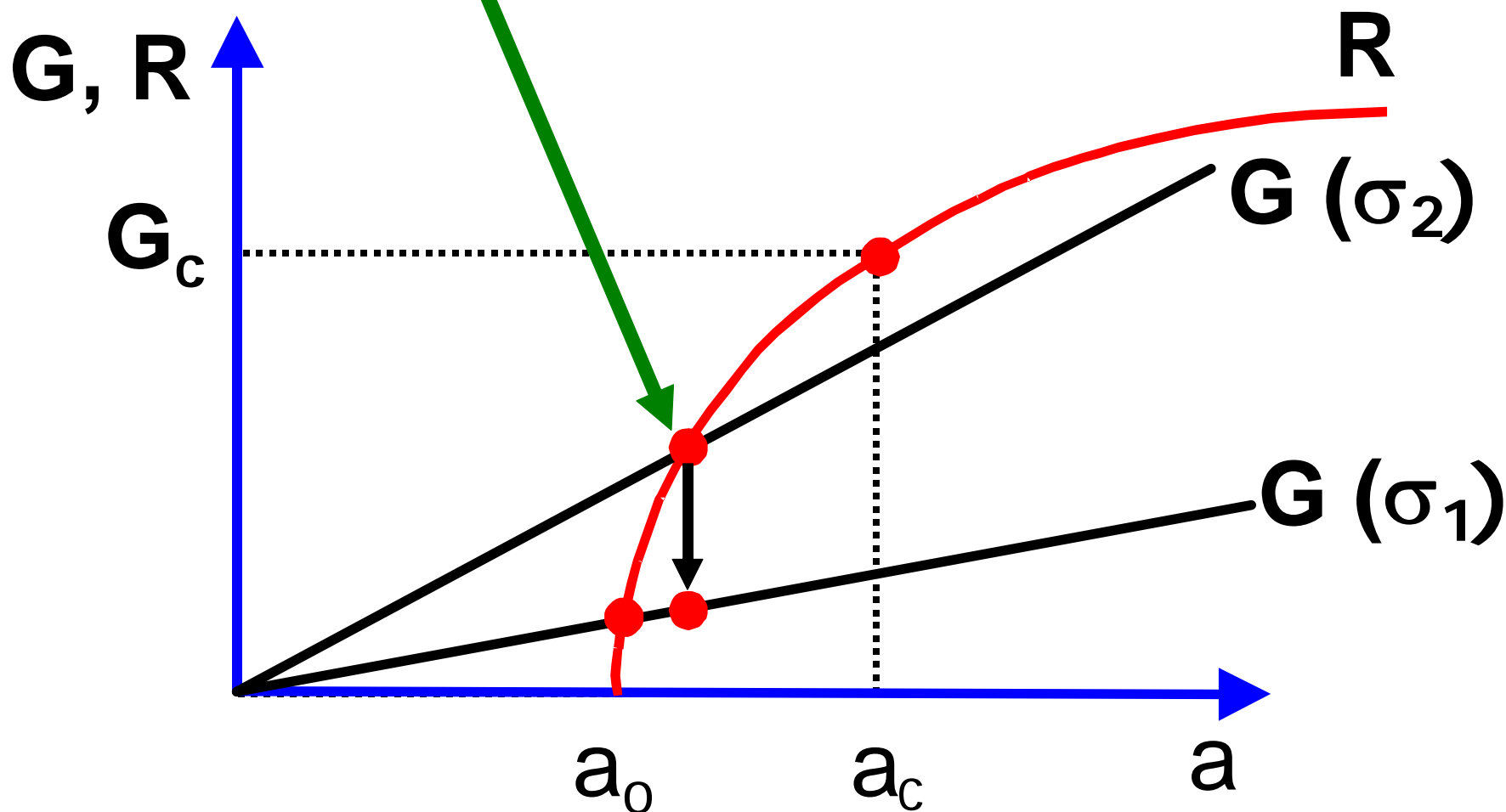
↙ **G = R** ↘
Força Motriz **Resistência à Extensão**



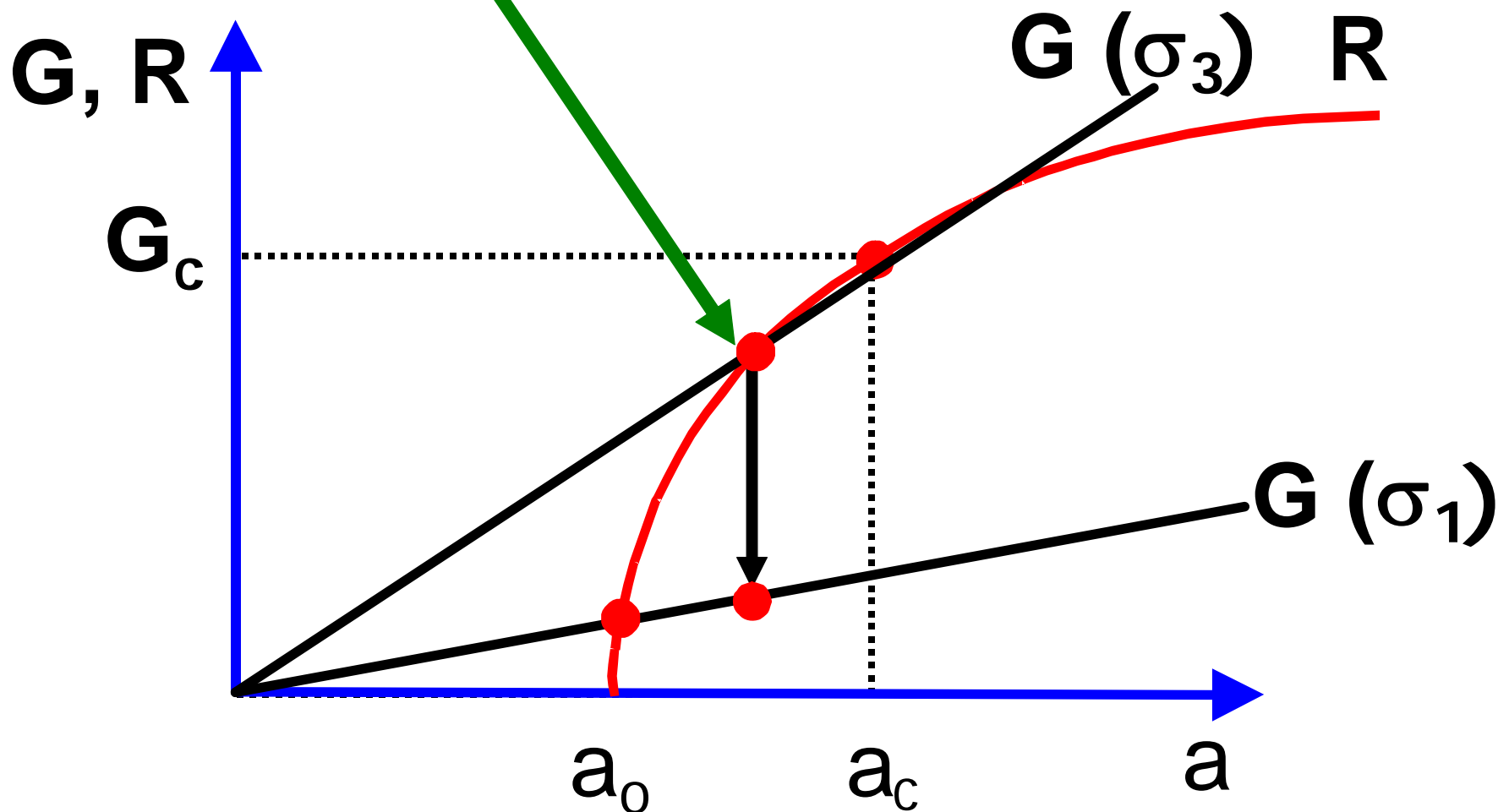
Dimensão inicial da trinca reduzida e tensão baixa
(sem crescimento estável ou crescimento estável reduzido)



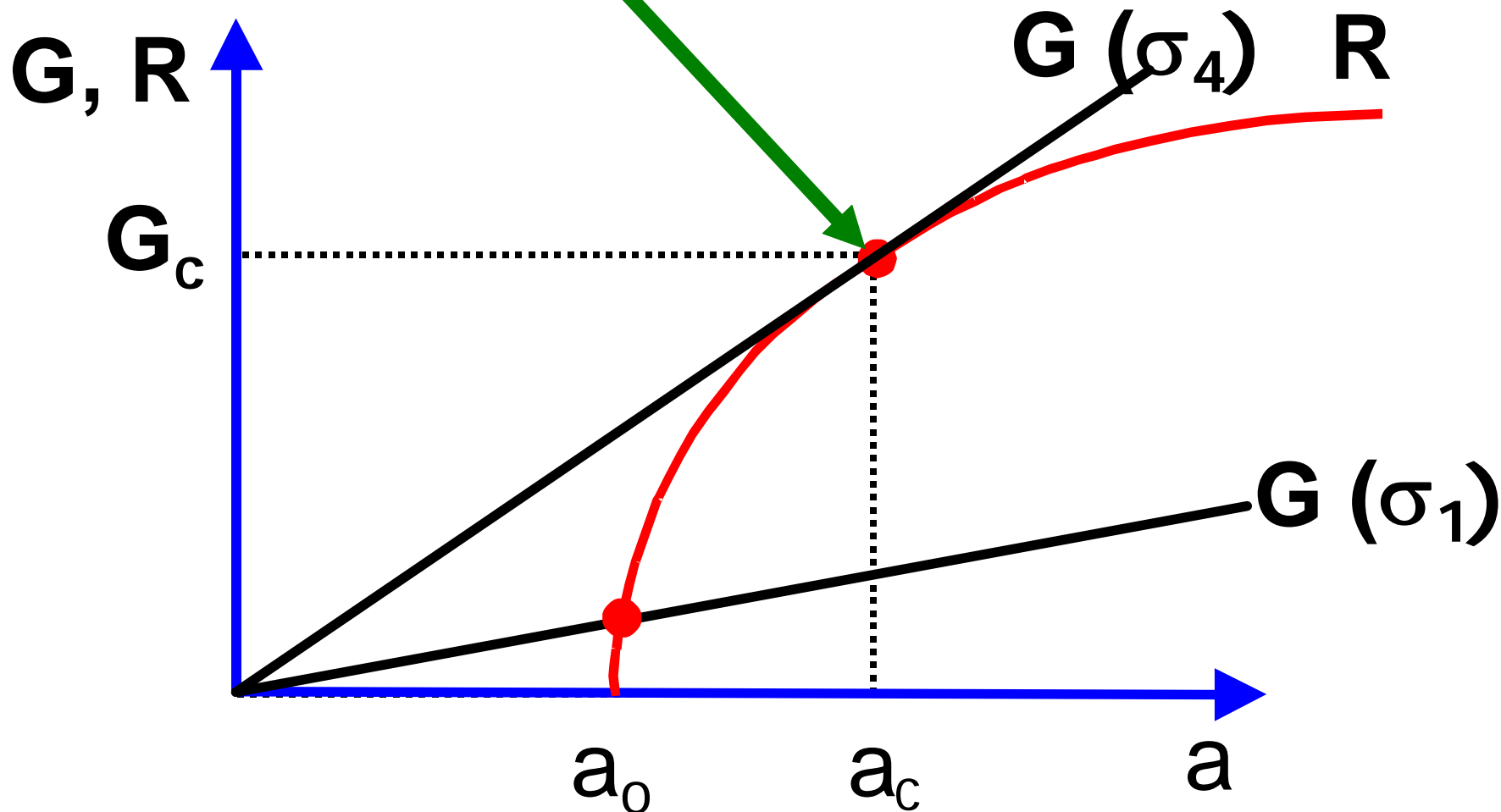
Dimensão da trinca reduzida e tensão mais elevada
(com crescimento estável)



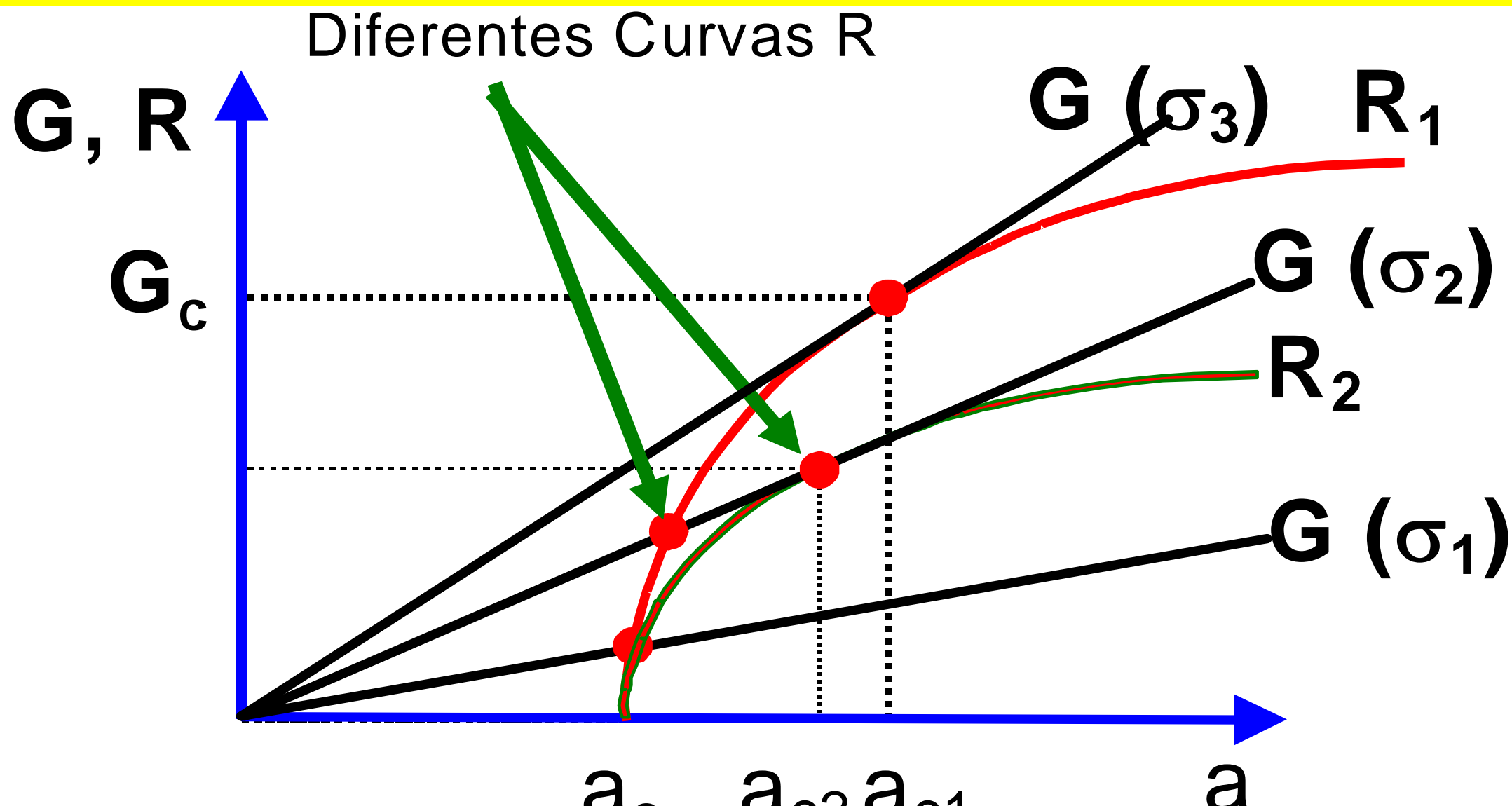
Dimensão inicial da trinca reduzida e tensão mais elevada
(com crescimento estável)

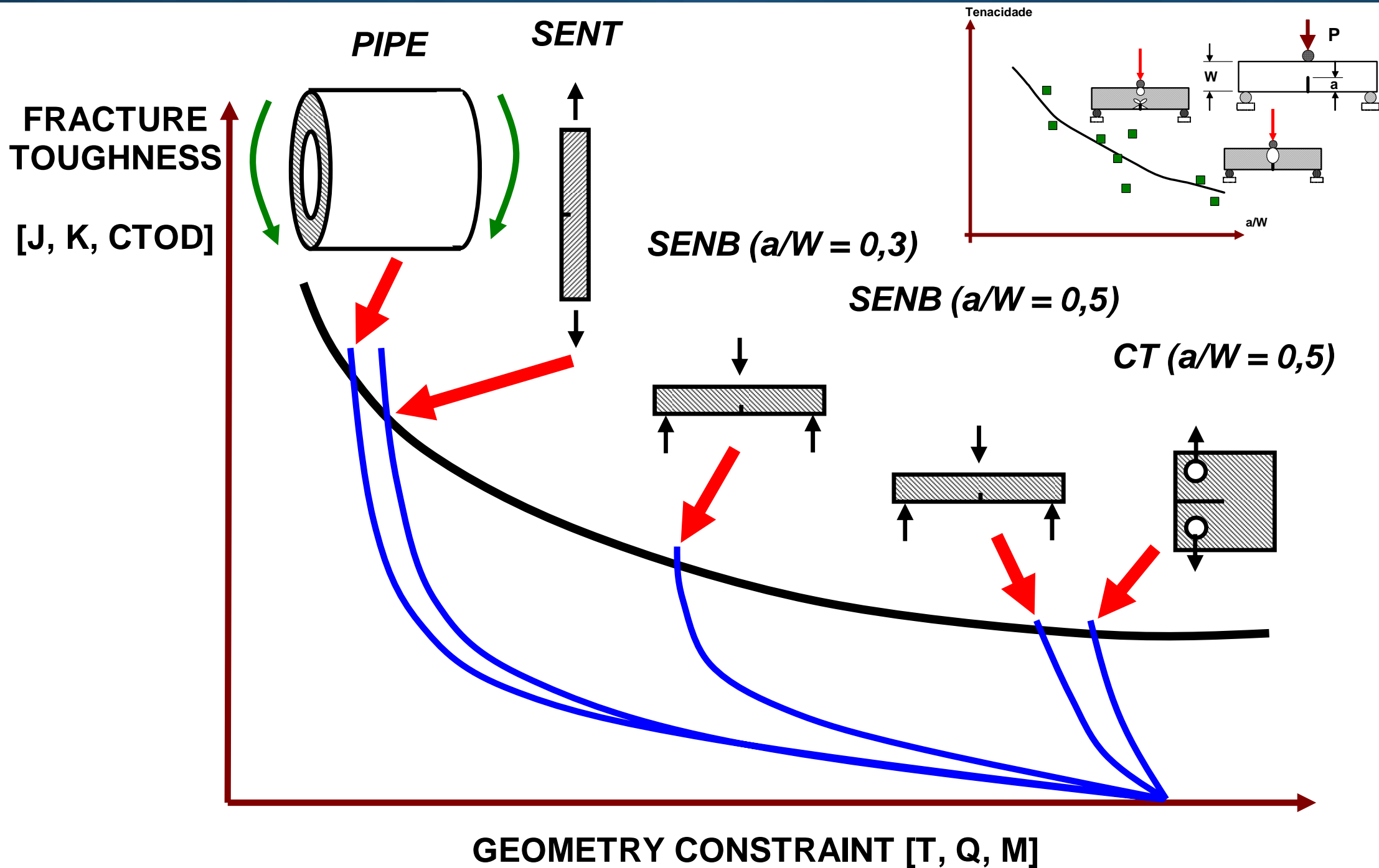


Dimensão inicial da trinca reduzida e tensão mais elevada
(fratura dúctil)



Quanto maior a tenacidade ou menor restrição, maior a possibilidade de crescimento estável na pressurização sem a ocorrência da falha








PETROBRAS


4 – CÓDIGOS DE INSPEÇÃO




RB-3234 – PRESSURE TESTING




-  Um teste de pressão não necessita ser realizado como parte de uma inspeção periódica. Contudo, um teste deve ser feito quando há dúvidas na inspeção e dificuldades de avaliar formas de deterioração que podem afetar a segurança do vaso. Um teste de pressão pode ser necessário após certos reparos e alterações.

SECTION 3 – DEFINITIONS

 **3.1 ALTERAÇÕES:** Mudança física de qualquer componente ou um **RERATING** com implicações de projeto que afetam a capacidade de conexão.....

 Não devem ser consideradas como **ALTERAÇÕES**: *any comparable or duplicate replacement, the addition of any reinforced nozzle less than or equal to size of existing reinforced nozzle, and the addition of nozzles not requiring reinforcement.*


SECTION 3 – DEFINITIONS

-  **3.15 REPARO:** O trabalho necessário para restaurar o vaso para uma condição admissível e segura para as condições de projeto.
-  Se o reparo altera a pressão ou temperatura de projeto, os requisitos de **RERATING** devem ser satisfeitos.
-  Um reparo pode ser a adição ou substituição de partes pressurizadas ou não pressurizadas que não alteram o **RATING** do vaso.



SECTION 3 – DEFINITIONS

- 3.17 **RERATING**: Alteração na temperatura e pressão ou na pressão máxima admissível de trabalho do equipamento ou em ambos.
- A PMA do equipamento pode aumentar ou reduzir devido a um **RERATING**.
- Um **DERATING** abaixo das condições originais de projeto é permitido em função de áreas com perda de espessura.


SECTION 3 – DEFINITIONS

 **3.17 RERATING:** Quando um *RERATING* ocasiona aumento na PMA ou na temperatura ou a temperatura mínima é reduzida, testes mecânicos são requeridos e este procedimento deve ser considerado como uma *ALTERAÇÃO*.



6.2 RISK-BASED INSPECTION

-  Os resultados de um estudo de RBI podem ser utilizados para estabelecer uma estratégia de inspeção e mais especificamente melhor definir o seguinte.
-  c. A necessidade de teste de pressão após danos ocorridos ou após a execução de reparos ou modificações.


6.5 PRESSURE TEST

-  Quando o INSPETOR AUTORIZADO acredita que um teste de pressão é necessário ou após certos **REPAROS** ou **ALTERAÇÕES**, o teste deverá ser conduzido em uma pressão de acordo com o código de construção utilizado para a determinação da pressão máxima admissível de trabalho.

7.2.10 **TESTING**

-  Após a execução de reparos, um teste de pressão deverá ser aplicado se o inspetor acredita que seja necessário. O teste deverá estar de acordo com as regras de projeto de construção do vaso.
-  Um teste de pressão é normalmente requerida após uma alteração. Sujeito a aprovação, ensaios não destrutivos apropriados devem ser requeridos quando o teste de pressão não é realizado.

7.2.10 TESTING

-  A substituição por ensaios não destrutivos após uma alteração poderá ser efetivada após consulta a um engenheiro com experiência em vasos de pressão e ao inspetor autorizado.

5 – CONCLUSÕES





- Os efeitos do teste hidrostático em vasos de pressão dependem da geometria do equipamento (rigidez dos componentes), comportamento do material (curva R), condições de fragilização do material, dimensões e orientação de descontinuidades, influência do meio (produto) e presença de mecanismo de propagação subcrítica em operação (fadiga, CST,...);

- Em algumas situações específicas a realização de um teste hidrostático pode não ser eficiente na detecção de descontinuidades reprovadas no equipamento (ensaios não destrutivos seriam indicados). Dessa forma, após alguns tipos de reparos, a obrigatoriedade da realização de um TH deveria ser discutida.

6 – RECOMENDAÇÕES



-  A possibilidade de crescimento subcrítico de descontinuidade deve ser estudada, baseando-se nas ferramentas atuais disponíveis (análises numéricas e experimentais) com o objetivo de identificar situações onde o teste hidrostático não forneceria a segurança desejada ou poderia influir na integridade futura do equipamento;
-  Recomenda-se a avaliação de casos particulares: bocais de pequeno diâmetro e reparos de solda localizados e a definição de situações para a dispensa do TH.