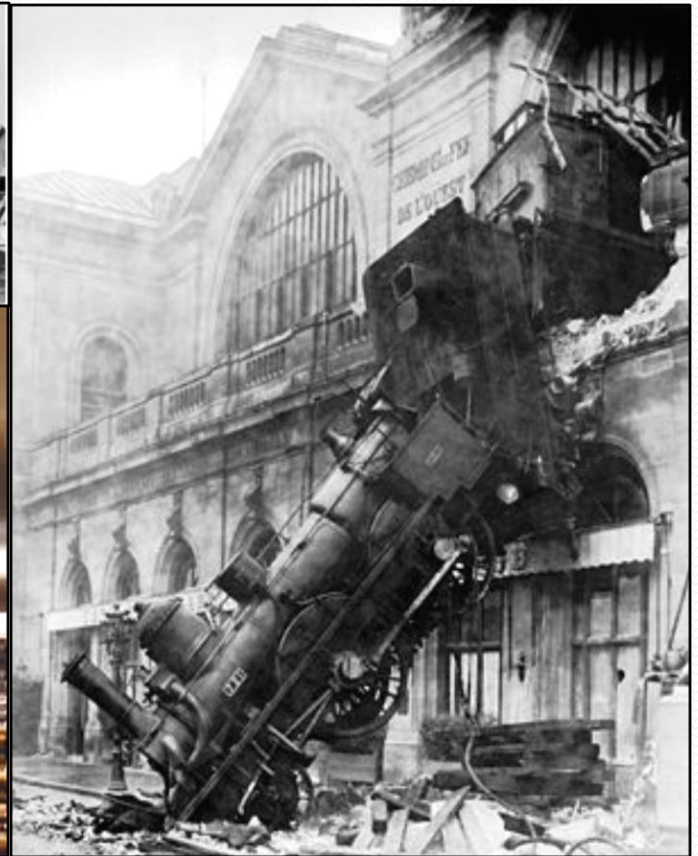
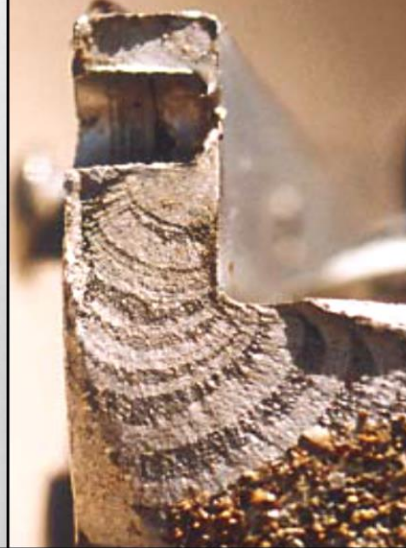
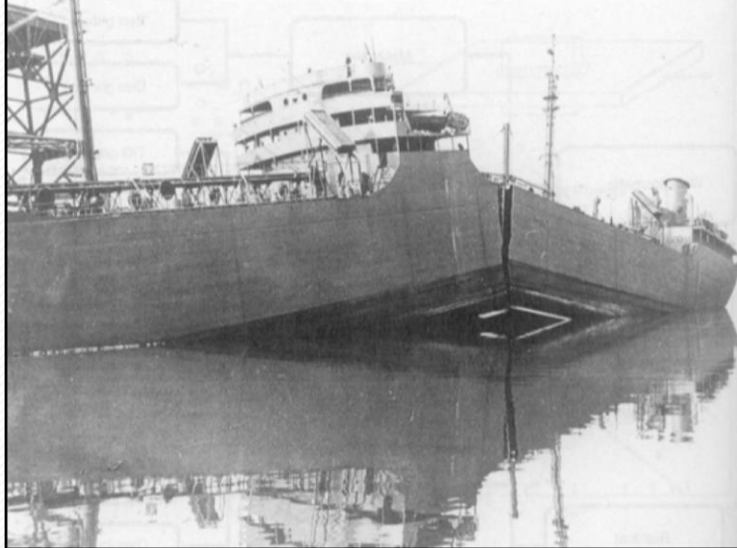


SMM0330– ANÁLISE DE FALHAS



Prof. Dr. José Benedito Marcomini

REFERÊNCIAS:

- **Fatigue of Materials**– S.Suresh, Cambridge University Press, 1998.
- **Metalografia e Análise de Falhas**, Tibério Cescon e Cesar R.F. Azevedo, ABM, São Paulo, 2006;
- **ASM Handbook Vol. 11 - Failure Analysis** – 2002;
- **ASM Handbook Vol. 12 – Fractography**– 1987;
- **ASM Handbook Vol. 19 – Fatigue and Fracture**– 1996;
- **Analyses and Prevention of Aircraft Structural Failures**, curso- L. Molent, 2011;
- **Engineering disasters: learning from failure**, N. Chawla, apresentação, 2007;
- **What Really Sank the Titanic**, Jennifer Hooper McCarty & Tim Foecke, Citadel Press Books, 2008;

REFERÊNCIAS:

- **Metallurgy of the RMS Titanic**, National Institute of Standards and Technology-NIST-IR 6118, Tim Foecke.
- **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**– Richard W. Hertzberg, John Wiley and Sons, 1996.
- **Comportamento Mecânico e Fratura de Componentes e Estruturas Metálicas**, Paulo Sergio C. Pereira da Silva, UFPR, 1999;
- **Apostila do curso: Fadiga de materiais metálicos**, Itamar Ferreira, Unicamp, 2003.
- **Mecânica dos Materiais**, Claudio Geraldo Schön, Elsevier, 2013.
- **Apostila do curso Mecânica de Fratura Elasto-Plástica**, Cláudio Ruggieri, EPUSP, 2010;
- **Apostila do curso Fadiga de Materiais Estruturais**, Cláudio Ruggieri, EPUSP, 2010;
- **Relatórios de análise de falhas do Prof. José B. Marcomini.**

TENSÃO RESIDUAL
FALHAS DE PROCESSO
FALHAS EM SERVIÇO

TENSÃO RESIDUAL

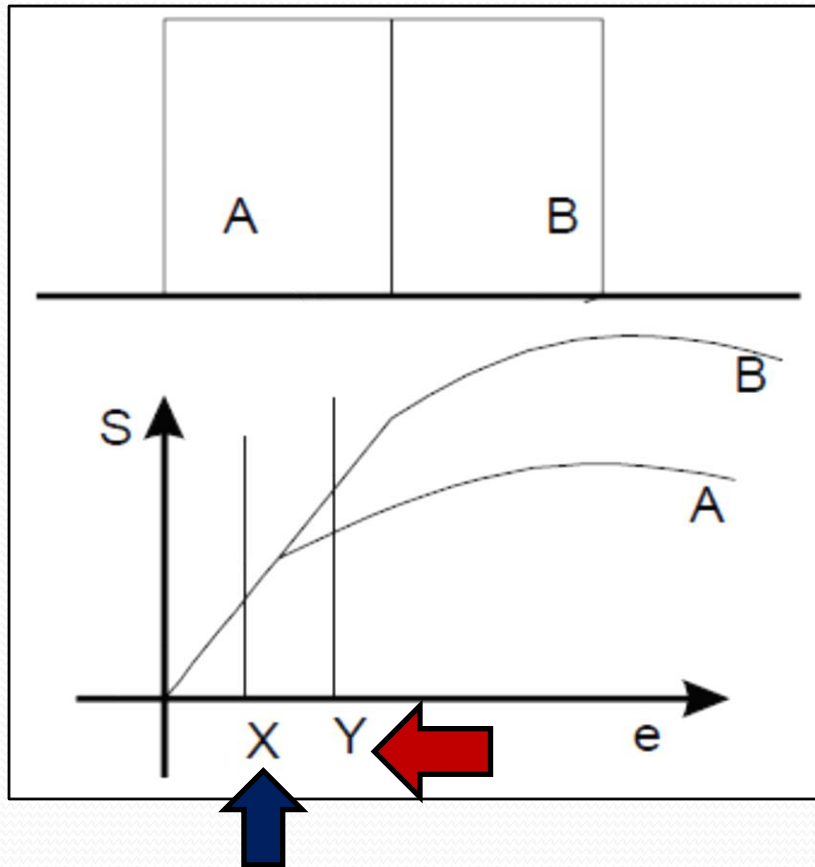
- **Tensões Residuais (TR)** são tensões que atuam num componente ou estrutura na **ausência de esforços externos**, sejam cargas mecânicas, esforços resultantes de gradientes de temperatura ou de efeitos inerciais. Portanto, pela própria definição, as **tensões residuais constituem um sistema em equilíbrio**.
- **TR são tensões secundárias;**
- **Tensões primárias: resultantes dos esforços externos e necessárias para o equilíbrio de forças e momentos;**
- **Tensões secundárias: resultantes da interação entre partes adjacentes do mesmo componente ou estrutura, que impõe restrições a deformações diferenciais localizadas;**

TENSÃO RESIDUAL

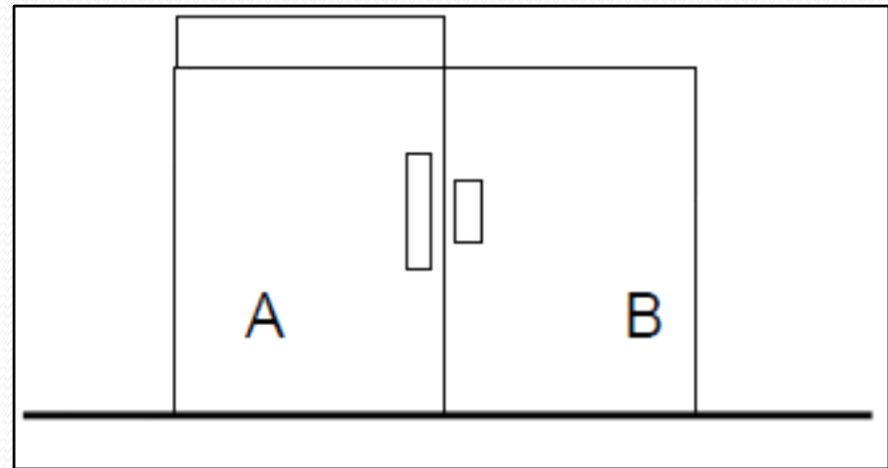
TENSÕES RESIDUAIS RESULTAM DE DEFORMAÇÕES PERMANENTES NÃO UNIFORMES NA SEÇÃO RESISTENTE DE UMA PEÇA OU ESTRUTURA.

TENSÃO RESIDUAL

MECANISMO BÁSICO DO DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES RESIDUAIS



BLOCOS A E B SOLDADOS. SOLDA DE RESISTÊNCIA INFINITA (!!!)



A DEFORMA E TENTA TRACIONAR B.
B REAGE COMPRIMENDO A.

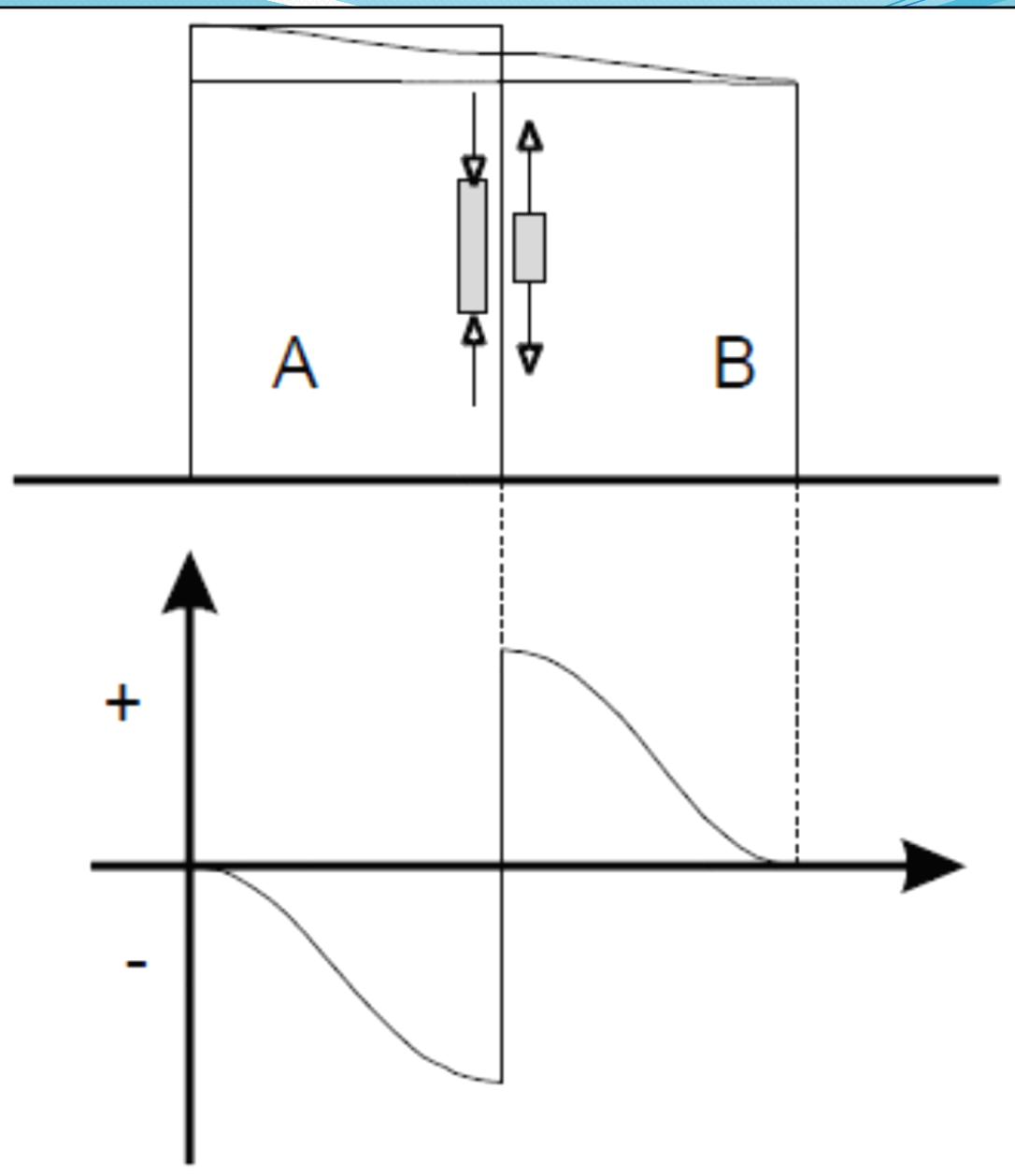
TRACIONANDO ATÉ X E DESCARREGANDO, NÃO HÁ TR.
TRACIONANDO ATÉ Y, OCORRE TR (A DEFORMA PLAST. E B NÃO).

TENSÃO RESIDUAL

O RESULTADO É:

PRÓXIMO À
INTERFACE, DO LADO
DE A, TENSÃO
RESIDUAL DE
COMPRESSÃO E DO
LADO DE B, TENSÃO
RESIDUAL DE
TRAÇÃO.

AO LONGO DO
GRÁFICO DE TR, AS
ÁREAS POSITIVAS E
NEGATIVAS DEVEM
SER IGUAIS.



TENSÃO RESIDUAL

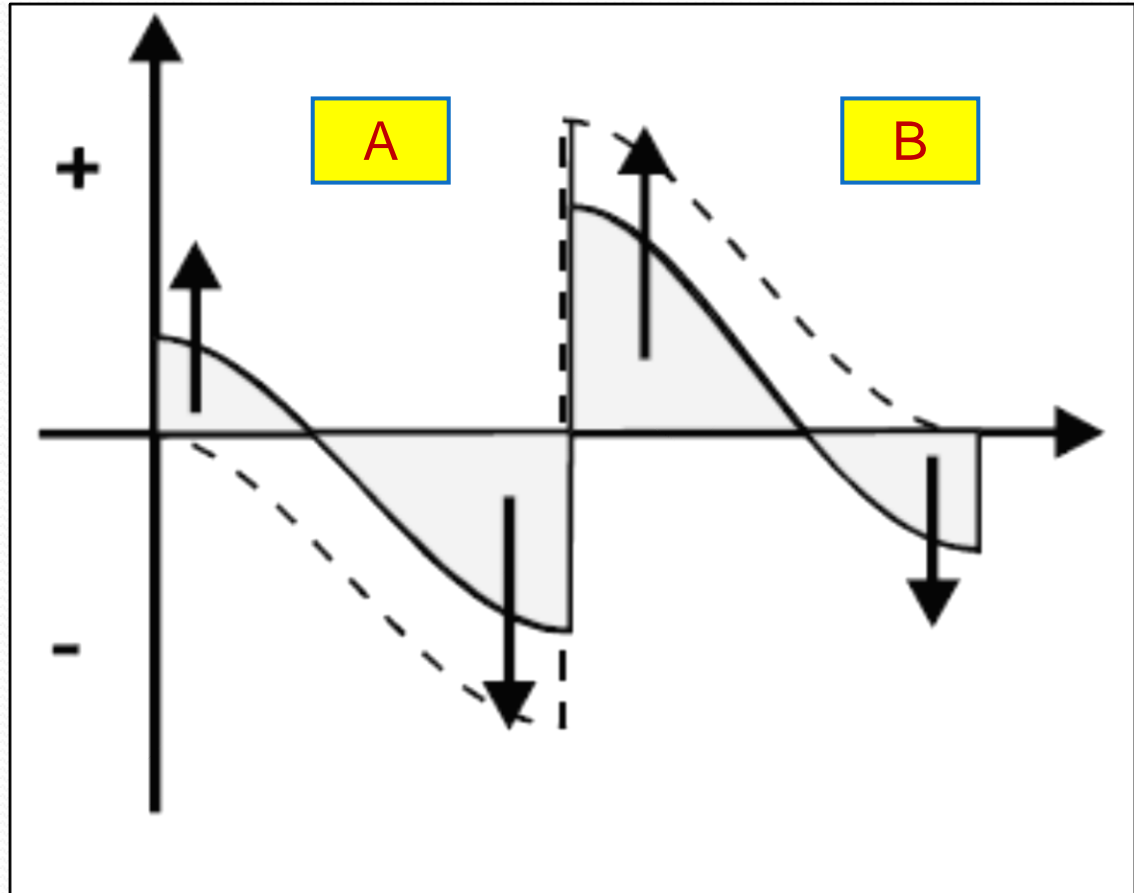
O CORRETO É:

AS ÁREAS DEVEM SER IGUAIS E DEVE HAVER EQUILÍBRIO:

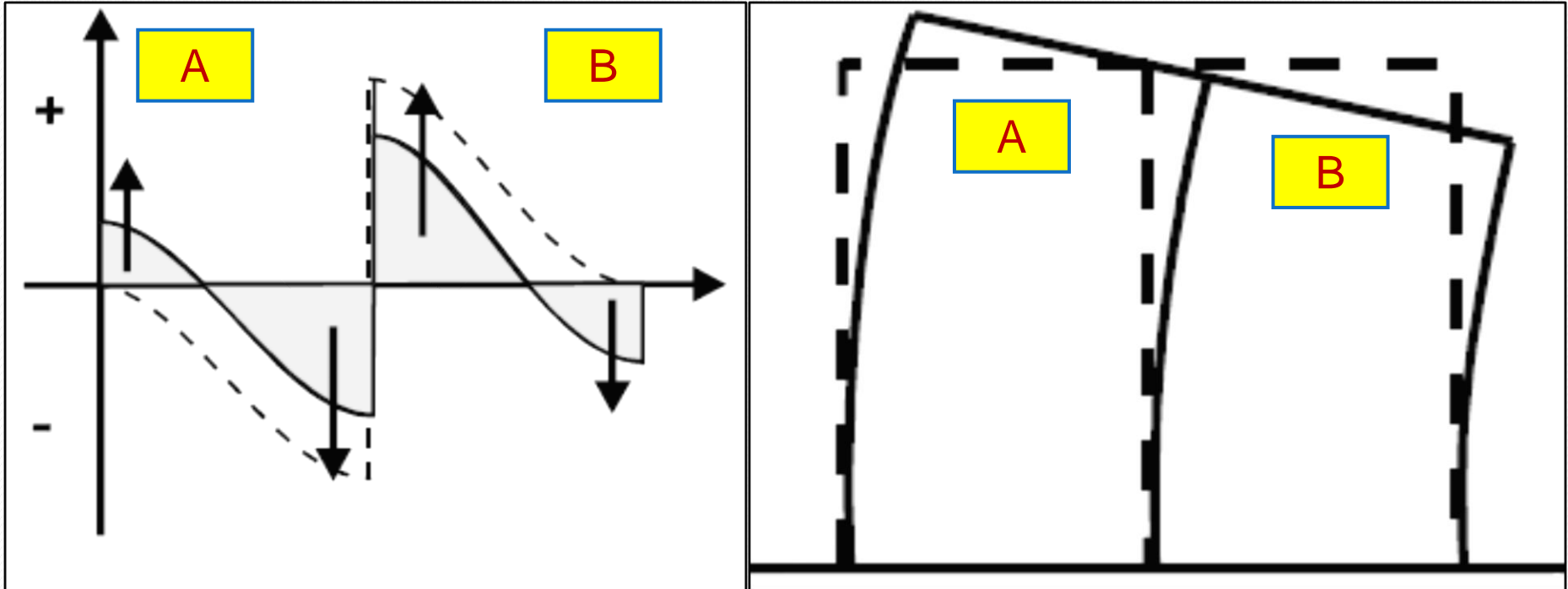
$$\Sigma F = 0, \Sigma M = 0$$

EM CADA BLOCO HÁ UM BINÁRIO: EQUILÍBRIO!

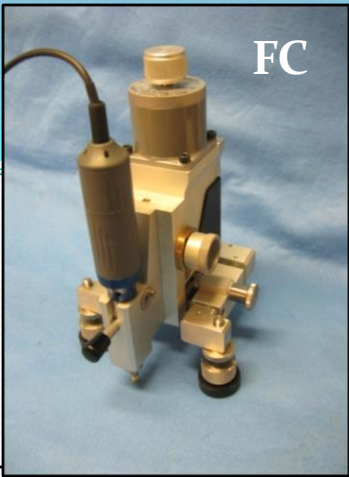
O BINÁRIO DE UM DOS LADOS DEVE SE OPOR AO OUTRO E ANULAM-SE PARA MANTER O EQUILÍBRIO.



TENSÃO RESIDUAL

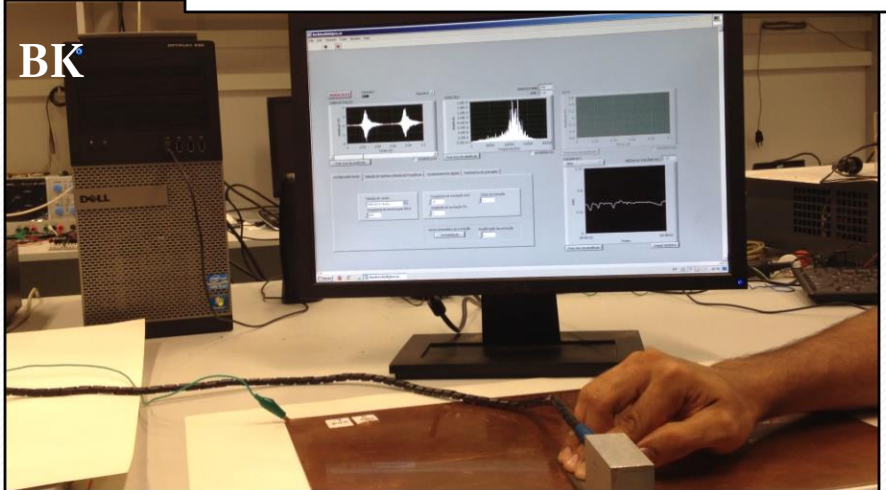
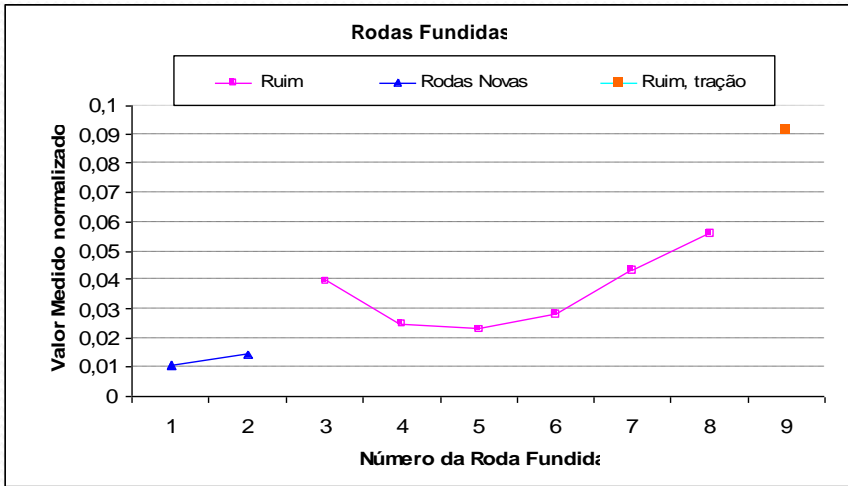
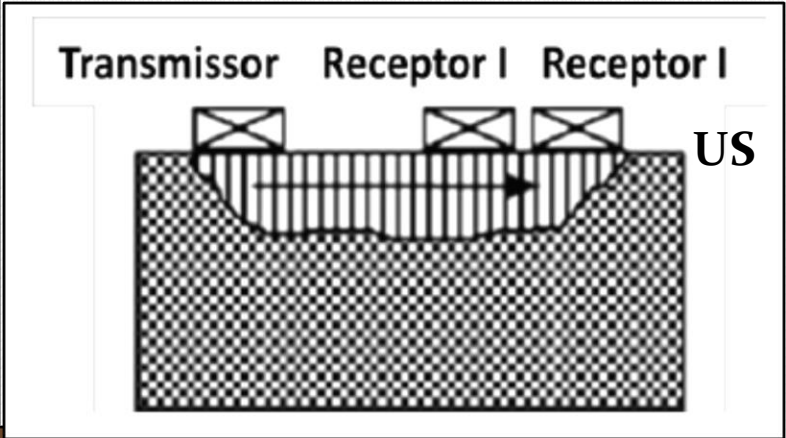
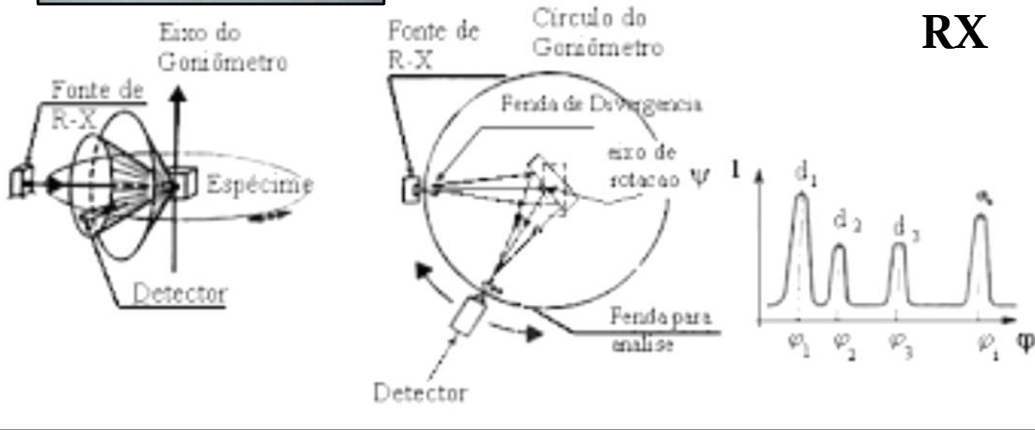


Para haver equilíbrio, a face esquerda do bloco A deverá estar tracionada longitudinalmente e a face direita do bloco B, comprimida: DEFORMAÇÃO NÃO UNIFORME= TENSÃO RESIDUAL.



MEDIDAS DE TENSÃO RESIDUAL

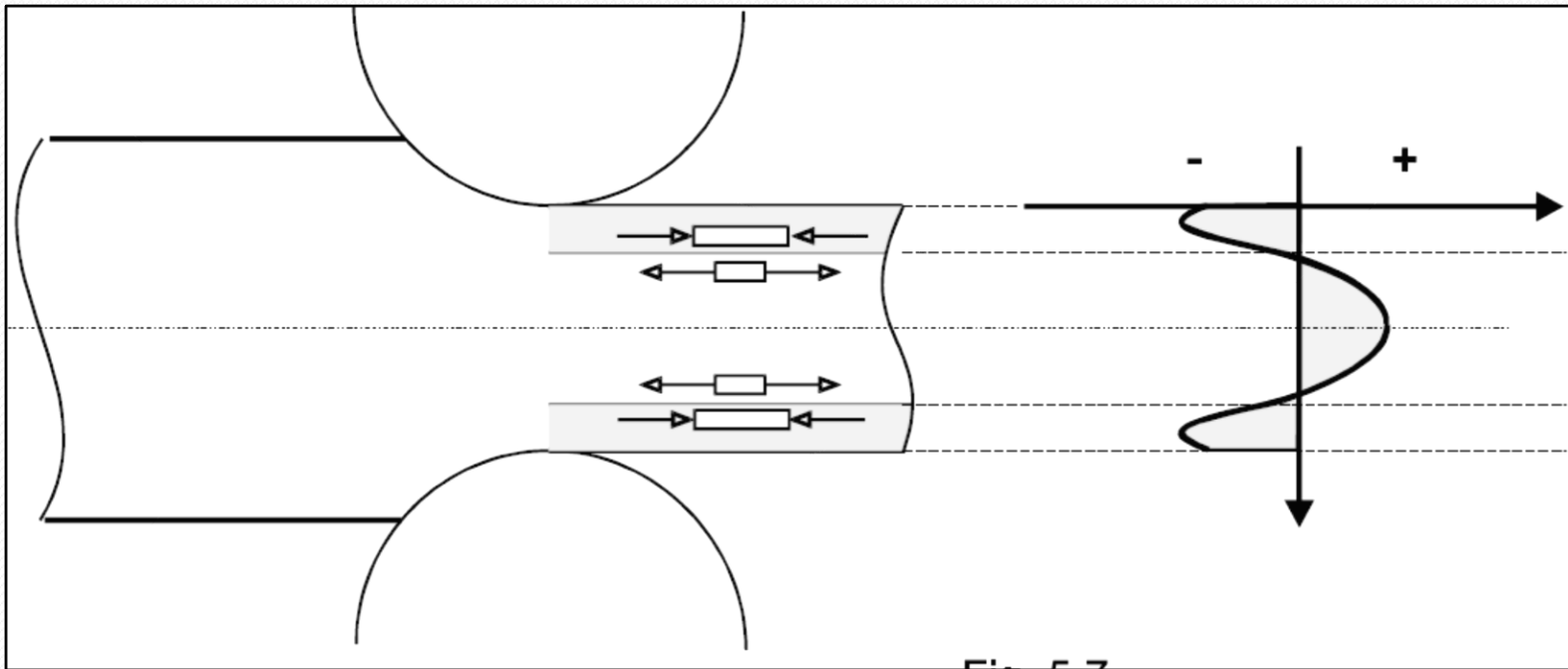
- Furo cego;
- Difração de R-X;
- Ultrassom;
- Emissão de Barkhausen.



TENSÃO RESIDUAL

TR RESULTANTES DE TRABALHO MECÂNICO A FRIO

Chapa laminada a frio (pequena redução)

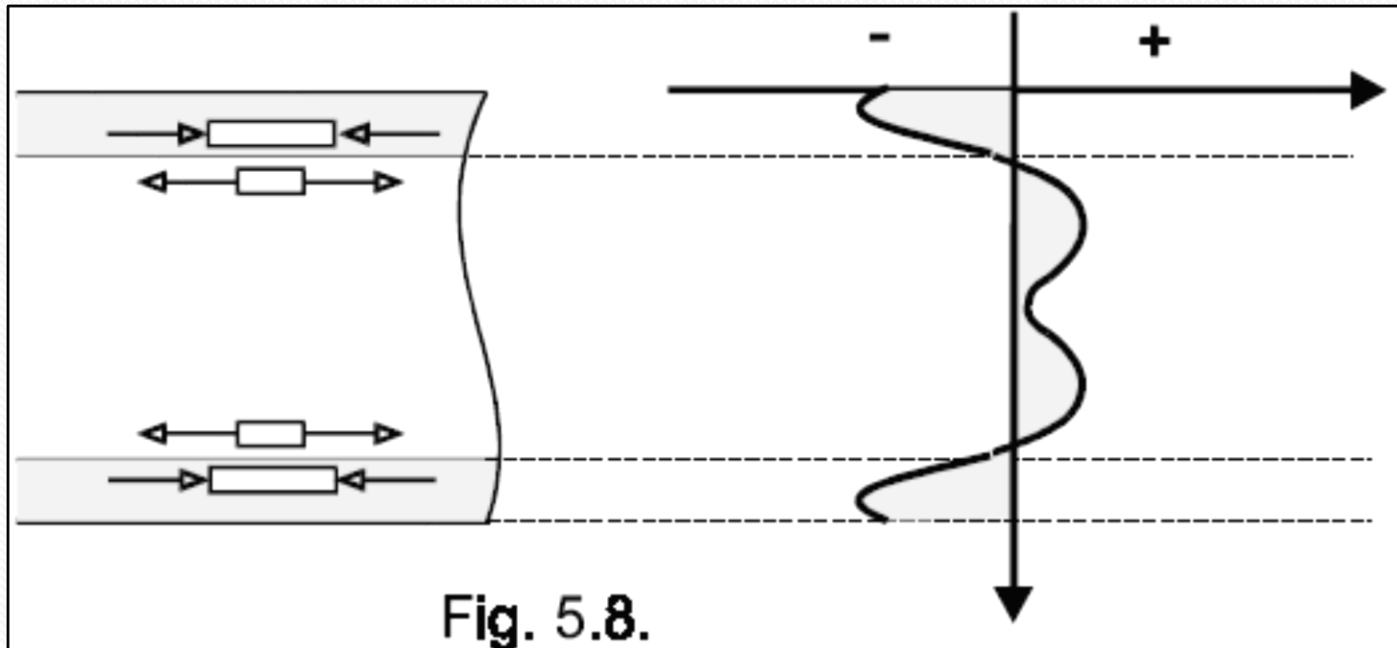


Aumenta a resistência à fadiga!

TENSÃO RESIDUAL

TR RESULTANTES DE TRABALHO MECÂNICO A FRIO

Maior espessura – tensão residual no centro diminui



TENSÃO RESIDUAL

TR RESULTANTES DE TRABALHO MECÂNICO A FRIO

Com o aumento da pressão dos cilindros– camadas mais profundas sofrerão maior deformação que as da superfície.

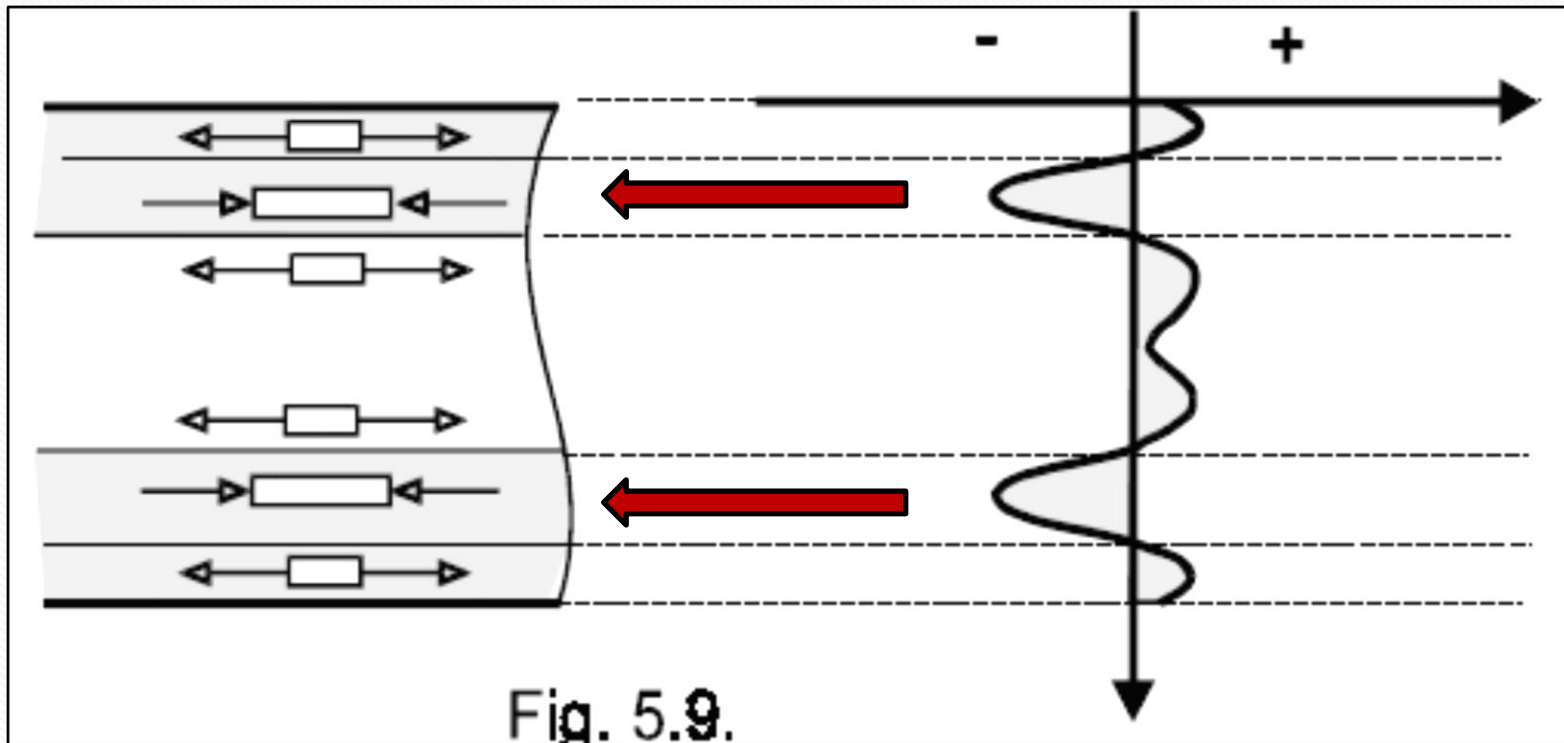


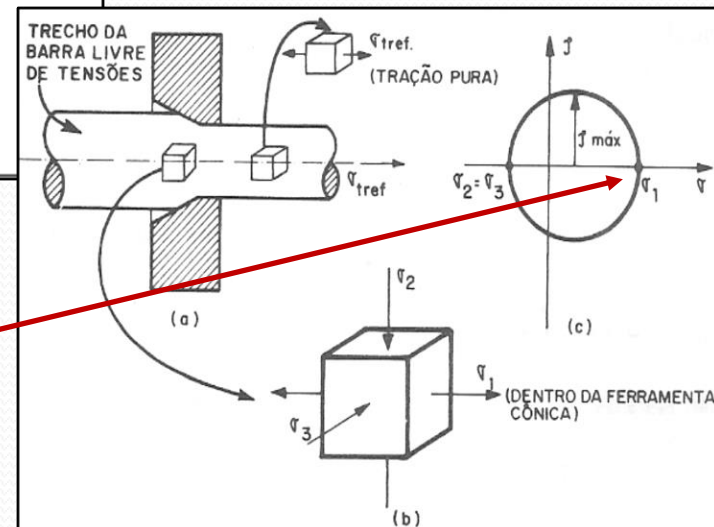
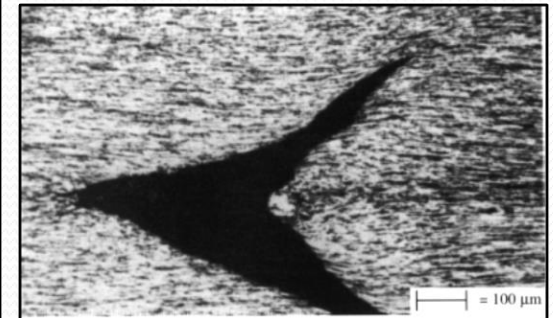
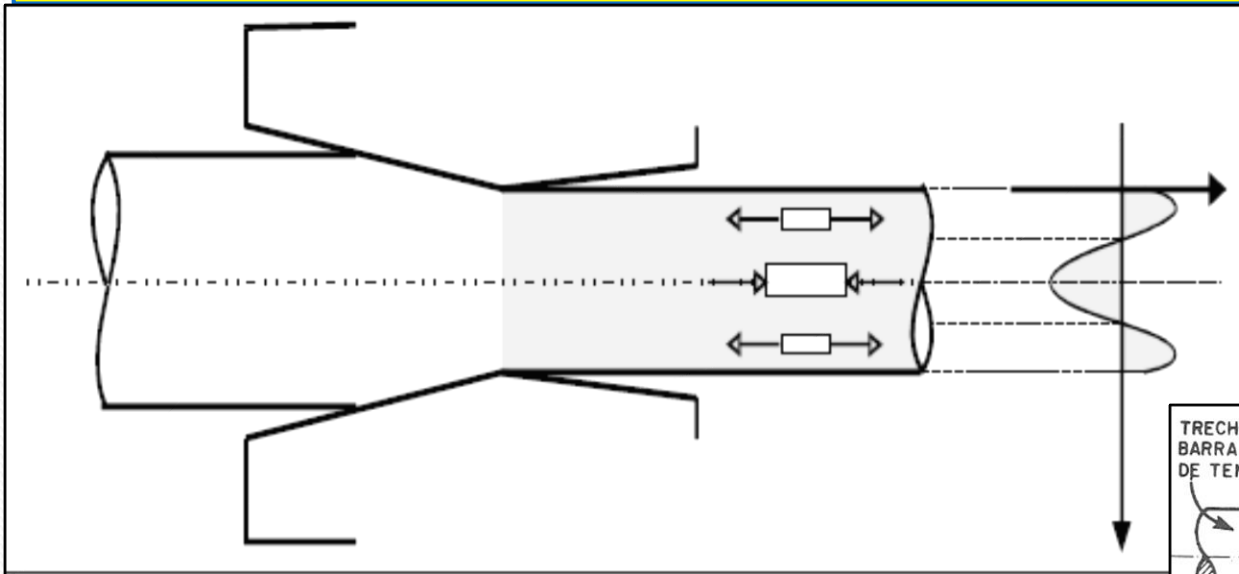
Fig. 5.9.

O resultado se inverte! Não é favorável à fadiga!

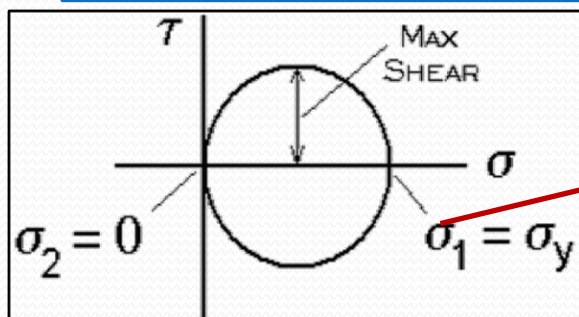
TENSÃO RESIDUAL

TR RESULTANTES DE TRABALHO MECÂNICO A FRIO

TREFILAÇÃO: NÚCLEO DEFORMA MAIS-ATRITO DA SUPERFÍCIE COM A FIEIRA

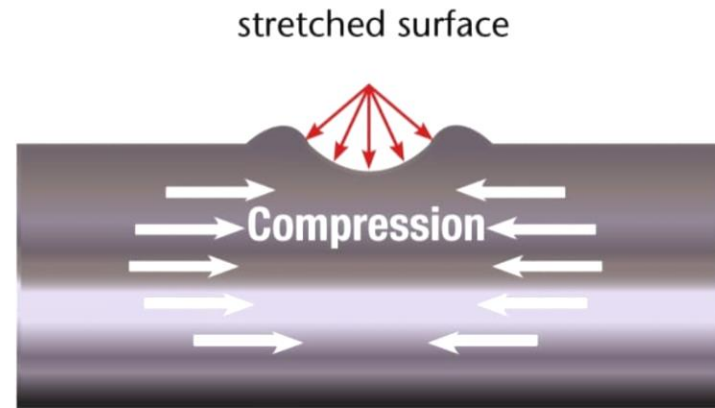
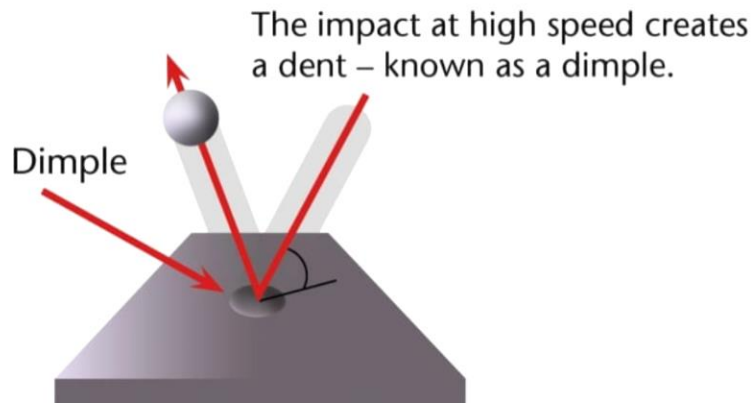


Não é favorável à fadiga!

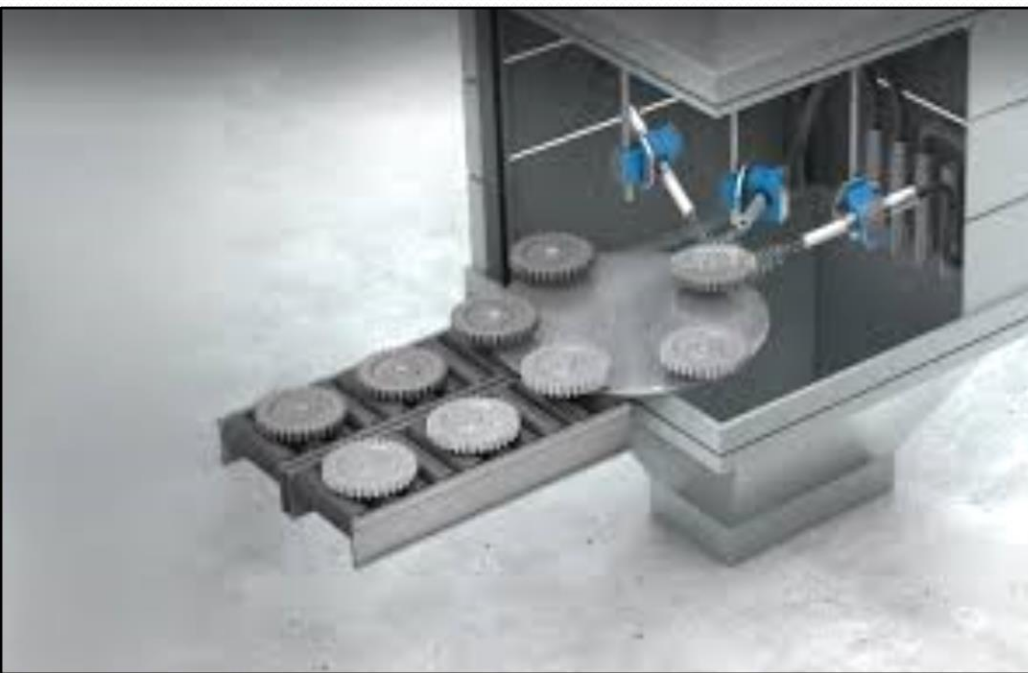


$$\sigma_1 \text{ trefilação} < \sigma_1 \text{ tração}$$

SHOT PEENING – JATO DE GRANALHA



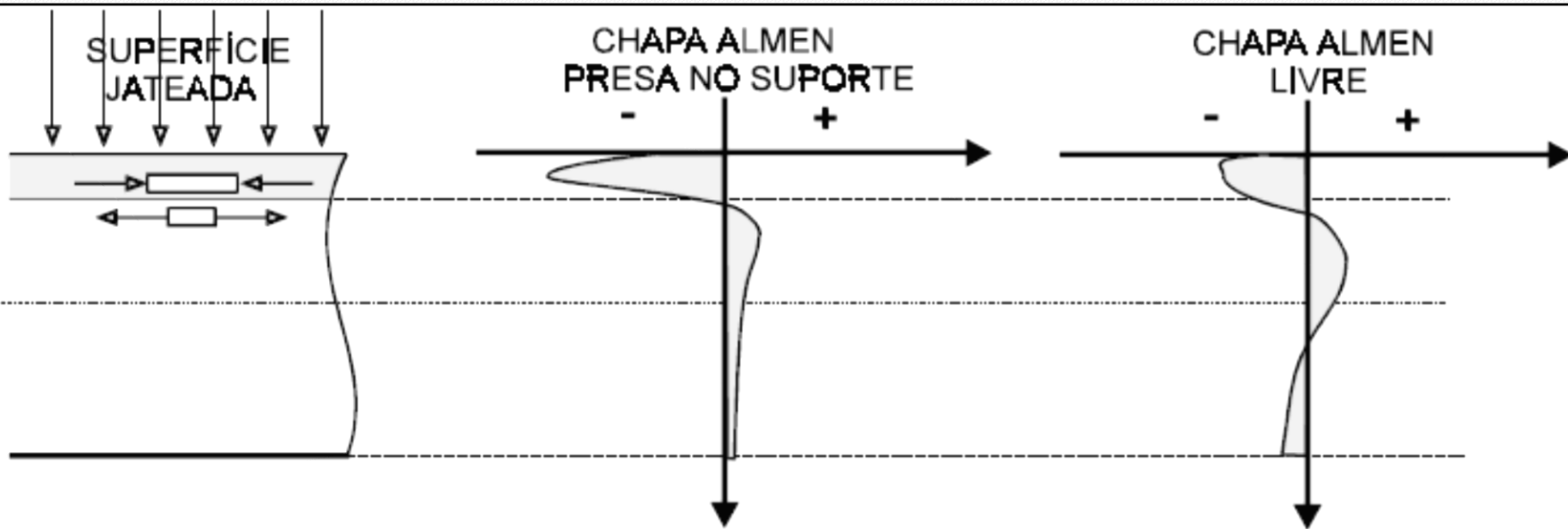
Shotpeening Process



TENSÃO RESIDUAL

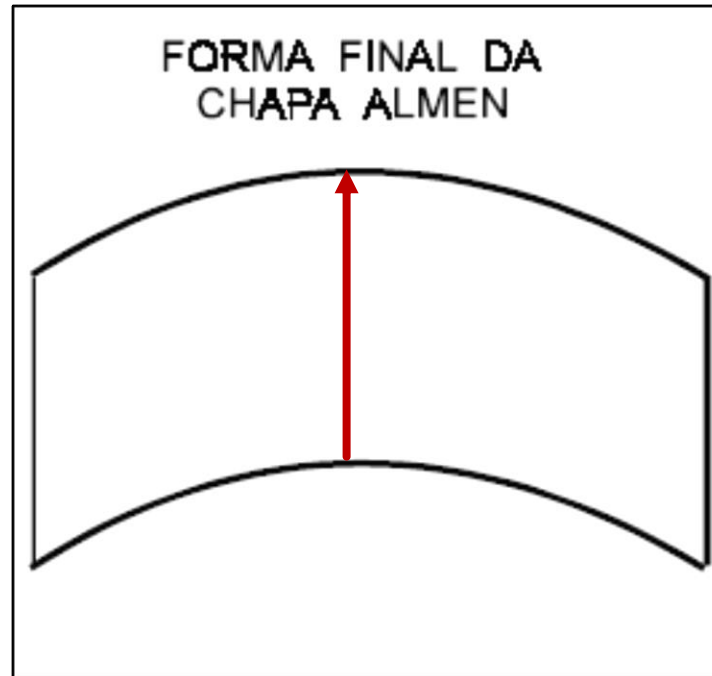
SHOT PEENING – JATO DE GRANALHA

DEFORMAÇÃO SEMELHANTE AO ENSAIO DE DUREZA

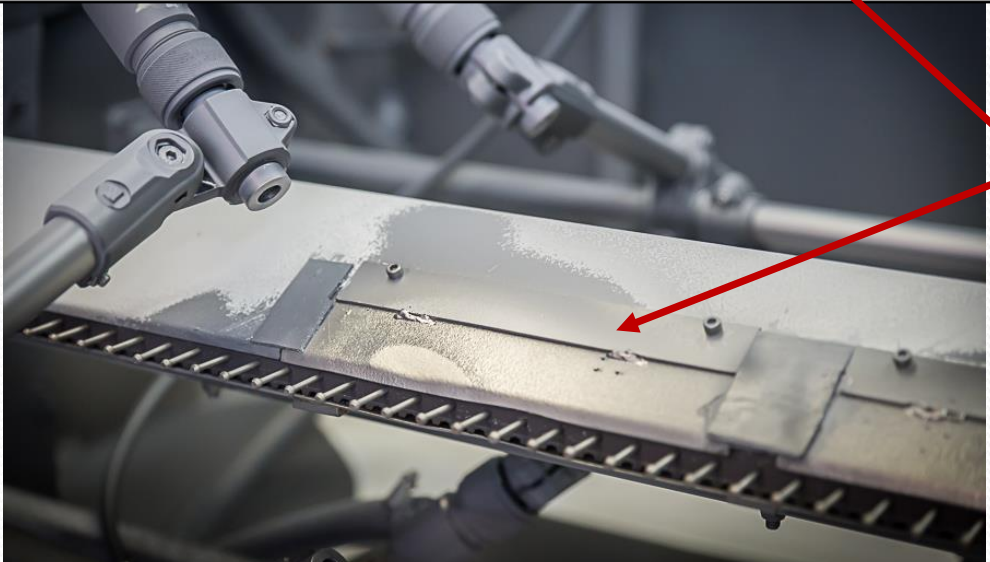
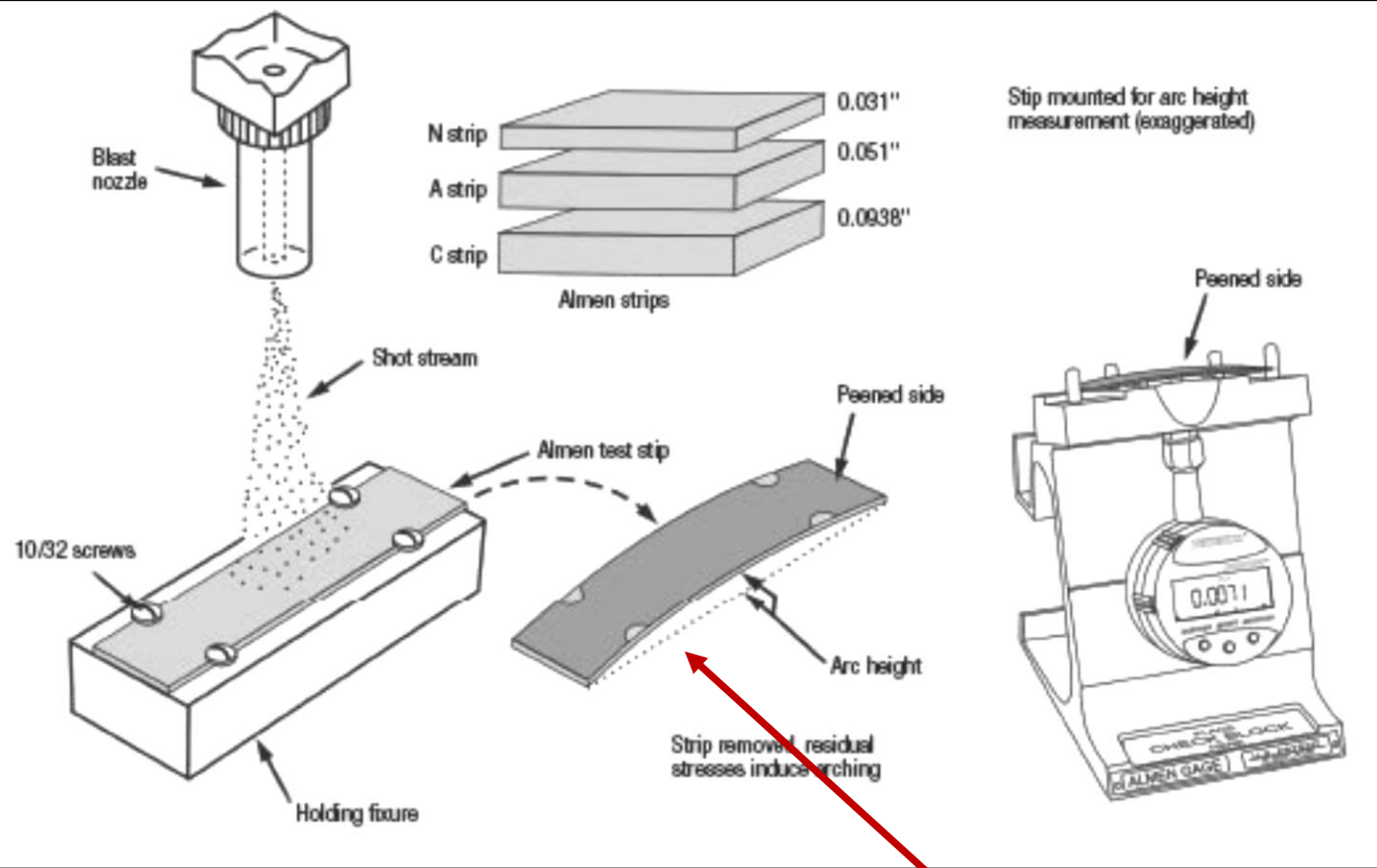


Aumenta a resistência à fadiga!

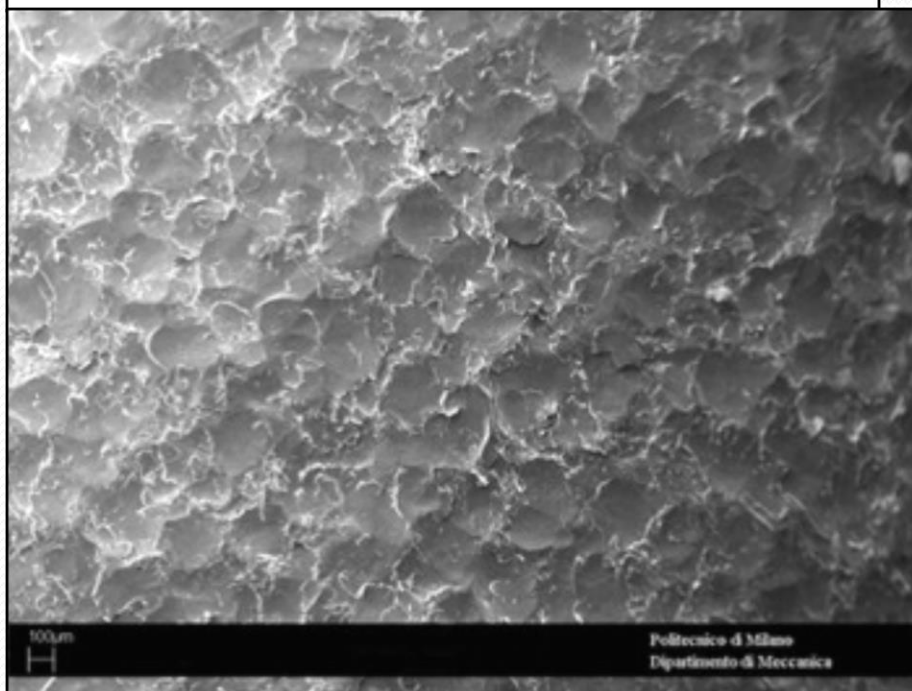
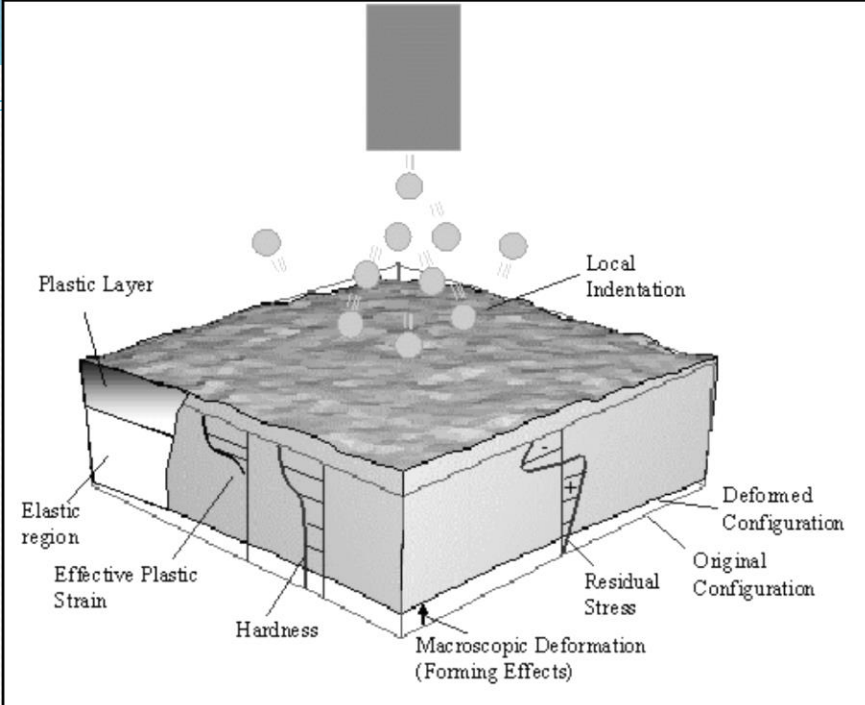
MÉTODO ALMEN

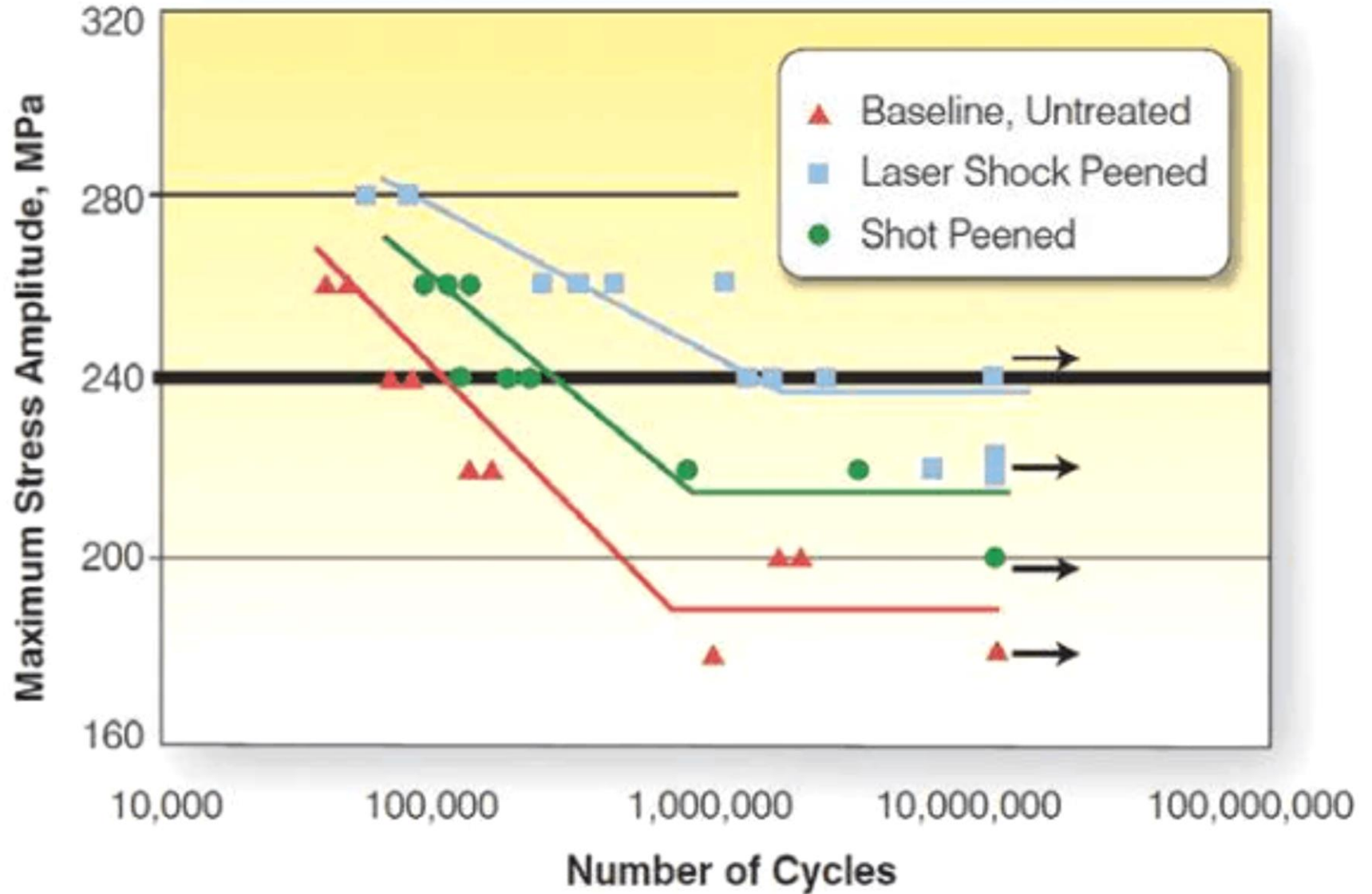


A **lâmina ALMEN** é colocado no jato, em um dispositivo. Posteriormente, a lâmina é retirada. A **intensidade** do “shot peening” é medida pela **flecha** apresentada da mesma, que se deforma para anular os binários resultantes das TR.



CHAPA ALMEN



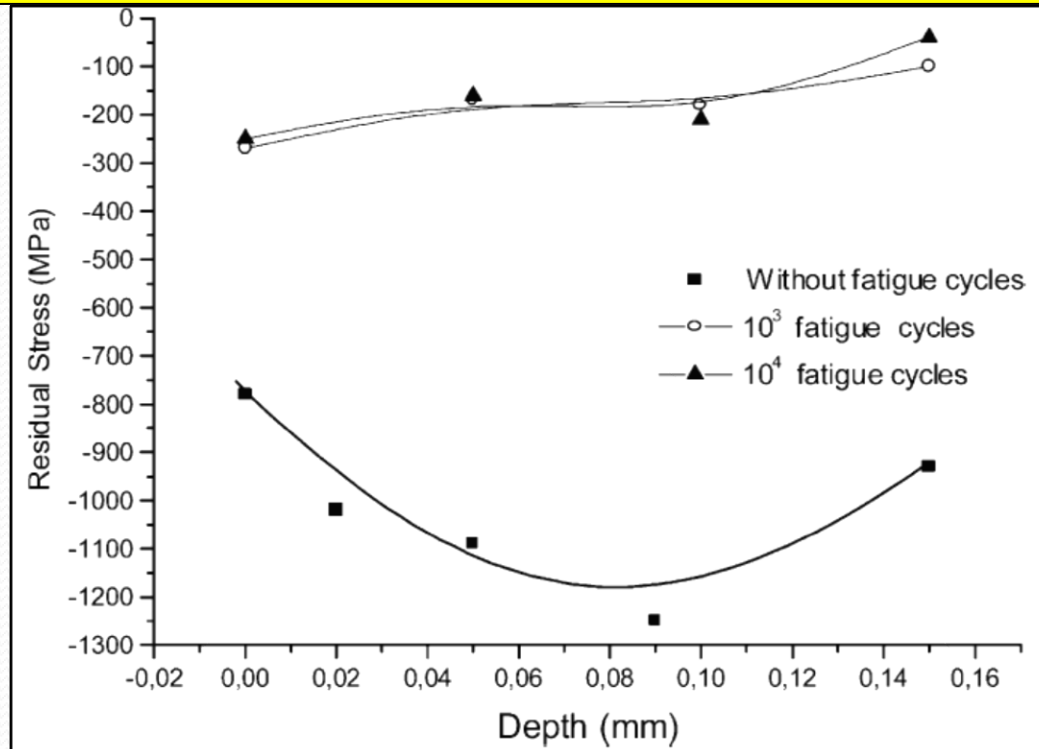


TENSÃO RESIDUAL

International Journal of Fatigue 24 (2002) 877–886

An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel

M.A.S. Torres, H.J.C. Voorwald



Em algumas situações, pode ocorrer uma **superposição** entre as **tensões residuais** do *shot peening* e as **tensões em serviço**, o que leva ao **relaxamento** das TR e o efeito do SP não é efetivo para a **vida em fadiga**.

TENSÃO RESIDUAL

International Journal of Fatigue 24 (2002) 877–886

An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel

M.A.S. Torres, H.J.C. Voorwald

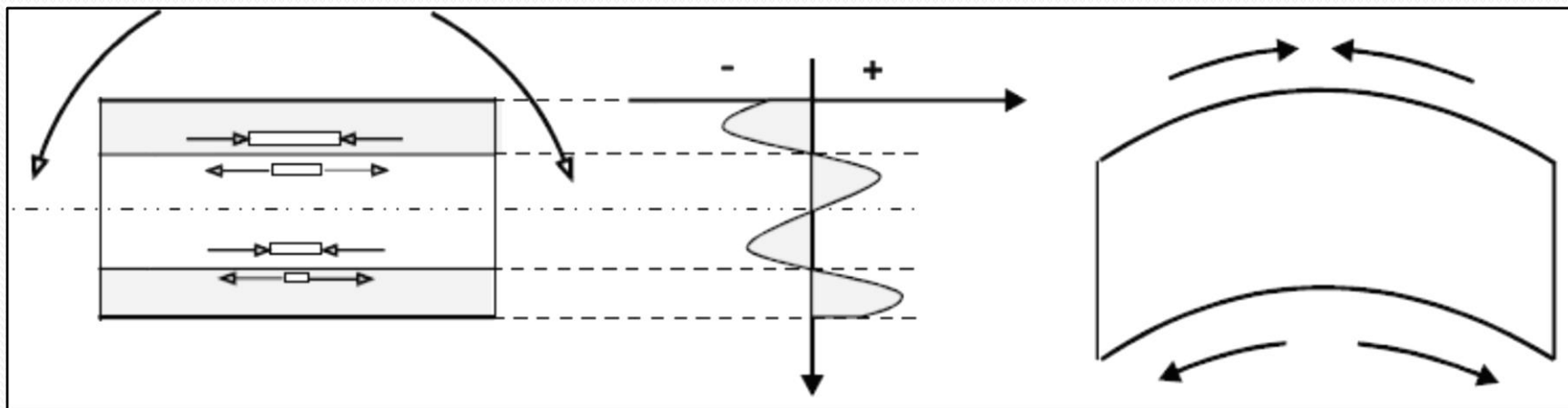
Nos ensaios de flexão rotativa, as tensões de compressão aplicadas somam-se às tensões compressivas presentes devido ao tratamento de shot peening. Se o resultado desta superposição for suficientemente grande, existe então uma deformação plástica e, conseqüentemente, uma redistribuição das tensões, causando o relaxamento do CTRC original. Com a continuidade dos ensaios, devido ao relaxamento das tensões, a soma algébrica das tensões irá diminuir. Com isso, a partir de um determinado momento, espera-se que o nível da superposição das tensões fique abaixo da tensão de escoamento cíclico do material e torne o CTRC estável.

Prof. Carlos Baptista

TENSÃO RESIDUAL

CALANDRAGEM

FABRICAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO/REATORRES QUÍMICOS, PETROQUÍMICOS, NUCLEARES.



TENSÃO RESIDUAL

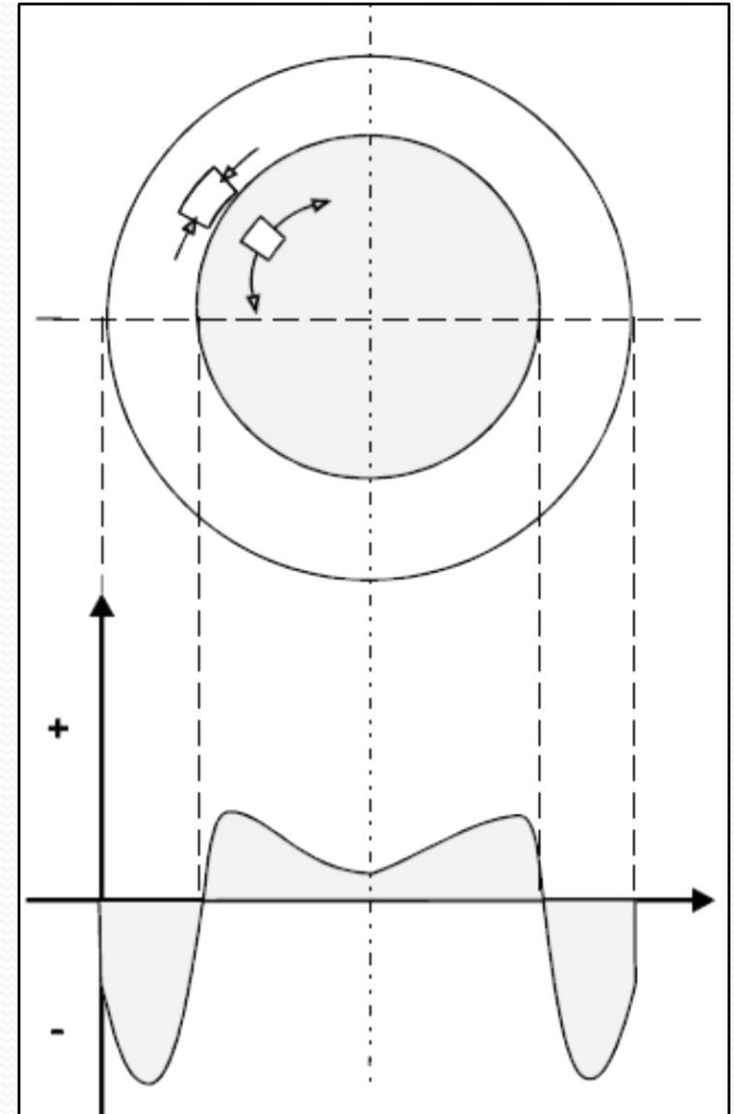
TR RESULTANTES DE EFEITOS TÉRMICOS

Gradientes de **temperatura** causam **tensões térmicas**, mas estas geram **tensões residuais somente** quando provocam **deformação plástica**.

Ex: cilindro de aço aquecido até 600°C e resfriado rapidamente em água. Tensões mais significativas:

circunferenciais —
deformação é a diminuição do perímetro (**arco**), e **não** do **raio**.

NÚCLEO ESFRIA APÓS A SUPERFÍCIE E CONTRAI. COMPRIME A SUPERFÍCIE QUE O TRACIONA

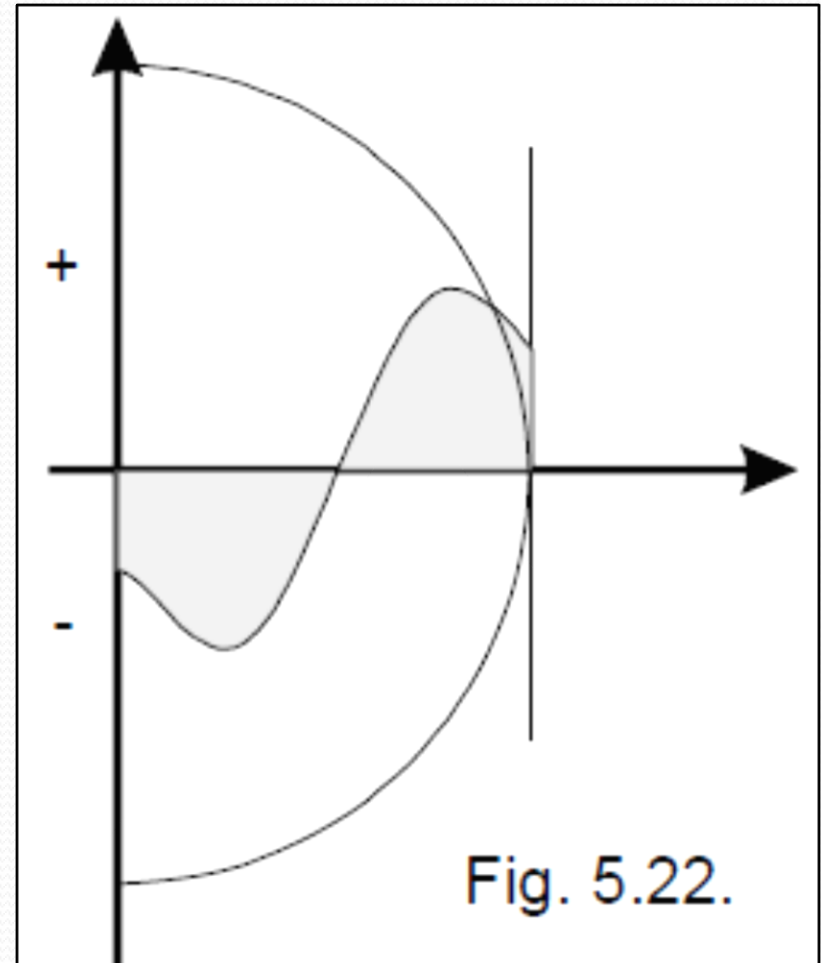


TENSÃO RESIDUAL

TR RESULTANTES DE TRANSFORMAÇÕES DE FASE

Têmpera plena

- Ocorre transformação martensítica na superfície e no núcleo;
- Ambos terão expansão;
- Quando a superfície transforma o núcleo se acomoda (plástico);
- Quando o núcleo transforma, a superfície já está fria e martensítica, sofre tração e comprime o núcleo;
- O efeito se sobrepõe ao efeito de contração do resfriamento.

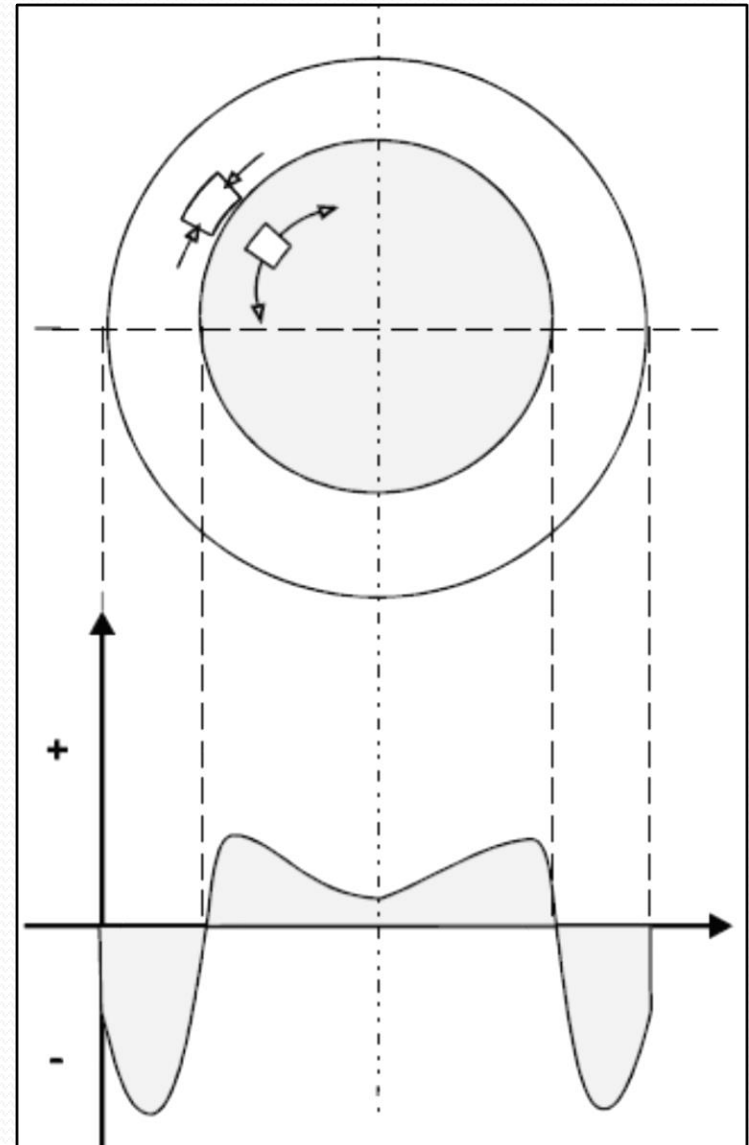


TENSÃO RESIDUAL

TR RESULTANTES DAS TRANSFORMAÇÕES DE FASES

Têmpera superficial

- **Por Indução:** a transformação martensítica ocorre na **superfície**, provoca expansão e **traciona o núcleo** que está “frio” que **comprime a superfície** (soma-se aos efeitos térmicos).
- **Aquecimento total, têmpera rasa:** transformação martensítica ocorre na superfície. No núcleo - ferrita+perlita: expansão é similar e as TRs muito baixas: prevalece o efeito térmico. EX: têmpera ao ar;
- **Aumento de espessura da camada = Têmpera total!**

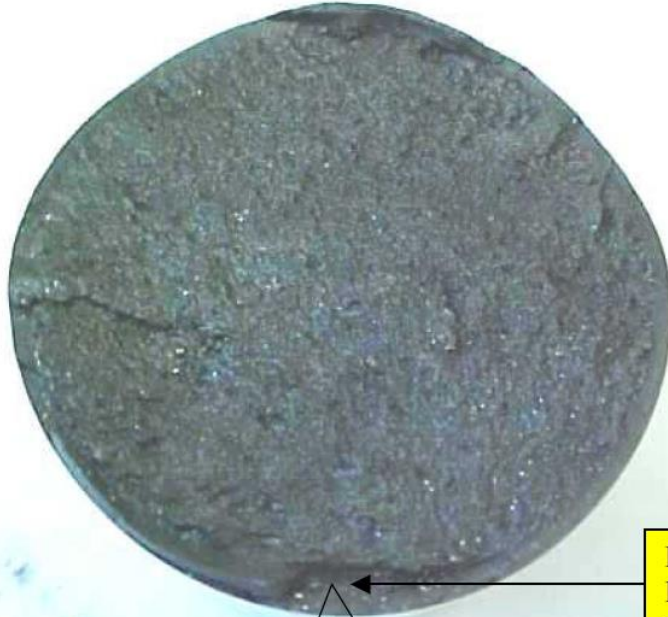




ESTUDO DE CASOS

FALHAS DE PROCESSO

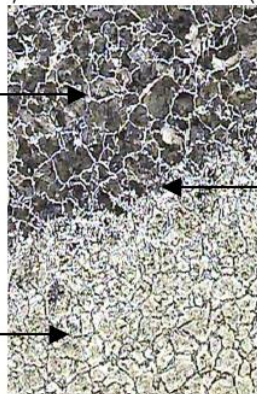
Material ABNT 1045 – laminado – redondo de 47,62mm - 2005



INÍCIO DA FRATURA NA INTERFACE DA CAMADA TEMPERADA.

FRATURA POR FADIGA INICIADA NA INTERFACE DA CAMADA TEMPERADA - SUBSUPERFICIAL

REGIÃO PERLÍTICA



INTERFACE DA CAMADA TEMPERADA. AUMENTO: 100X

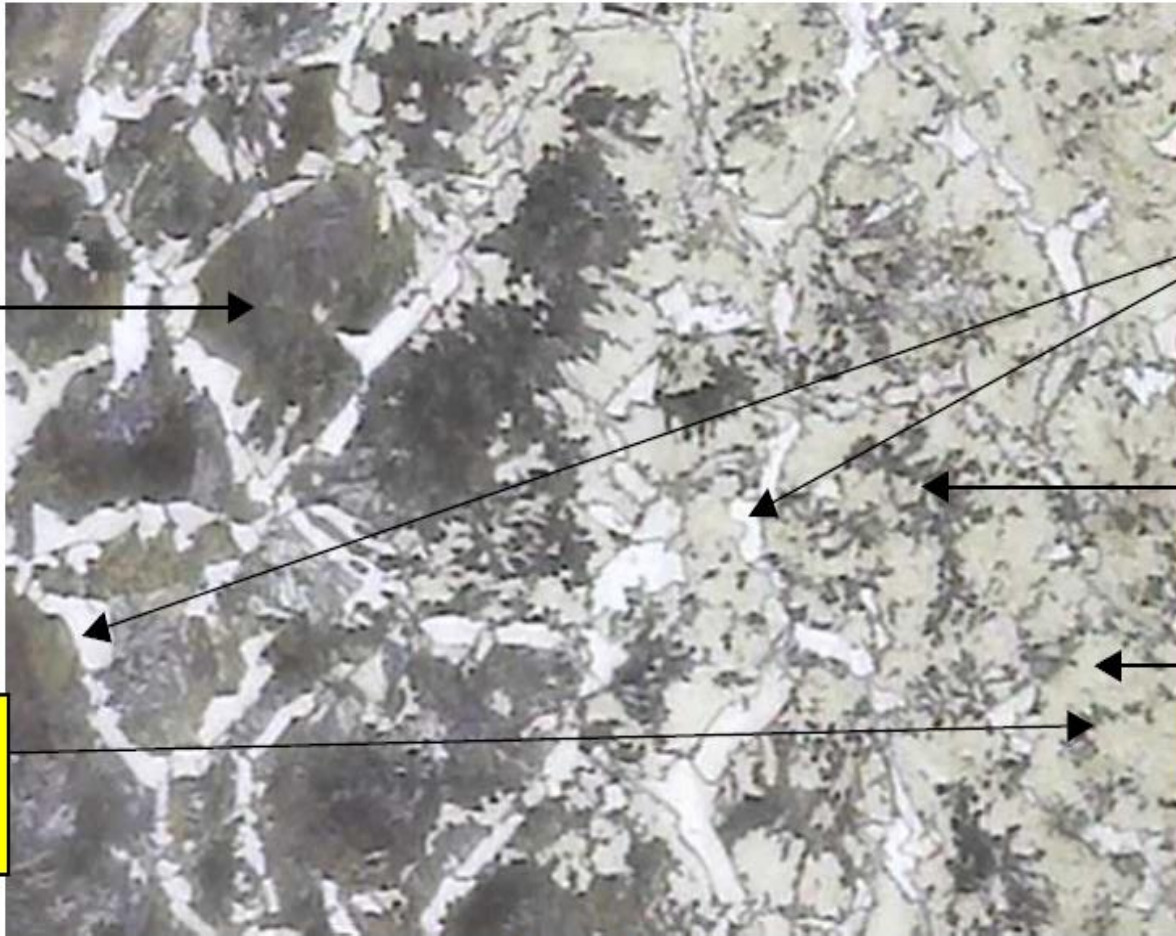
REGIÃO DA MARTENSITA REVENIDA.

FALHAS DE PROCESSO

Material ABNT 1045 – laminado – redondo de 47,62mm - 2005

PERLITA

CARBONETOS EM
CONTORNO DE
GRÃO



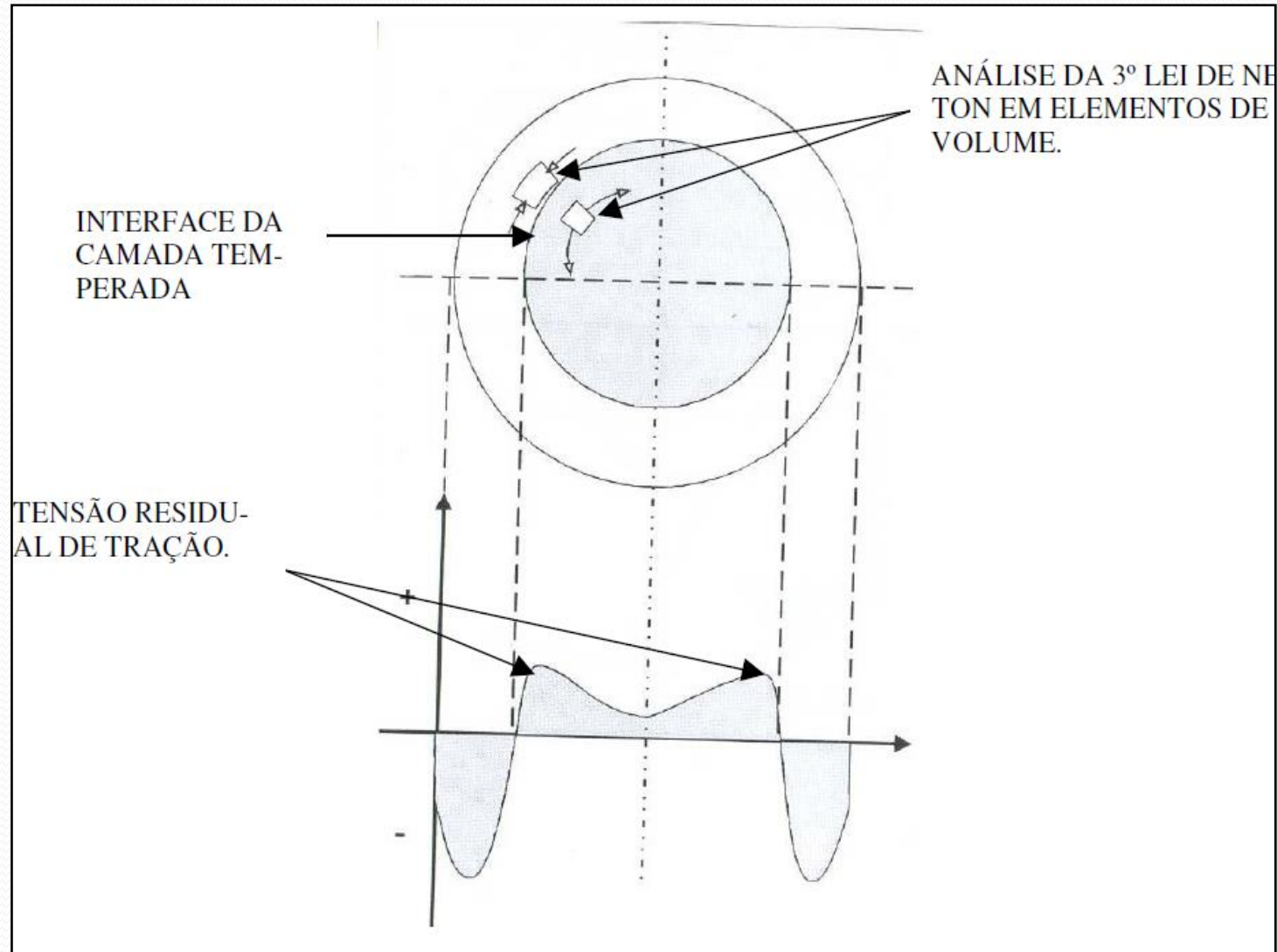
FERRITA
EM CON-
TORNO DE
GRÃO.

BAINITA

MARTENSITA
REVENIDA

FALHAS DE PROCESSO

Material ABNT 1045 – laminado – redondo de 47,62mm - 2005



FALHAS DE PROCESSO

Caso da Curva de aço ASME SA 234 WP11 CL.2-2009

HISTÓRICO

Devido à falta de fornecedores de curvas prontas foi contratado um fornecedor para conformar as peças a partir de chapas de aço ASTM A 387 – GR.11 – CL.2, com o intuito de reclassificar como ASTM A 234 WP11 – CL.2 (conforme IET 5000.00-2316-570-PPC- 001 – item 2.4.1).

As chapas foram fabricadas por laminação a quente, e posteriormente austenitizadas em 940°C, por 12 minutos, com resfriamento acelerado e revenidas em 760°C, por 33 minutos. Foram retirados corpos de prova e ensaiados, após SPWHT de 3 ciclos de 85 minutos em 690°C a 700°C.

Resultado do ensaio de impacto das chapas depois do SPWHT

Tabela 3 – Resultado do ensaio de impacto a -18°C.

Corpo-de-Prova	Resultados obtidos em Joules
CP 01	334
CP 02	339
CP 03	336
Média	336

Caso da Curva de aço ASME SA 234 WP11 CL.2-2009



Caso da Curva de aço ASME SA 234 WP11 CL.2-2009

As curvas foram conformadas a quente, normalizadas e revenidas, e posteriormente, após soldagem de união, foram submetidas ao PWHT. Das curvas forjadas, foram retirados “coupons”, que foram submetidos ao SPWHT de 04 ciclos de 105 minutos em 690°C a 700°C e, em seguida, foram usinados, os corpos de prova e ensaiados.

Resultado do ensaio de impacto das curvas depois do SPWHT

Tabela 6 – Resultados do ensaio de impacto

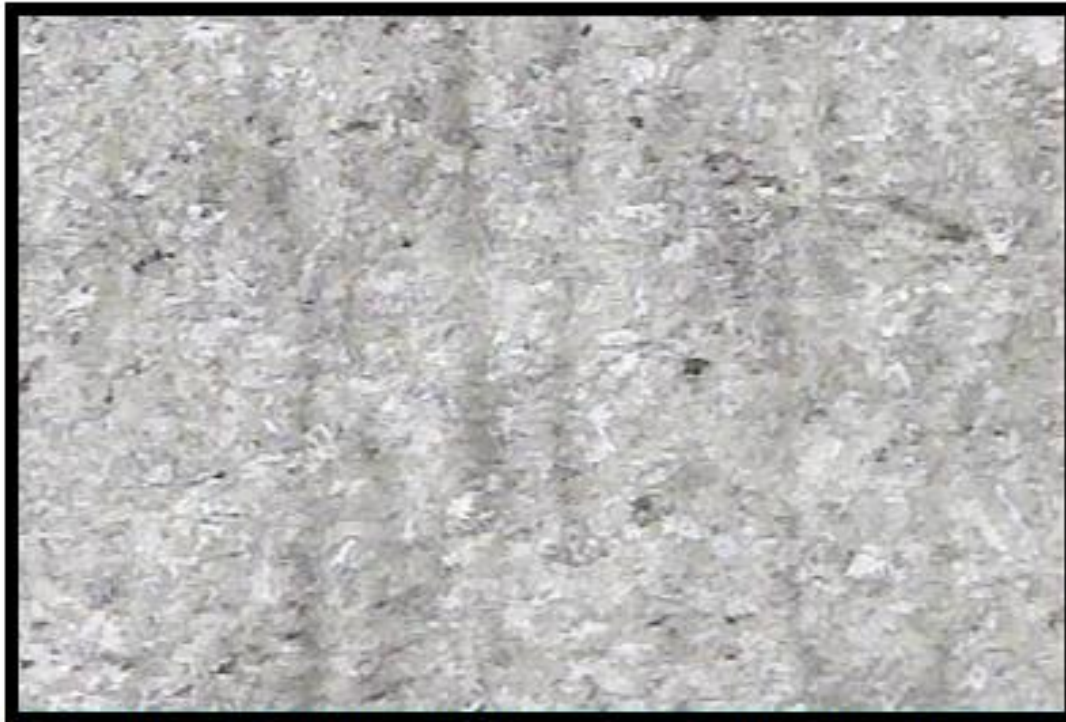
Corpo de prova	Energia absorvida (J)
1	21
2	142
3	87

Caso da Curva de aço ASME SA 234 WP11 CL.2-2009



Micrografia – análise de microestrutura e tamanho de grão do CP1(21J). Ferrita, perlita e bainita, tamanho de grão 5/6. Aumento 100X . Ataque: Nital3%.

Caso da Curva de aço ASME SA 234 WP11 CL.2-2009



- Micrografia – análise de microestrutura da chapa. Martensita revenida. Aumento 100X
.Ataque: Nital 3%.

Caso da Curva de aço ASME SA 234 WP11 CL.2-2009

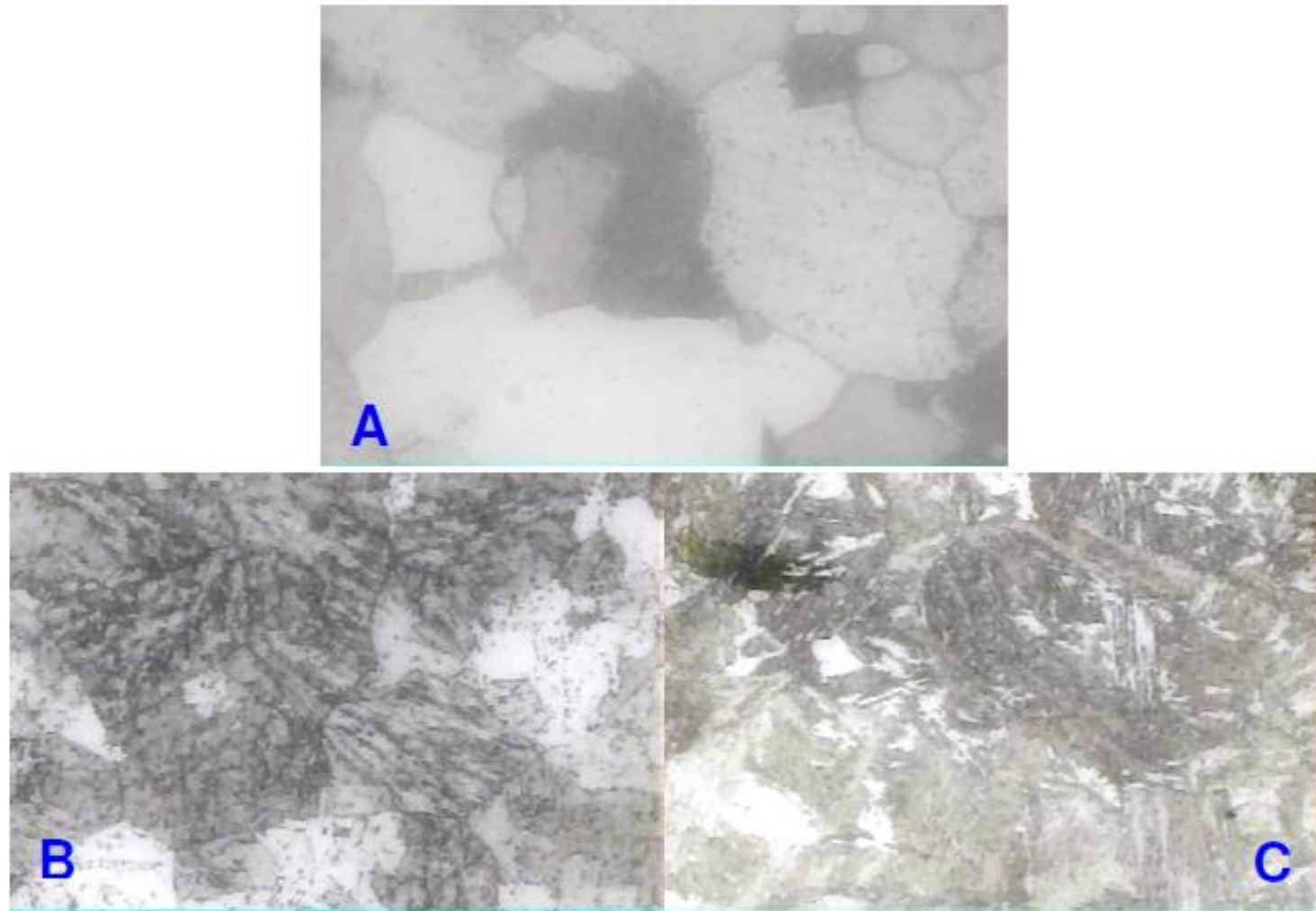


Figura 13 –A) Curva normalizada: ferrita, perlita e bainita. B) Resfriada ao ar e revenida: martensita revenida e ferrita, com áreas de bainita. C) Resfriada em água e revenida: martensita revenida, bainita e pequenas áreas de ferrita. Ataque: nital 3%. Aumento 200 vezes.

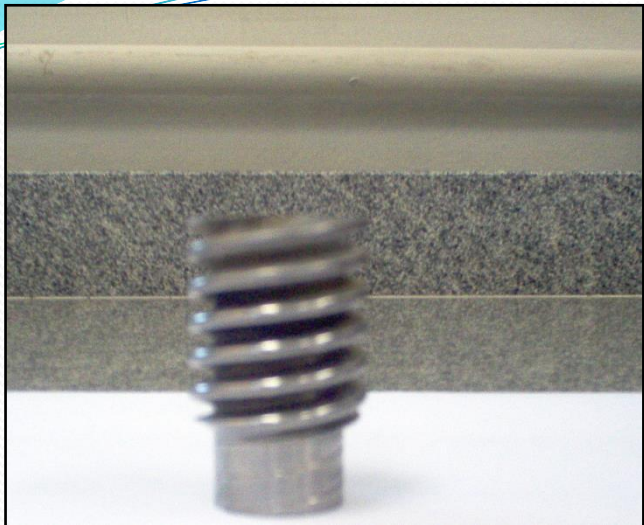
Caso da Curva de aço ASME SA 234 WP11 CL.2-2009

**RESULTADOS DO ENSAIO DE IMPACTO DE AMOSTRAS
DAS CURVAS COM NORMALIZAÇÃO E RESFRIAMENTO
AO AR FORÇADO COM ASPERSÃO DE ÁGUA.**

CP	E(J)
1	228
2	239
3	215

FALHAS DE PROCESSO

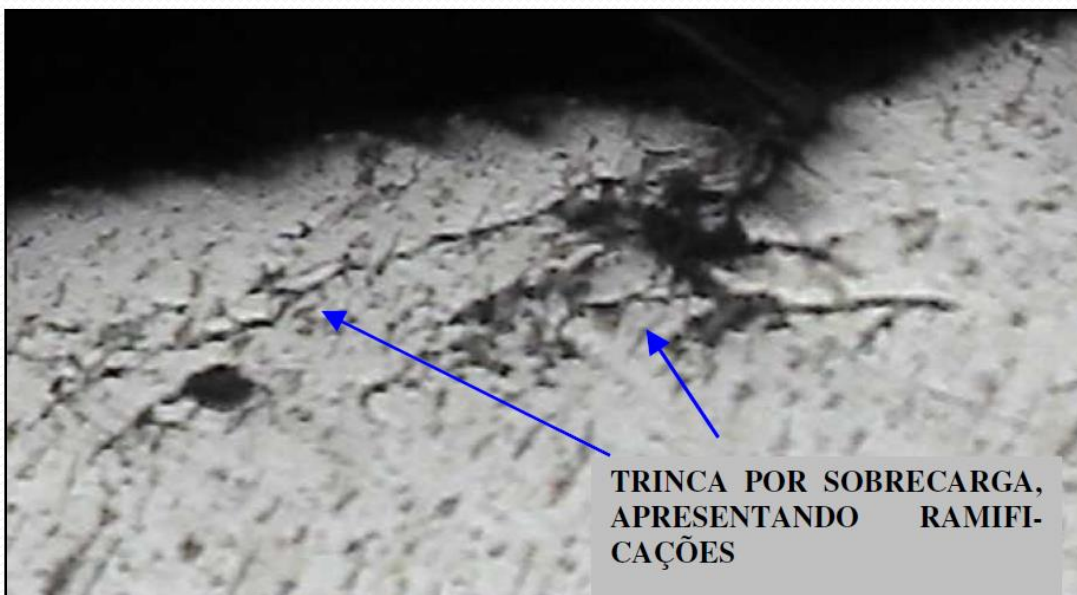
Material ABNT 1213/ DIN 9SMn28 Rd.
22,22mm trefilado



- A. química-OK;
- Microestrutura-OK;
- Inclusões – OK;
- Dureza-OK;

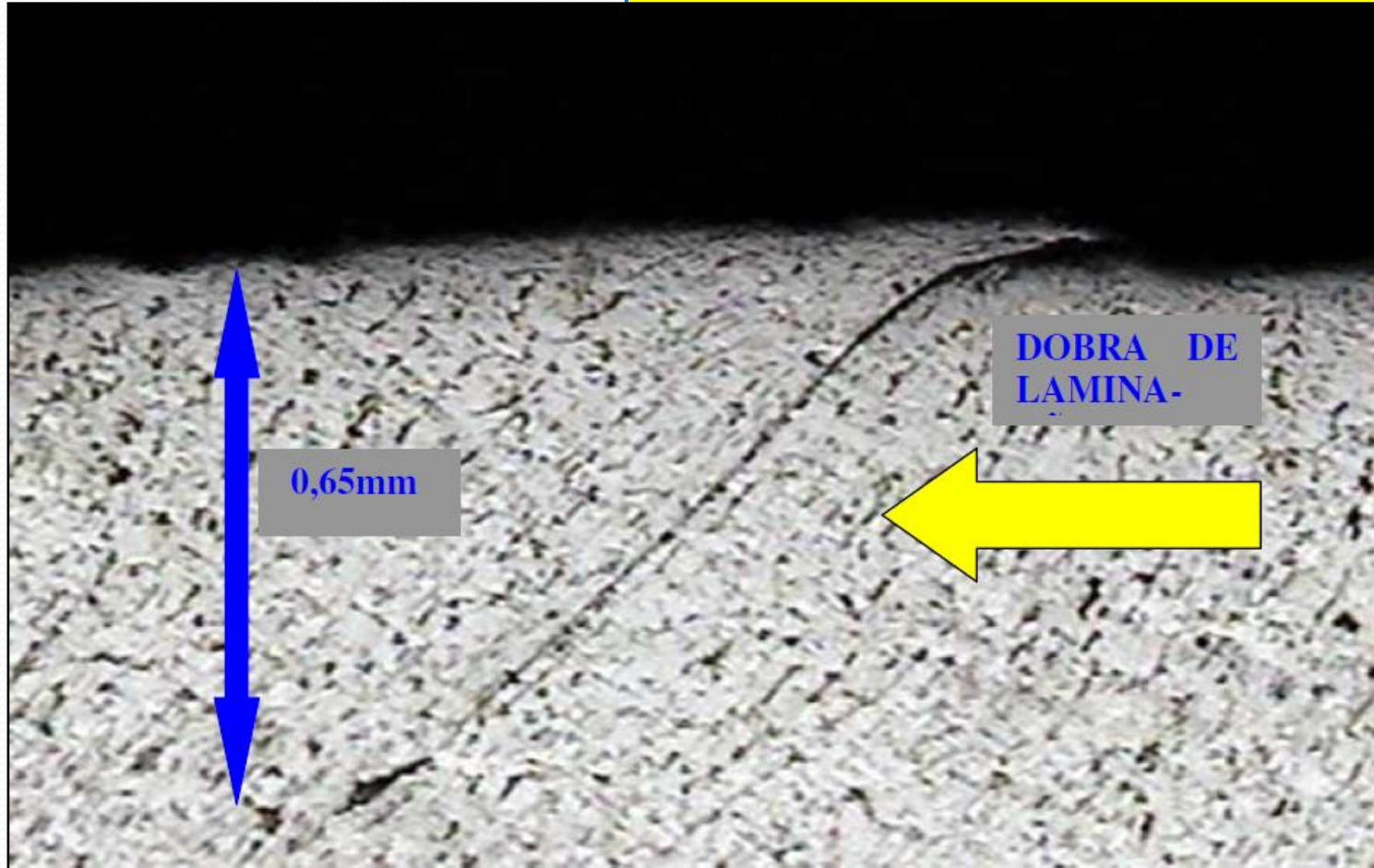


**BOA DISTRIBUIÇÃO E
FORMA DE SULFETOS
PARA UM AÇO
RESSULFURADO.**



FALHAS DE PROCESSO

Material ABNT 1213/ DIN 9SMn28 Rd.
22,22mm trefilado

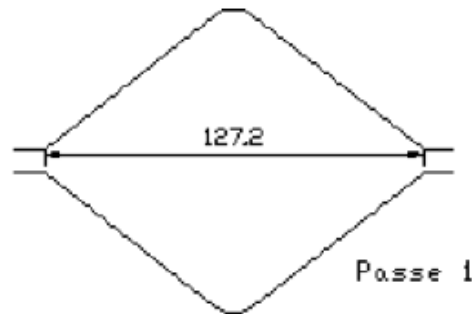


DOBRA DE LAMINAÇÃO – NÃO SE VISUALIZA A DESCARBONETAÇÃO POIS O AÇO É DE BAIXO CARBONO E QUASE TODO FORMADO DE FERRITA.

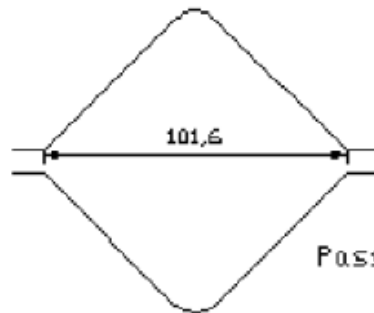
LAMINAÇÃO-CALIBRAÇÃO

O modelo de Ekelund para o cálculo do alargamento:

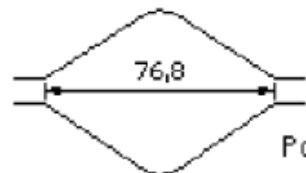
$$b_1^2 - b_0^2 = 8 \times m \times ld \times \Delta h - 4 \times m \times (h_0 + h_1) \times ld \times \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)$$



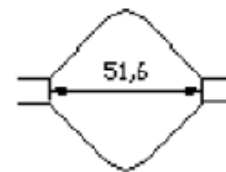
Passe 1



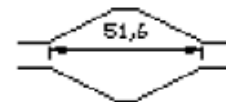
Passe 2



Passe 3



Passe 4



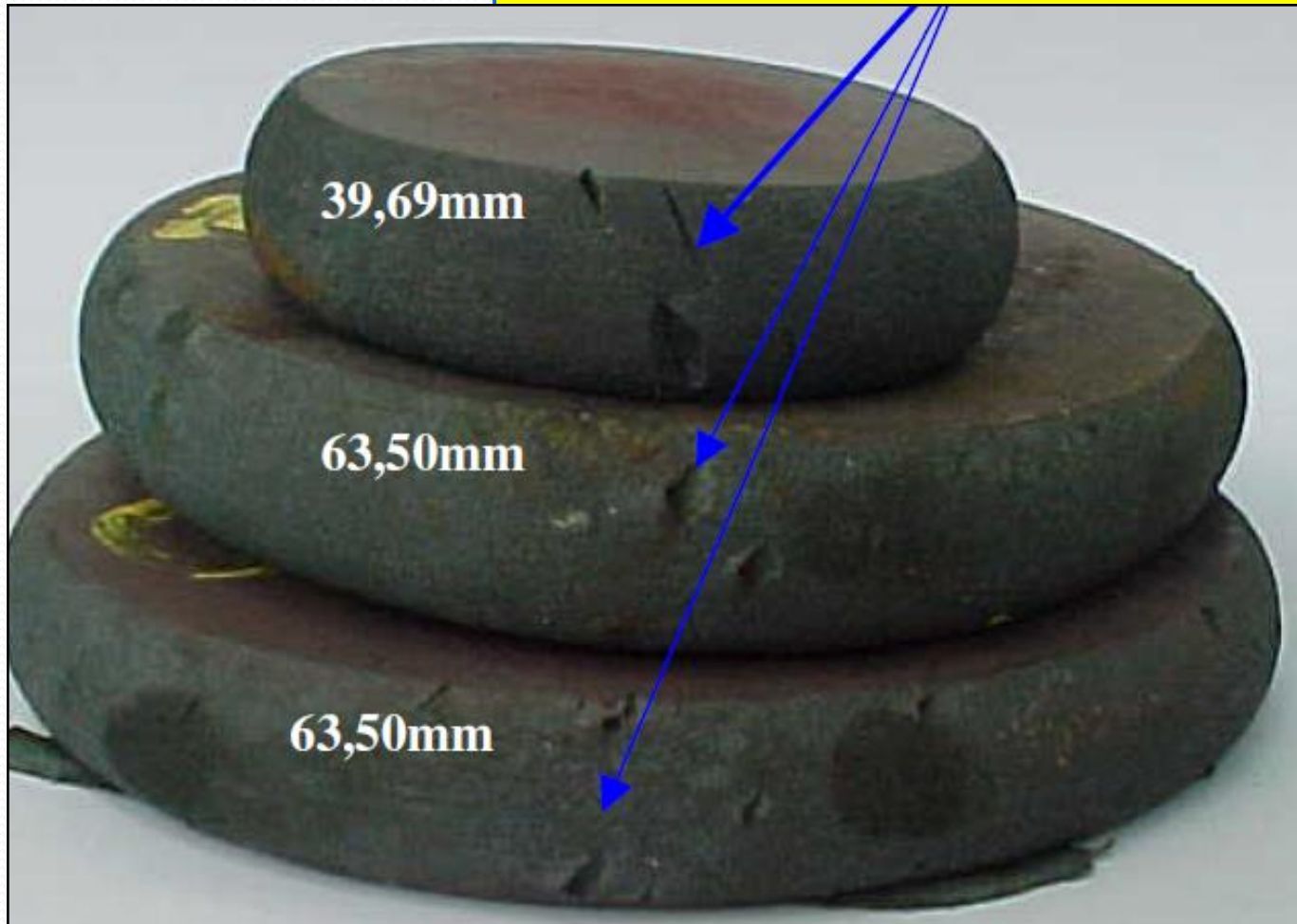
Passe 5



Passe 6

FALHAS DE PROCESSO

DETECÇÃO DA DOBRA DE LAMINAÇÃO DURANTE O PROCESSO, POR ENSAIO DE RECALQUE.



FALHAS DE PROCESSO

Parafuso Fraturado – ABNT 1045 – temperado e revenido -2005

FRATURARAM DURANTE A MONTAGEM DO EQUIPAMENTO



FALHAS DE PROCESSO

Parafuso Fraturado – ABNT 1045 – temperado e revenido -2005

Dobra de forjamento

Marcas de praia fadiga

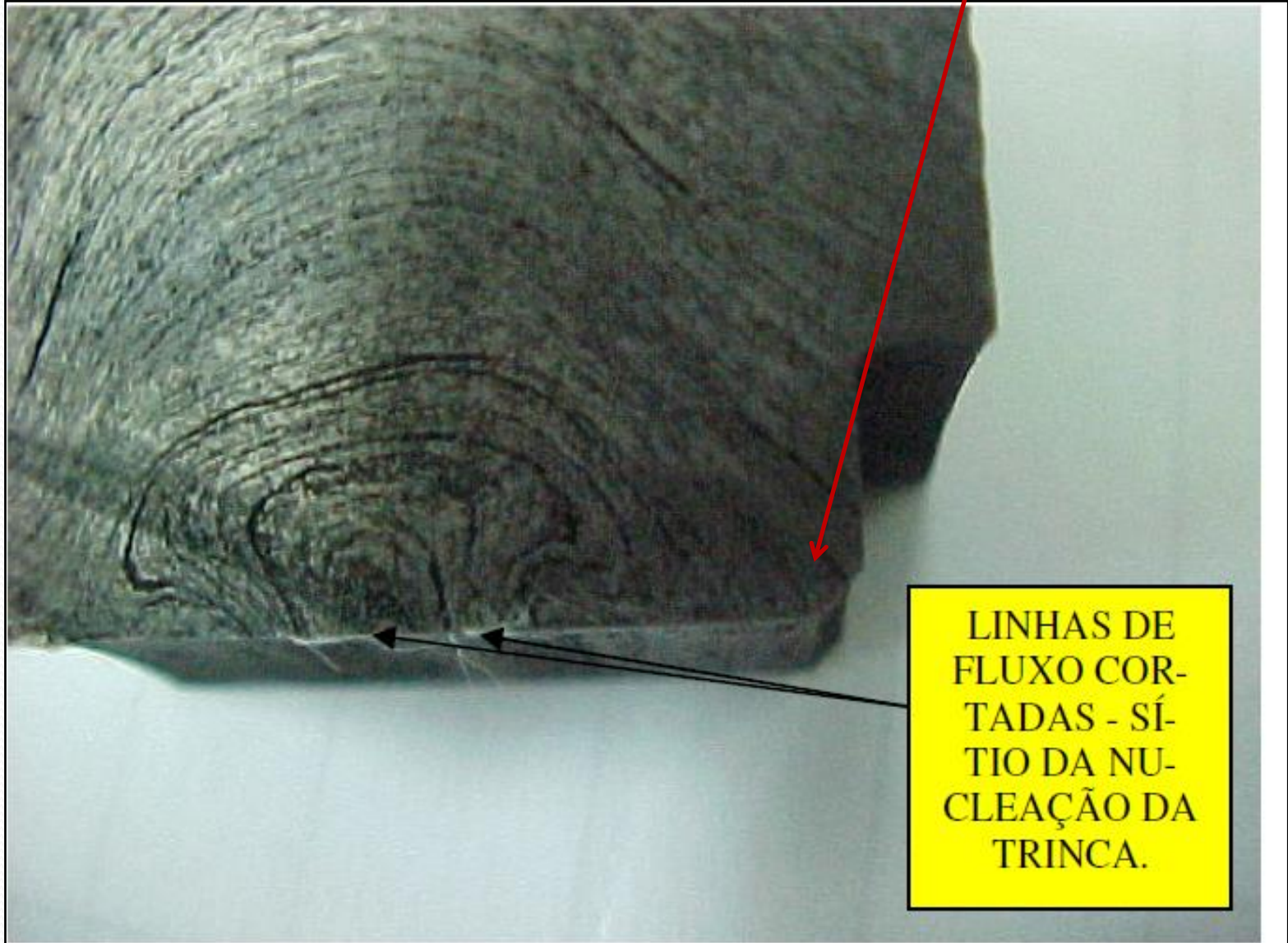


FALHAS DE PROCESSO

Parafuso Fraturado – ABNT 1045 – temperado e revenido -2005

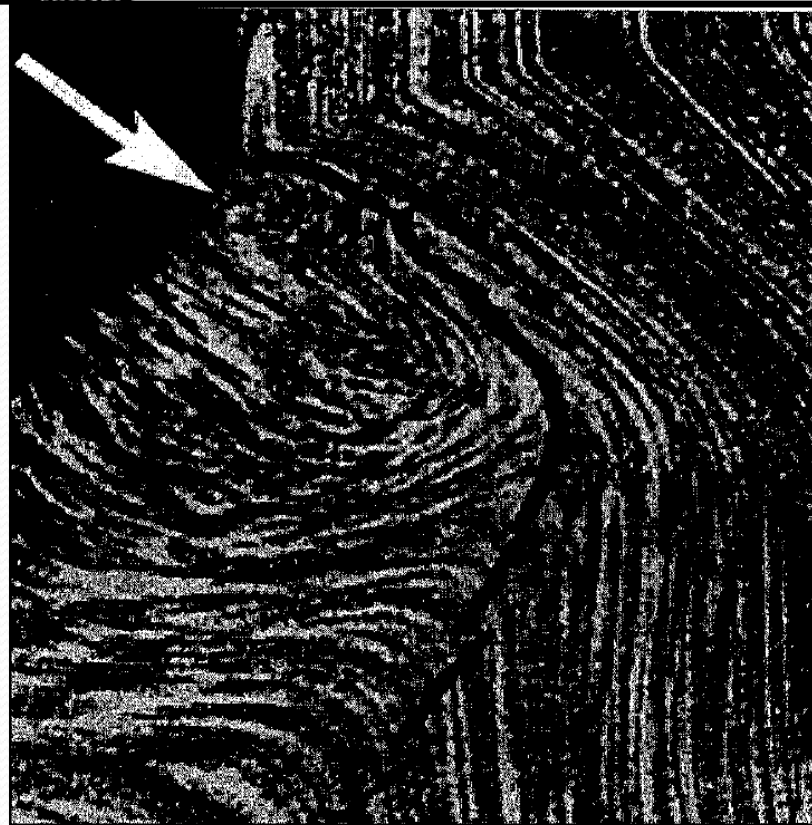
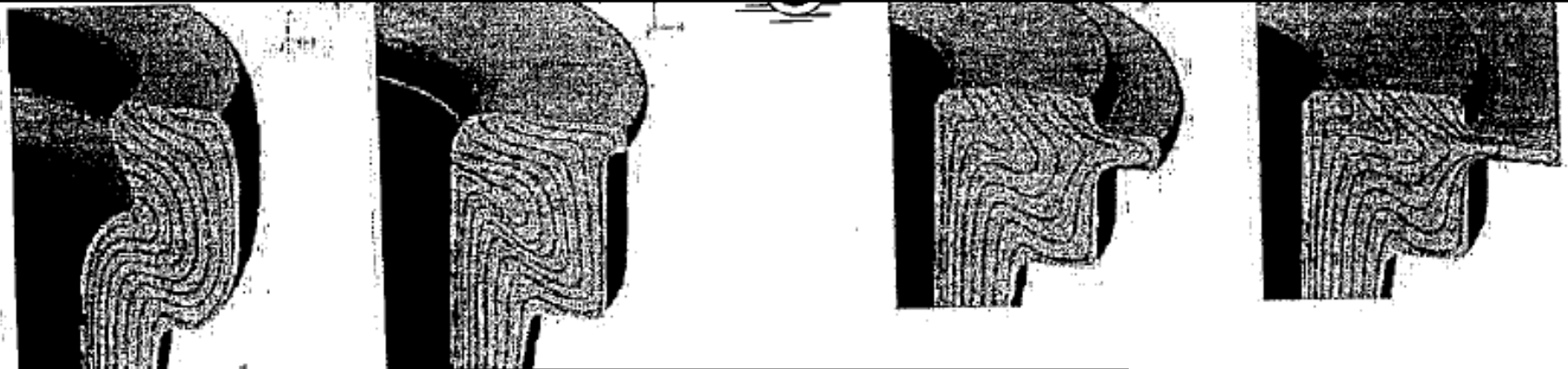


DOBRAS DE FORJAMENTO



LINHAS DE
FLUXO COR-
TADAS - SÍ-
TIO DA NU-
CLEAÇÃO DA
TRINCA.

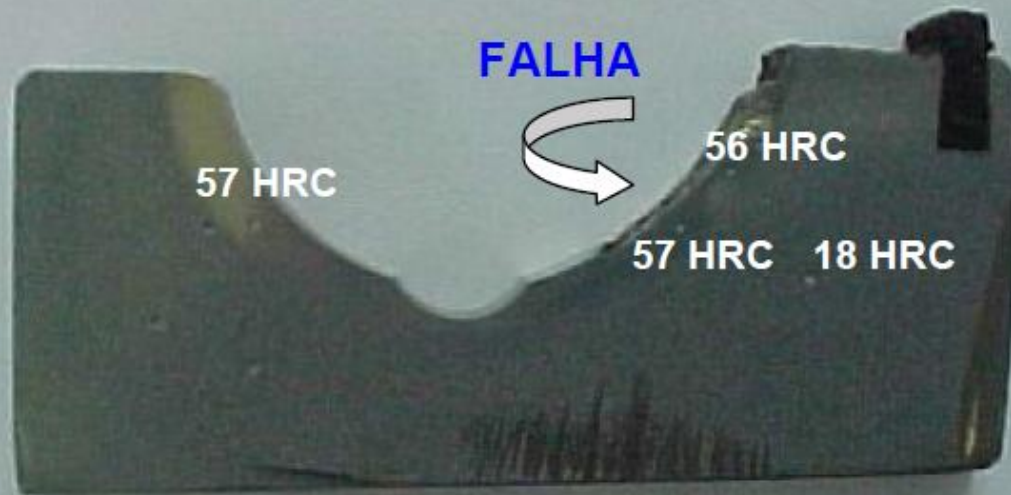
DOBRA DE FORJAMENTO



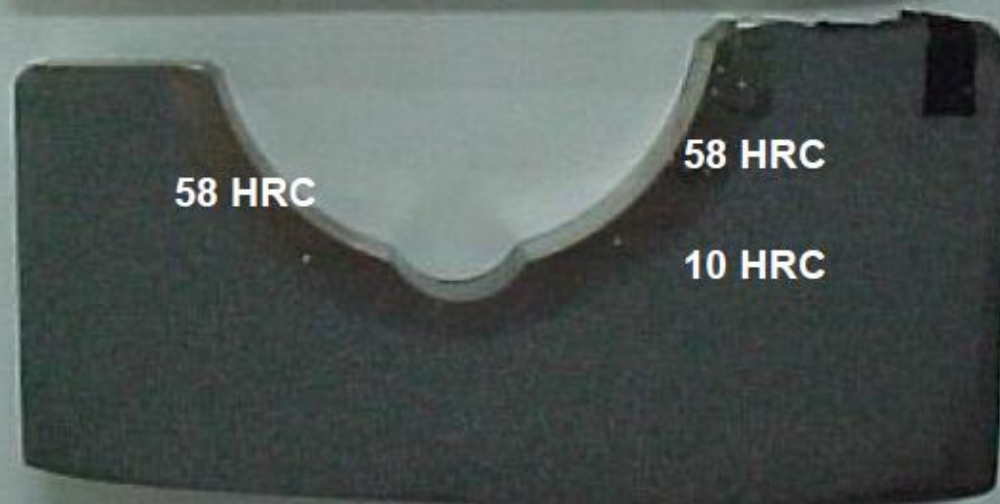
Rolamento de grande porte 3 m de diâmetro - 2011



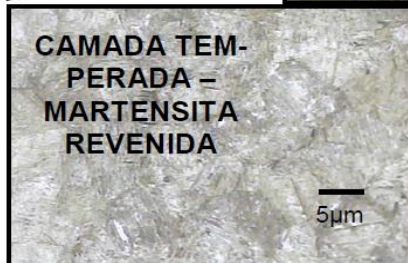
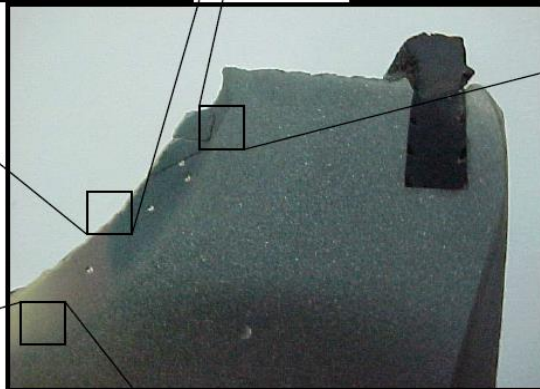
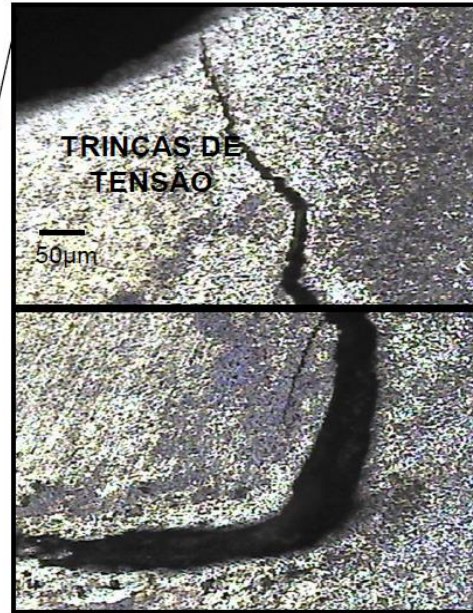
**PEÇA COM
FALHA**



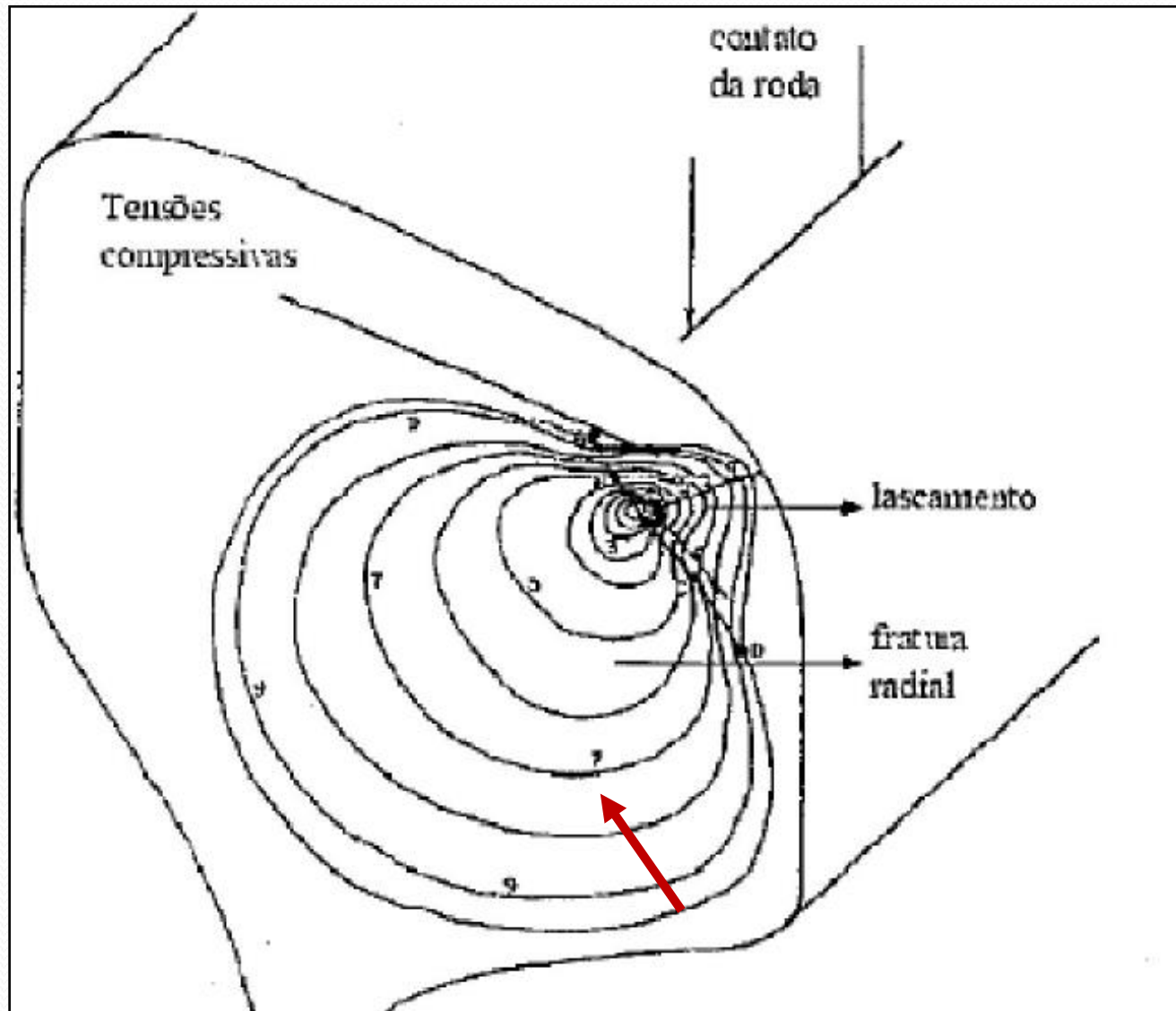
**PEÇA SEM
FALHA**



Análise da trinca e microestrutura




Tensões circunferenciais que levam ao lascamento. Comuns em trilhos



Rolamento de grande porte 3 m de diâmetro - 2011

As possíveis origens das tensões circunferenciais trativas nos rolamentos são:

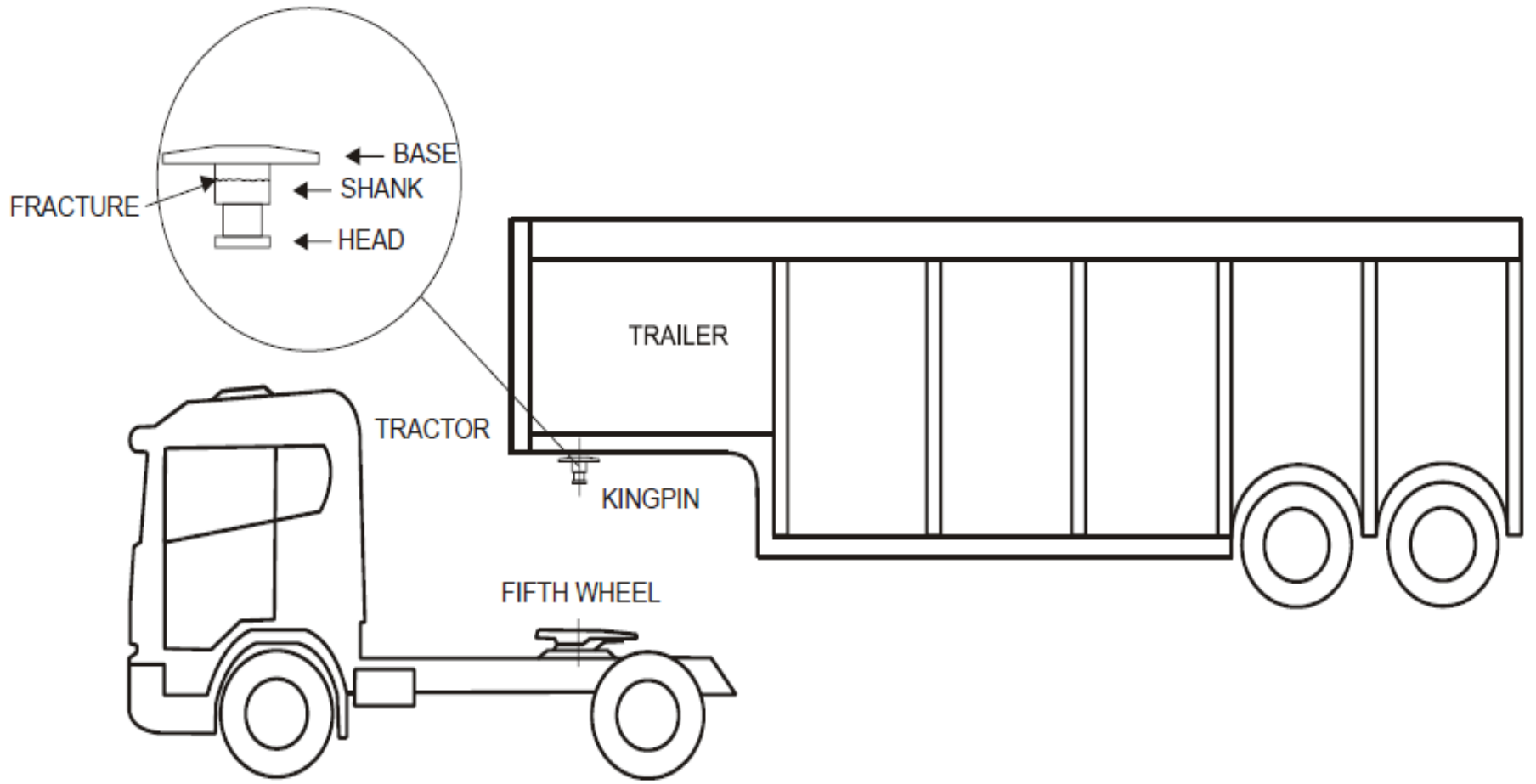
- Alto valor operacional de DN (diâmetro em milímetros x velocidade radial em RPM); **OK**
- Gradientes térmicos; **OK**
- Falha de montagem; 
- Flexão do eixo montado; **OK**
- Tensões residuais de tratamento térmico. **OK**

**PELAS MARCAS DE DESGASTE IRREGULARES
CONCLUI-SE QUE HOUE FALHA NO PROCESSO DE
MONTAGEM:**

FALHAS EM SERVIÇO

**Caso do Pino Rei (quinta roda) fabricado com aço SAE 4140,
Redondo de diâmetro 88,90mm- 2014**

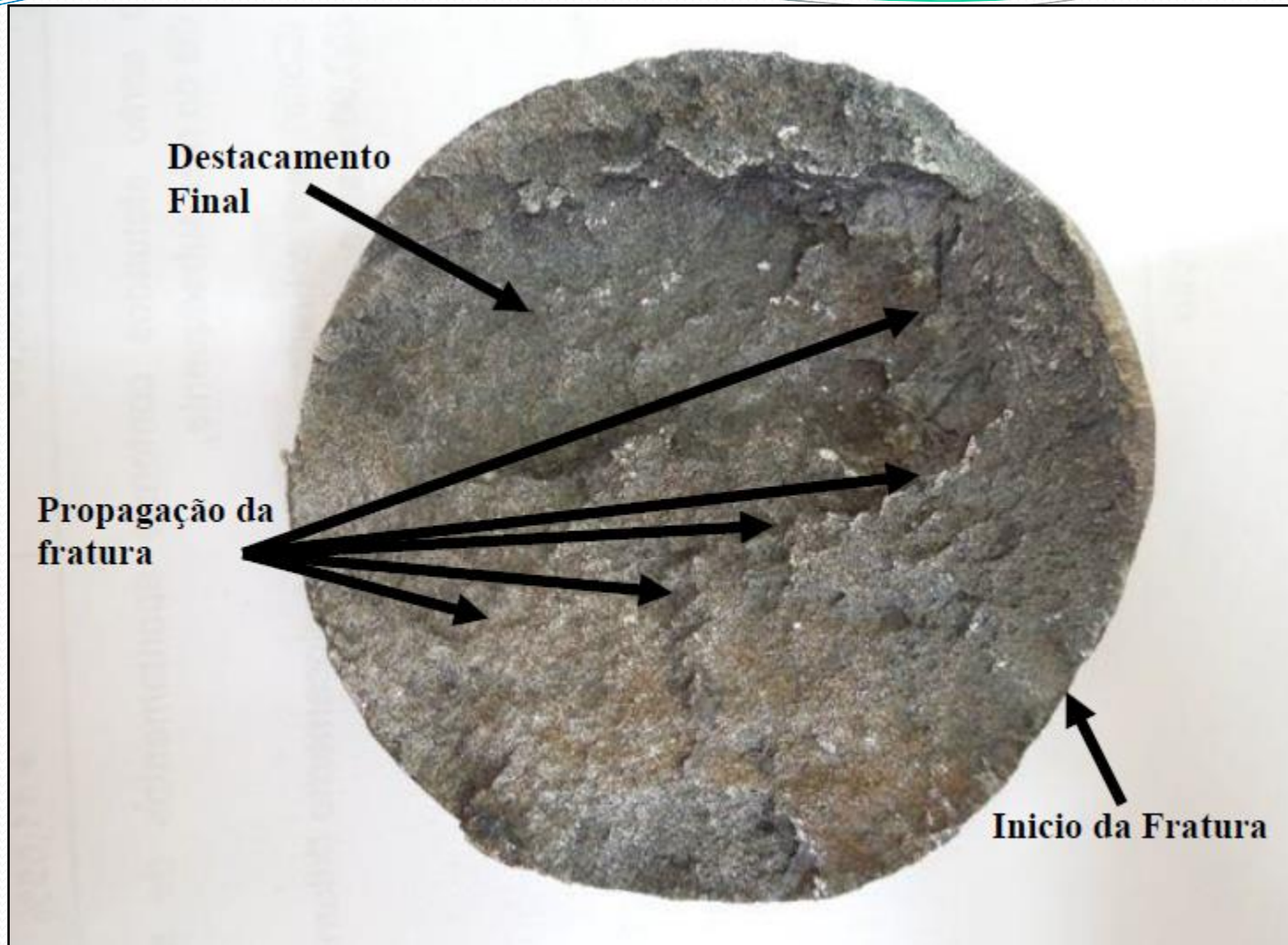






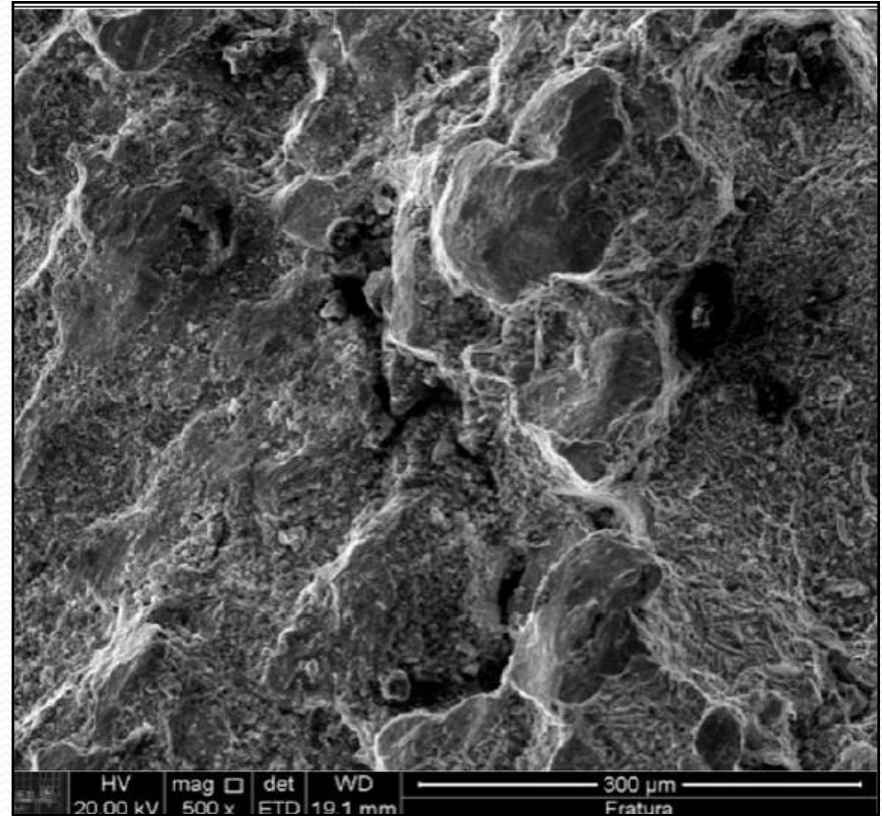
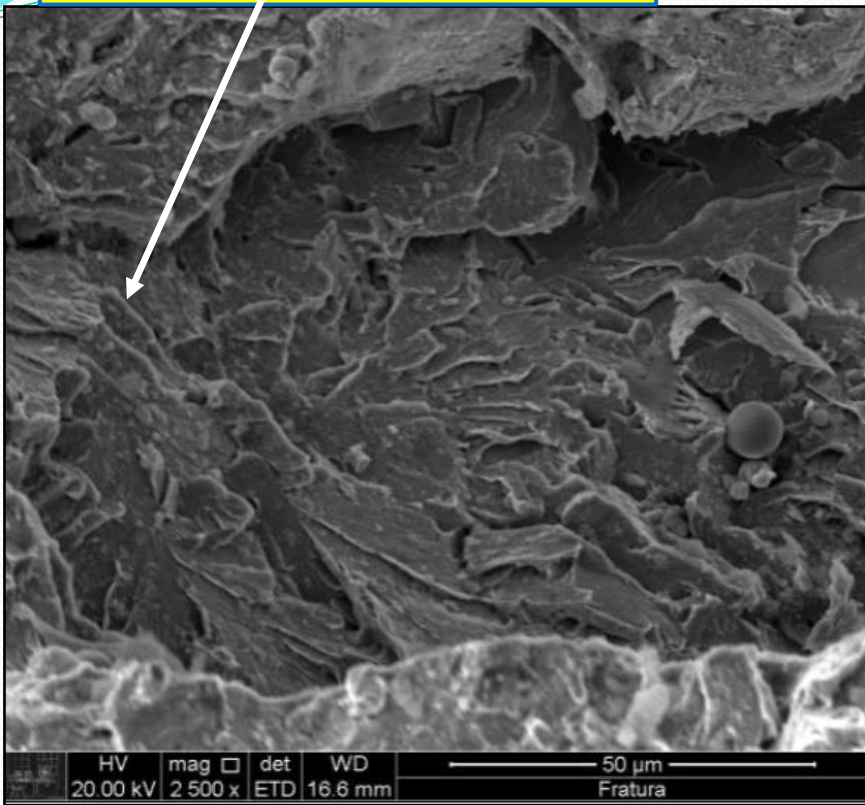
MARCAS DE DESGASTE IRREGULARES PRÓXIMAS À TRINCA

SUPERFÍCIE DA FRATURA



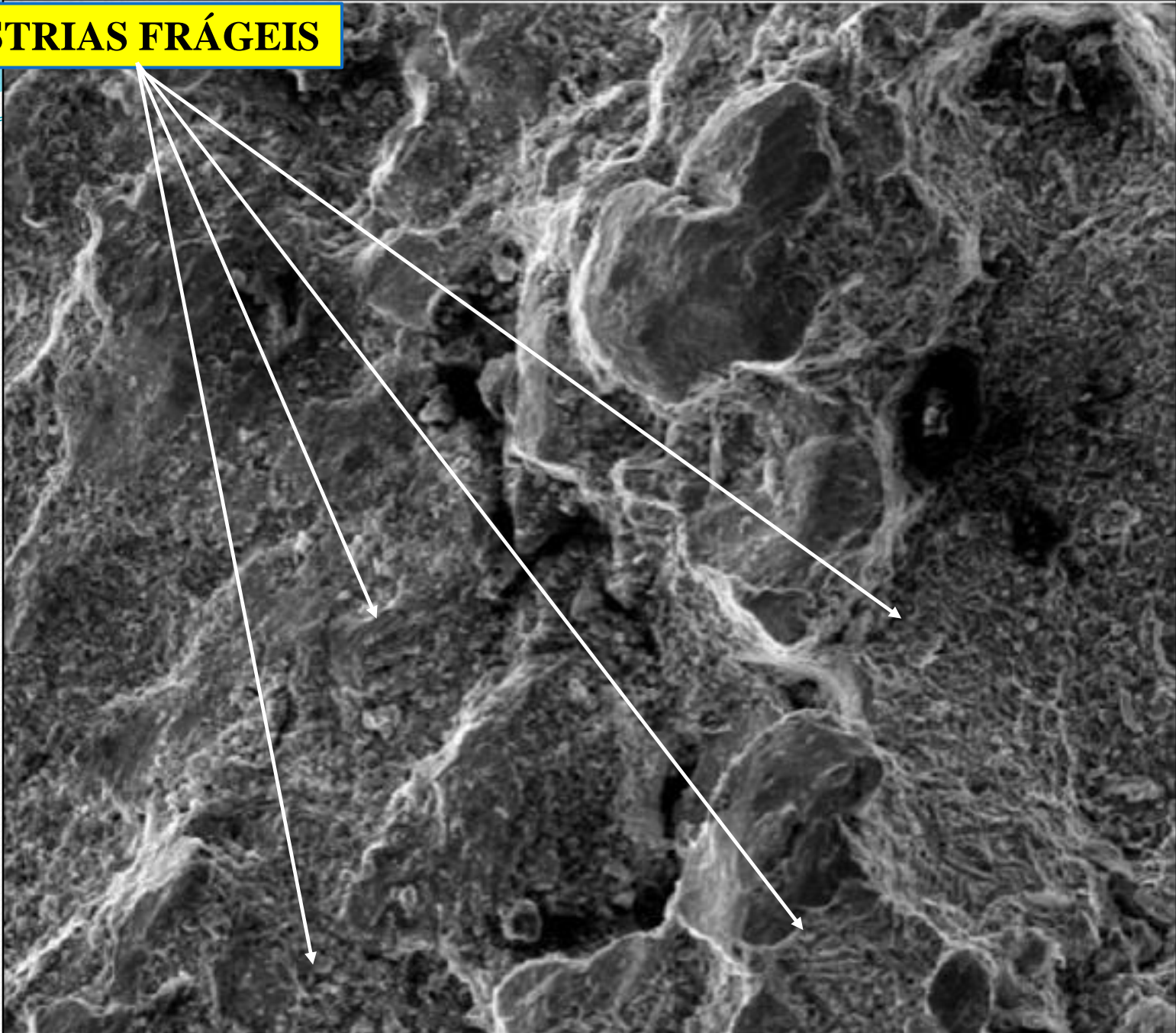
FRATURA DÚTIL – ORÍGEM NO LOCAL DO APOIO DA CARGA- FADIGA POR IMPACTO

INÍCIO DA FRATURA



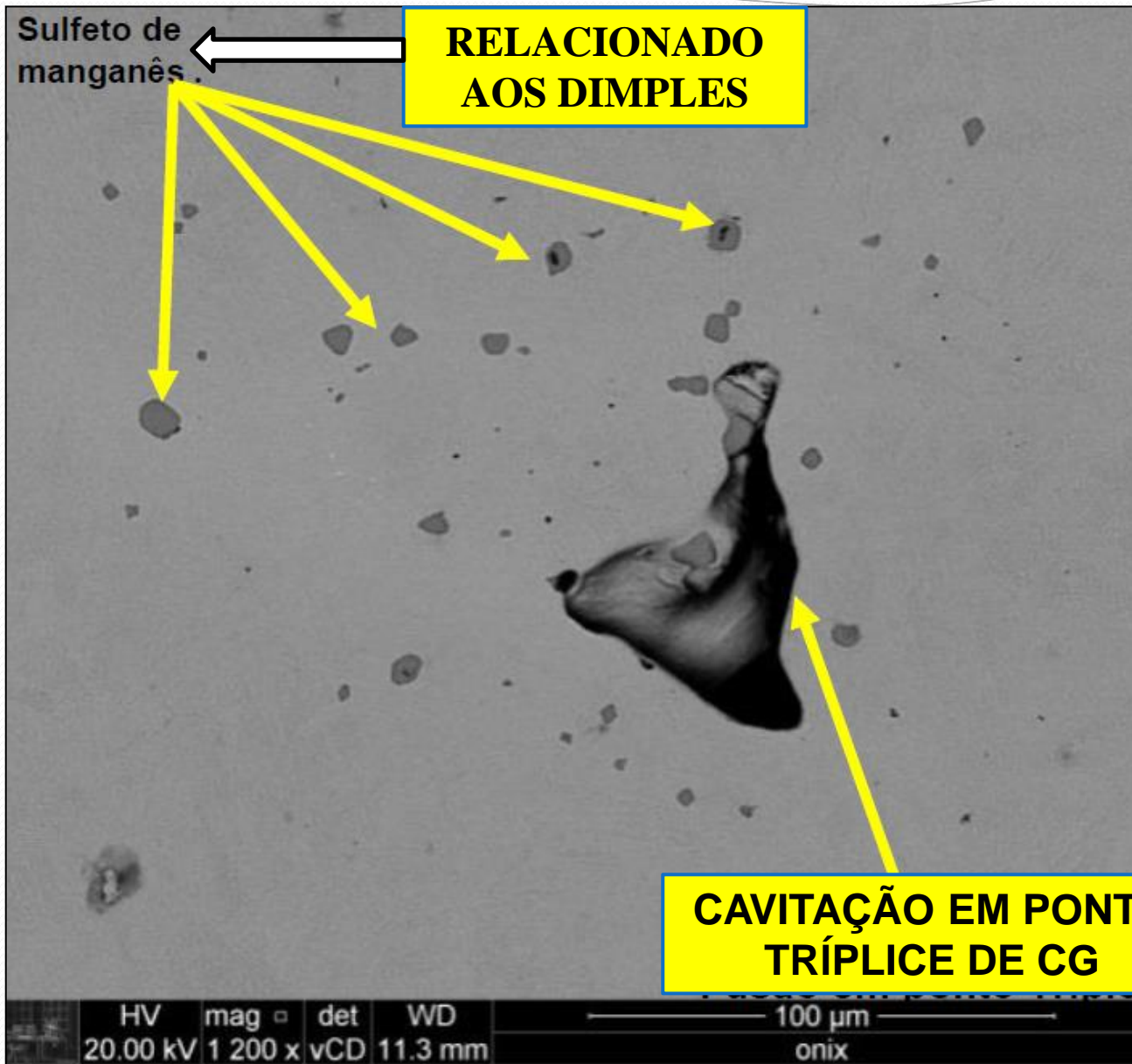
SUPERFÍCIE DE FRATURA: MICROMECHANISMO MISTO: ALVEOLAR, TRANSGRANULAR E INTERGRANULAR.

ESTRIAS FRÁGEIS

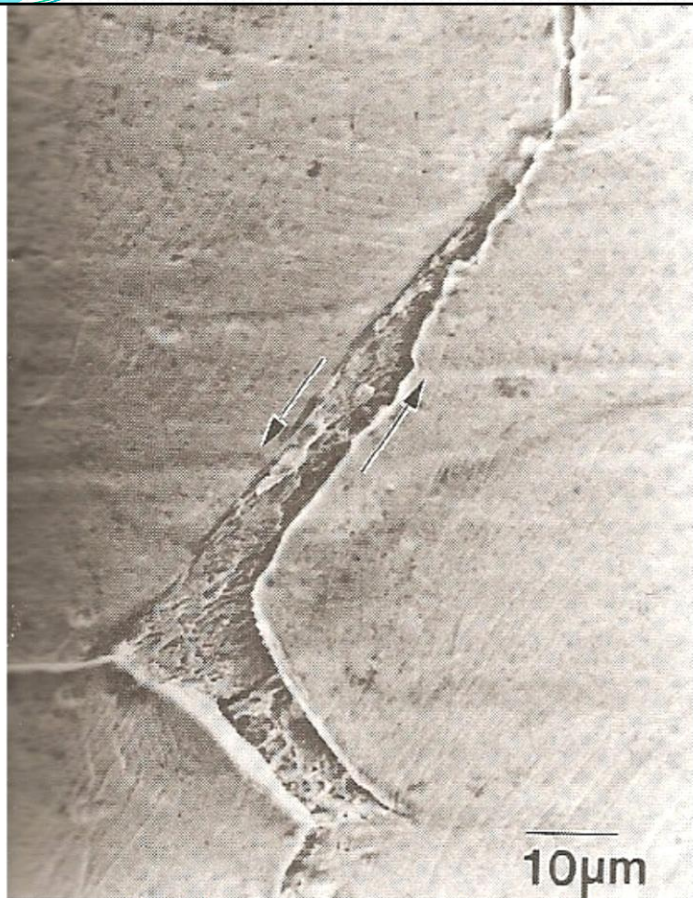


HV	mag	det	WD	300 μm
20.00 kV	500 x	ETD	19.1 mm	Fratura

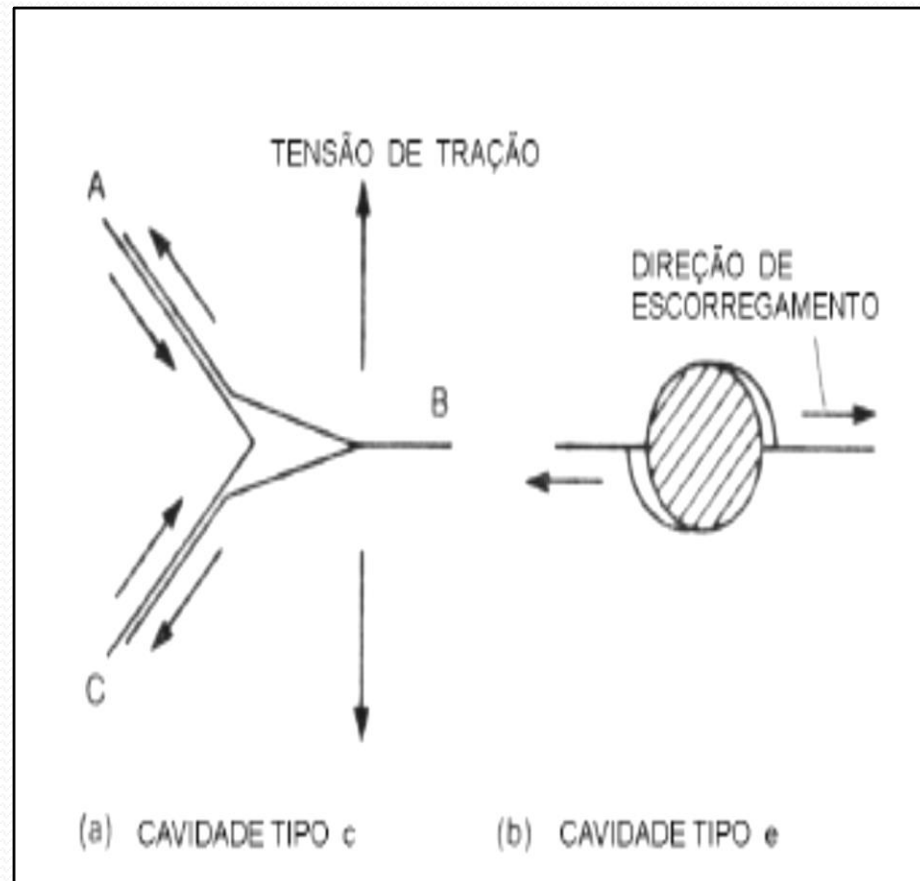
QUEIMA DE GRÃO



Caso do Pino Rei (quinta roda) fabricado com aço SAE 4140, Redondo de diâmetro 88,90mm- 2014



Trinca em ponto tríplice provocada por deslizamento de contorno de grão em uma liga UHP Ni -16Cr-9Fe, a 360°C(MEV).



(a) CAVIDADE TIPO c

(b) CAVIDADE TIPO e

TRINCA EM PONTO TRÍPLICE PROVOCADA POR DESLIZAMENTO DE CONTORNOS DE GRÃO: CAVITAÇÃO. RELACIONADA AO MICROMECHANISMO INTERGRANULAR.

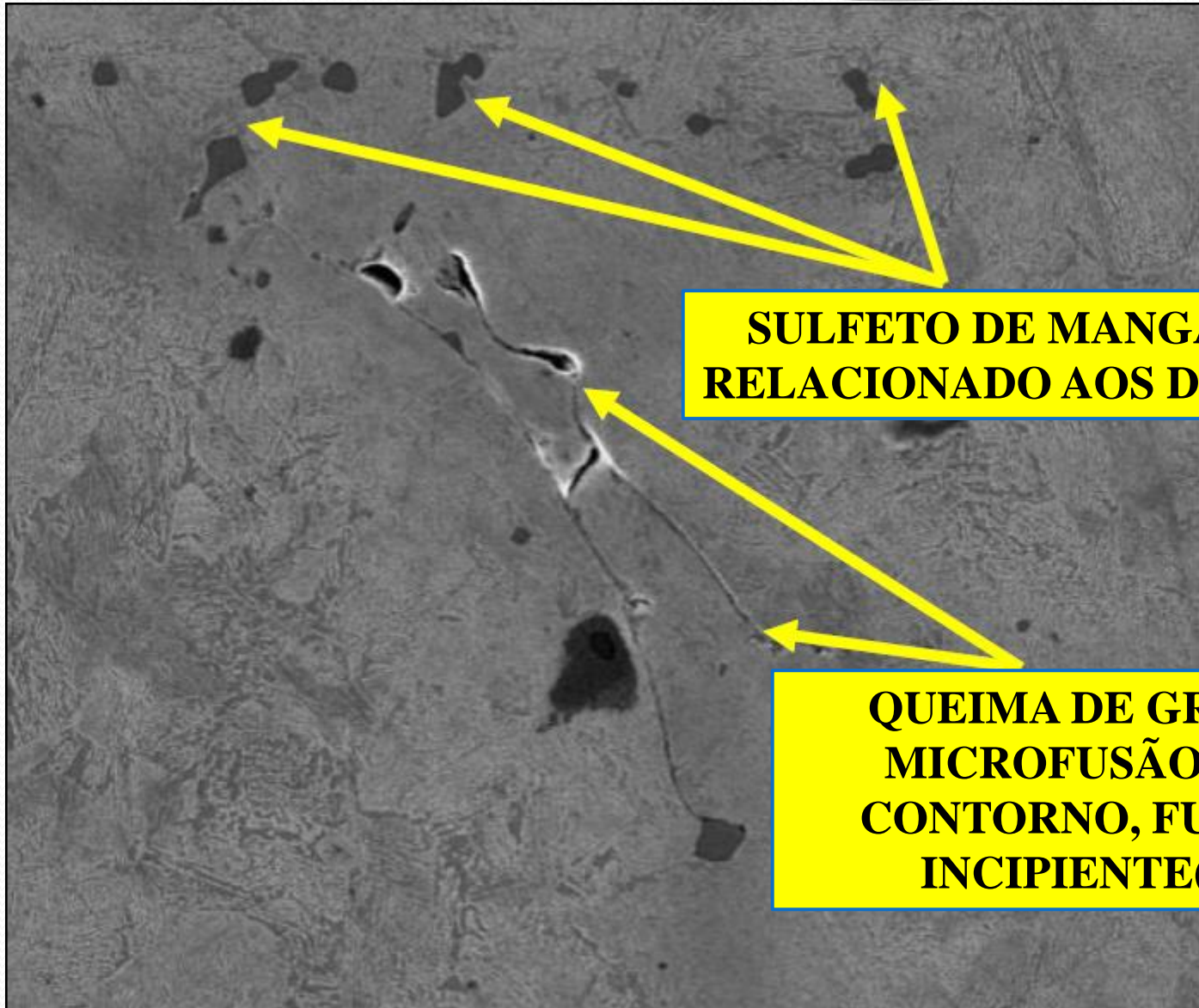
FLUÊNCIA

$$\dot{\epsilon} = \frac{A \cdot \sigma^m}{T \cdot d^q} e^{\frac{-Q}{RT}}$$

Tabela 9.1- Expoentes da equação 9.10 para os diversos mecanismos de fluência

Mecanismo	m	q	Descrição
Fluência por difusão mecanismo de Nabarro-Herring	1	2	Difusão de vacâncias pela rede cristalina
Fluência por difusão mecanismo de Coble	1	3	Difusão de vacâncias pelos contornos de grão
Deslizamento de contornos de grão	2	2 ou 3	Deslizamento combinado com difusão de vacâncias pela rede (q=2) ou com difusão pelos contornos (q=3)
Movimentação de discordâncias	3 a 8	0	Movimentação de discordâncias. Escalagem.

Fonte: [Dowling, 2018]



**SULFETO DE MANGANÊS-
RELACIONADO AOS DIMPLES**

**QUEIMA DE GRÃO:
MICROFUSÃO DO
CONTORNO, FUSÃO
INCIPIENTE(?)**



FIM