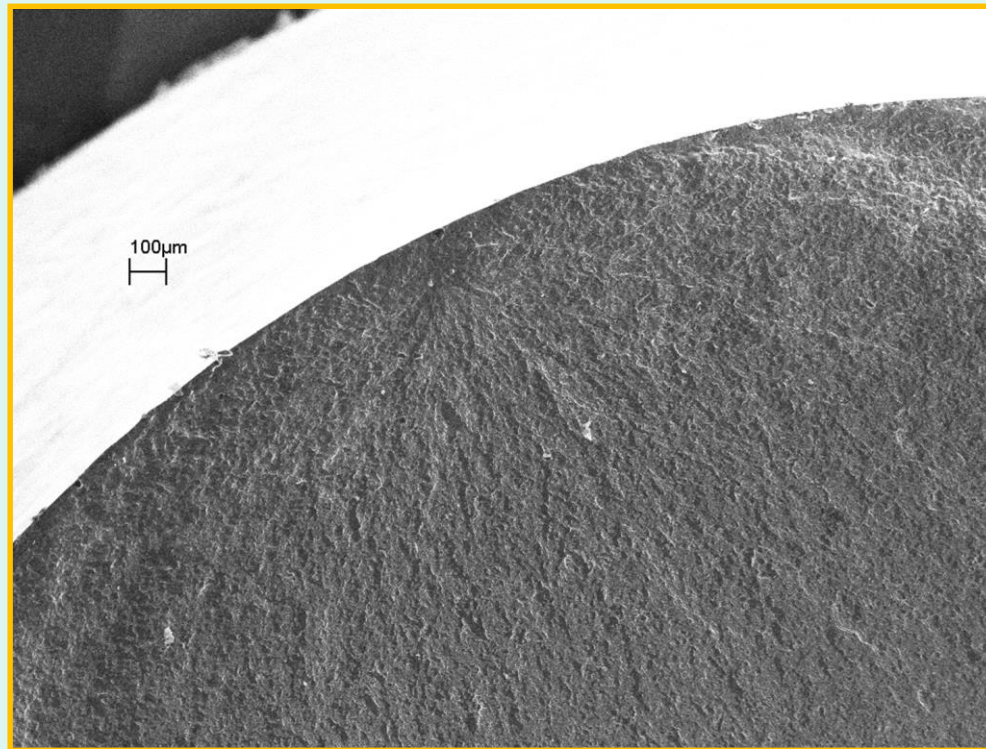


PARTE 7: EFEITOS DE ENTALHE E DE TENSÕES RESIDUAIS

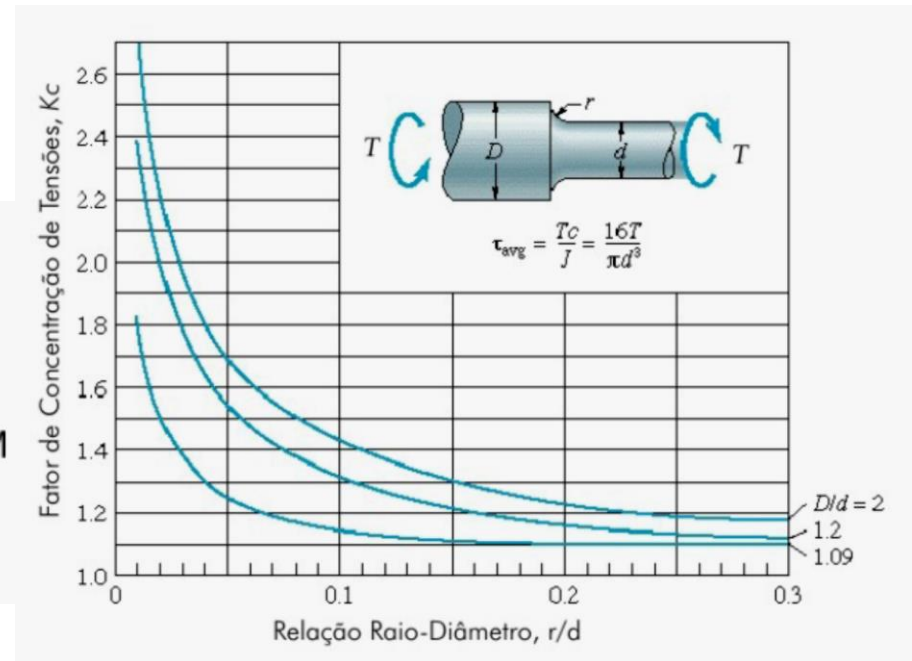
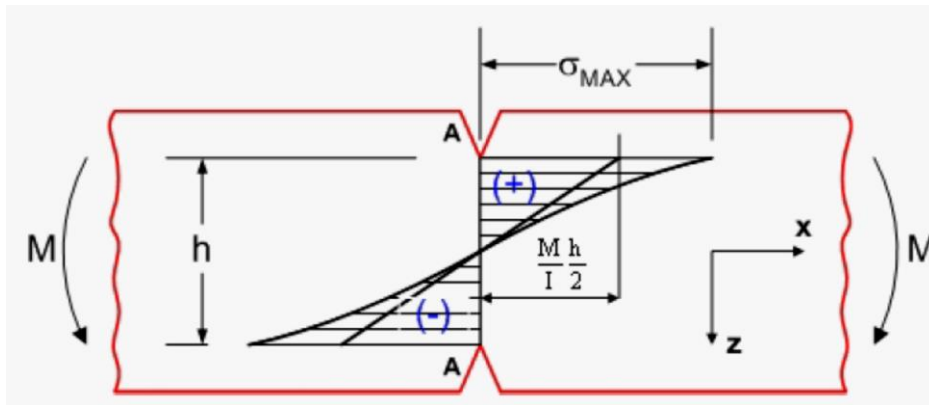


ENTALHES

Concentradores de Tensão

- Entalhe é um contorno geométrico a interromper o fluxo de forças pela peça.
- Furos, ranhuras, chanfros, etc, resultam em distribuição não uniforme da tensão.
- Uma medida das altas tensões localizadas é dada pelo Fator de Concentração de Tensão, denotado por K_t (o índice “t” enfatiza o caráter teórico).

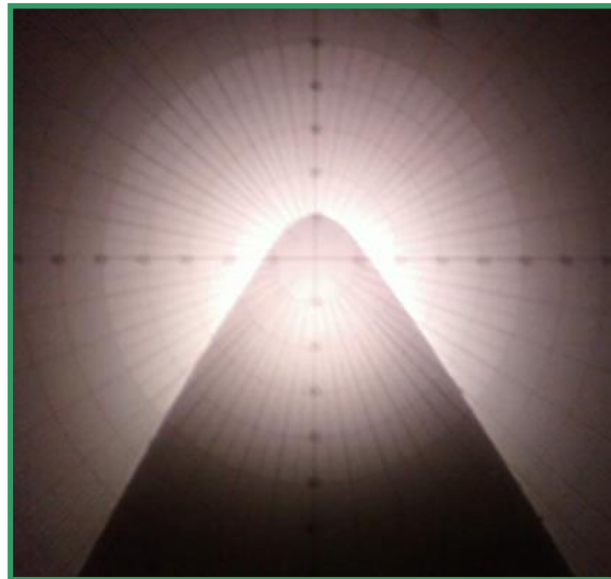
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$



ENTALHES

Concentradores de Tensão

- O Fator de Concentração de Tensão pode ser determinado matematicamente ou experimentalmente.
- Visto que o estado de tensão provocado por um entalhe pode ser biaxial ou triaxial, pode-se definir um “fator combinado” K_t , que considera, por exemplo, o critério de von Mises (a diferença entre os dois será menor que 15%).



Para se calcular o Fator de Concentração de Tensão em um corpo-de-prova entalhado, o raio da ponta do entalhe deve ser medido com precisão.

ENTALHES

Sensibilidade ao Entalhe

- Pode-se prever o início da trinca por fadiga em peças com entalhe usando o método Deformação-Vida, calculando-se a deformação local cíclica e empregando-se, por exemplo, a Regra de Neuber (como visto anteriormente).
- Quando as condições **elásticas** prevalecem (fadiga de alto ciclo), o efeito dos entalhes pode ser avaliado pelo fator de Sensibilidade ao Entalhe, q .
- A sensibilidade ao entalhe é considerada o grau com o qual um efeito teórico é realmente obtido na prática e, para o K_t é definida pela expressão abaixo, onde K_f é o **Fator de Entalhe à Fadiga**, dado pela razão entre a resistência à fadiga de uma peça sem entalhe e a resistência de uma peça com entalhe, para um mesmo número de ciclos na faixa de vidas longas ($N_f > 10^6$ ciclos).

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

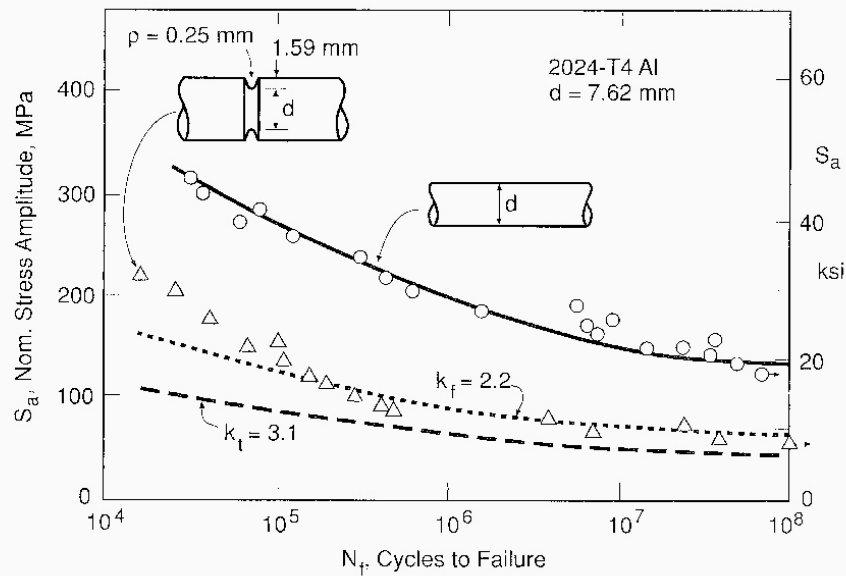
$$K_f = \frac{\sigma_{f,u}}{\sigma_{f,n}}$$

Note que q varia de 0 (quando $K_f = 1$) a 1 (quando $K_f = K_t$).

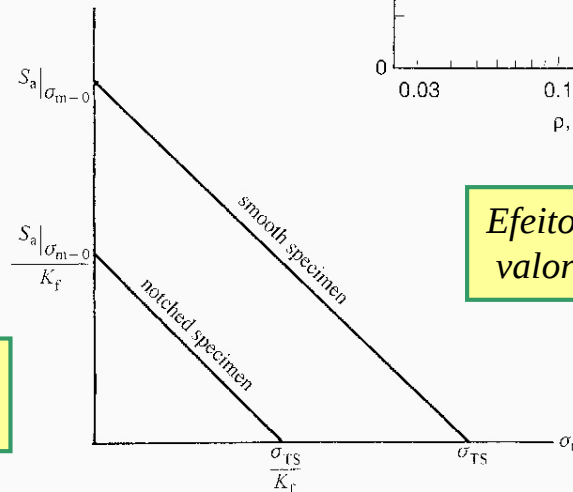
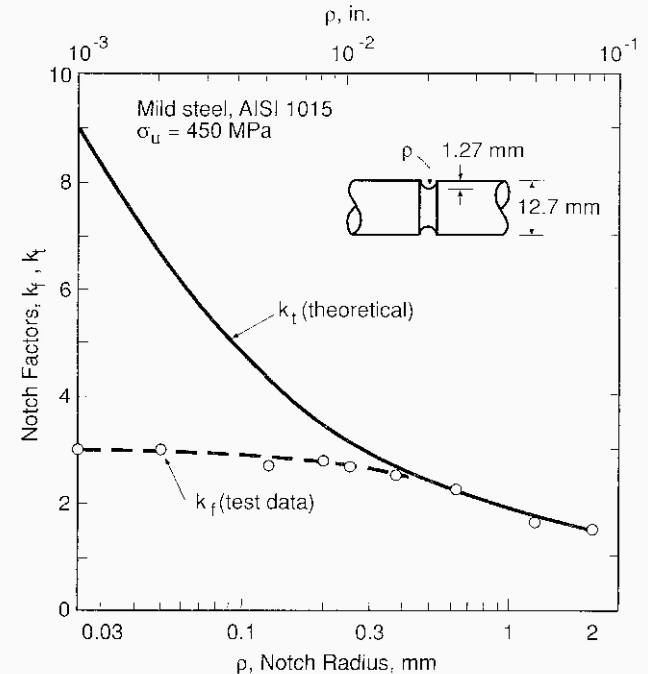
Geralmente, $K_f < K_t$.

ENTALHES

Sensibilidade ao Entalhe



Efeito da tensão média na vida em fadiga de peças com e sem entalhe.



Efeito do raio do entalhe no valor do Fator de Entalhe K_f .

TENSÕES RESIDUAIS

Caracterização das tensões residuais

- Tensões elásticas em equilíbrio, presentes no componente previamente à aplicação das cargas de serviço.
- Podem ser resultantes dos processos usuais de fabricação (como usinagem, soldagem, conformação).
- Ou podem ser deliberadamente introduzidas na peça, por algum método apropriado, com o objetivo de melhorar o comportamento mecânico.

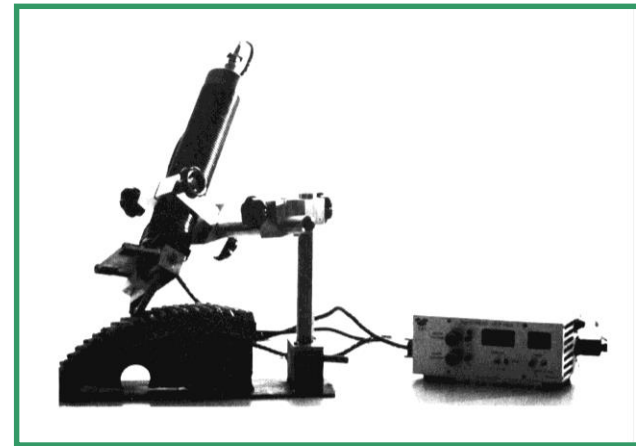
Produção de tensões residuais

- Métodos mecânicos, térmicos, operações de usinagem, *plating*.
- Métodos Mecânicos mais empregados para produzir tensões residuais compressivas com o objetivo de aumentar a resistência à fadiga:
 - *Shot Peening*.
 - Roleteamento.

TENSÕES RESIDUAIS

Medição de tensões residuais

- Em laboratório ou no campo.
- Técnicas incluem: difração de raios-X, ultrassom, *hole drilling*.



SHOT PEENING

Informações Básicas

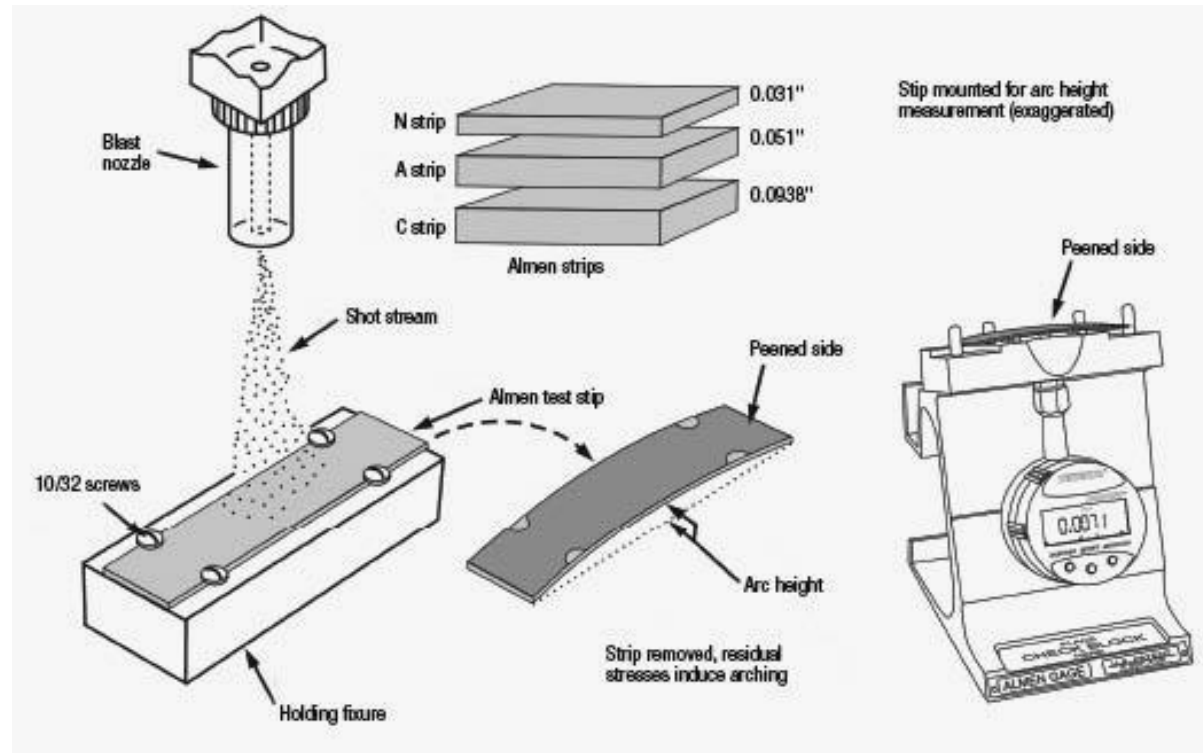
- Processo de trabalho a frio por jateamento com esferas de aço, cerâmica ou vidro.
- Não é simples jateamento mas um método preciso, controlável e repetitível.
- Produz tensões residuais compressivas e alta densidade de discordâncias nas camadas superficiais do componente.



SHOT PEENING

Intensidade de *Peening*

- Controlada com o emprego das chamadas Placas de Almen.
- Placas padronizadas colocadas junto ao material tratado.
- Existem 3 espessuras de placas: “N”, “A”, “C”, onde $3N = A = 0,3C$.
- Após o Shot Peening as placas se deformam; mede-se a flecha (polegadas).

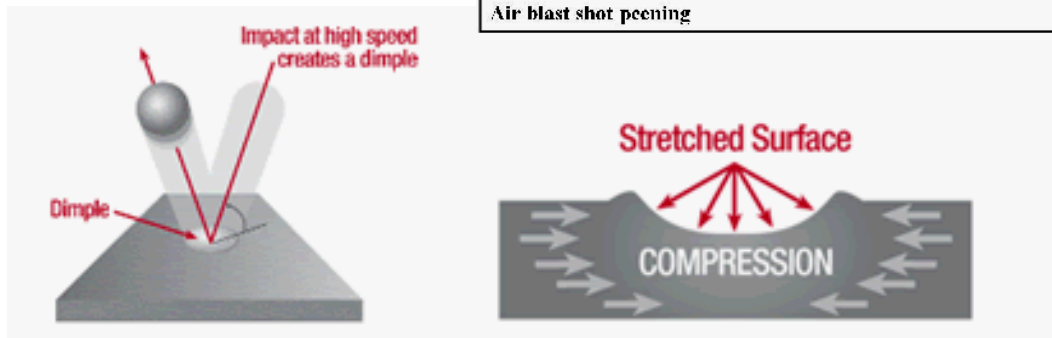
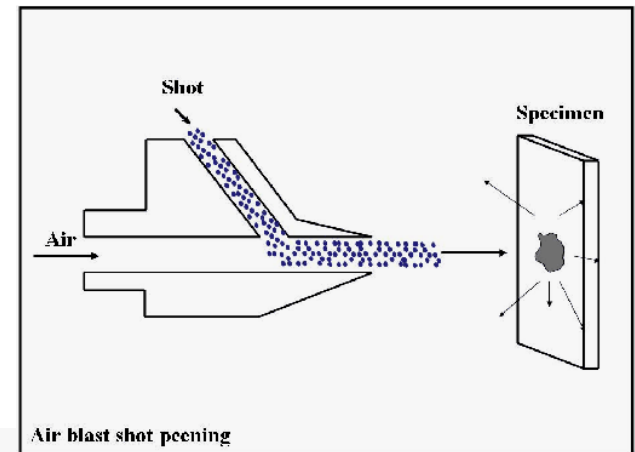
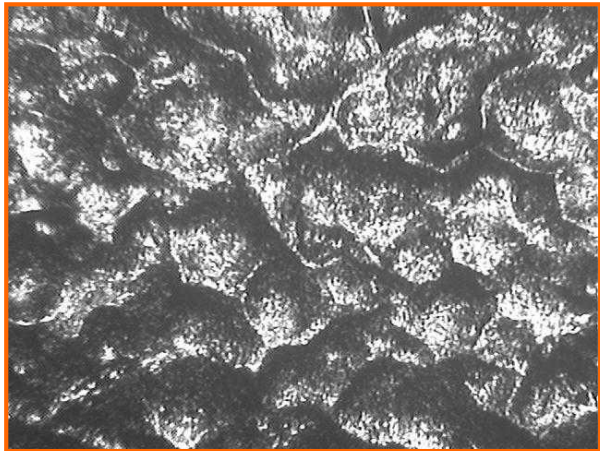


SHOT PEENING

Efeito do *Shot Peening* sobre a resistência à fadiga

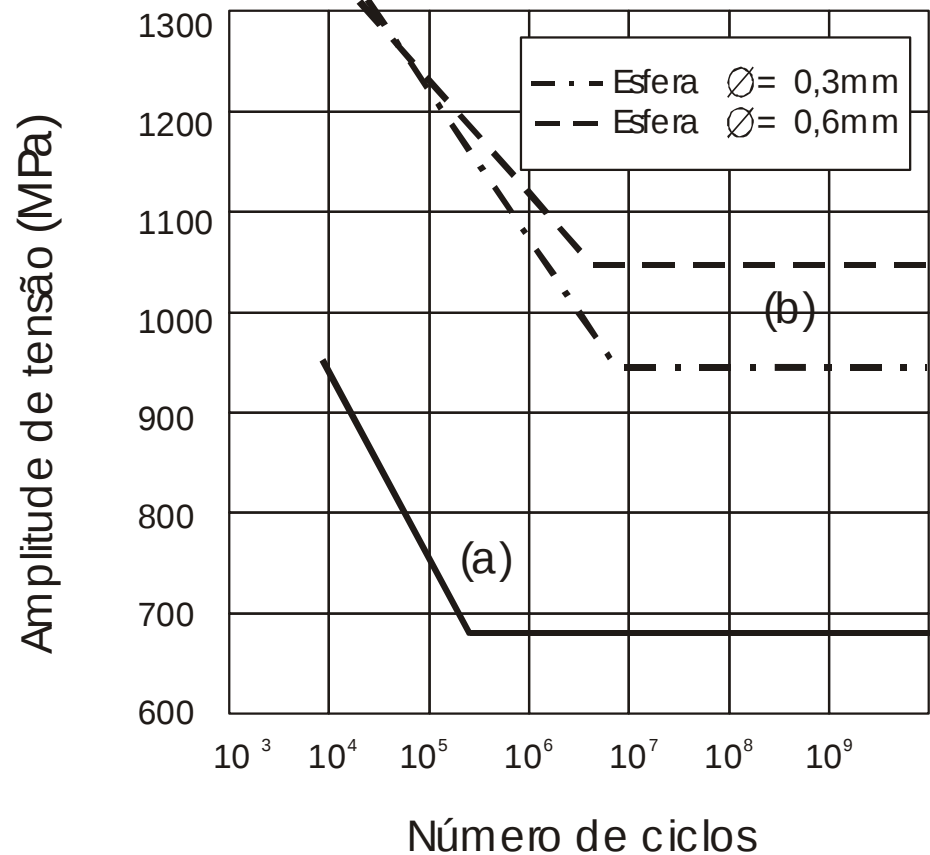
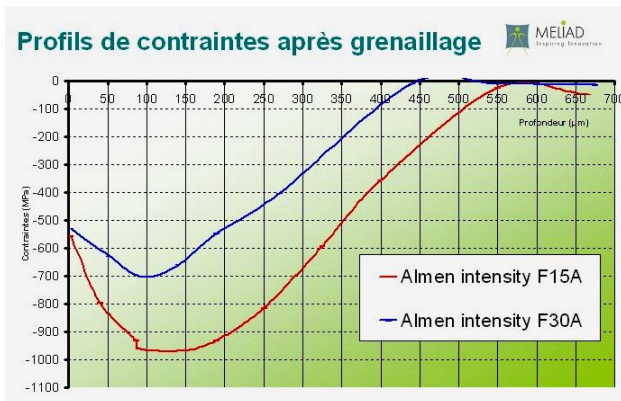
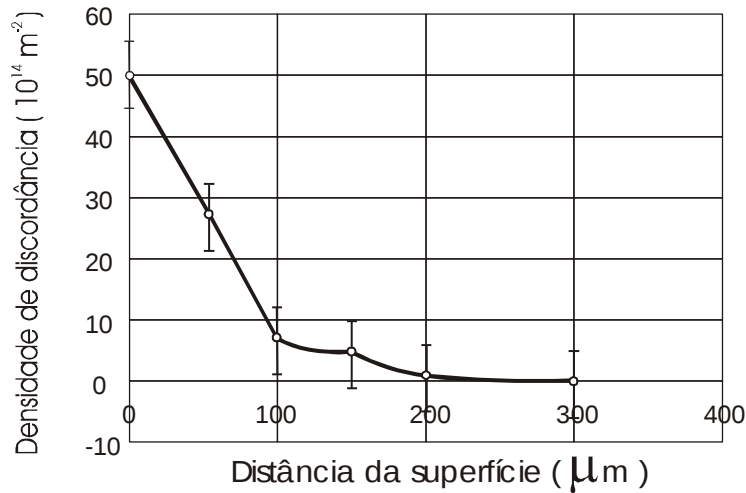
- Vários fatores contribuem para o resultado final: campo de tensões residuais, rugosidade da superfície, propriedades do material após a deformação plástica induzida pelo *shot peening*.

Superfície do aço 4340 (39 HRC) submetido a *shot peening* com intensidade 0,018 A (50 x)



SHOT PEENING

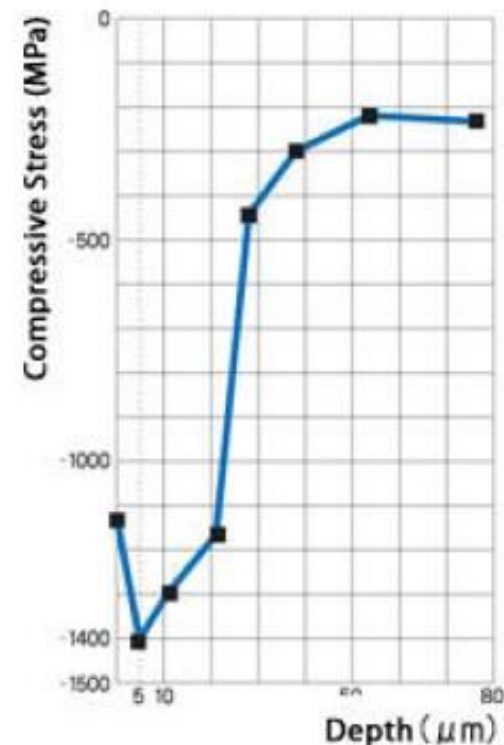
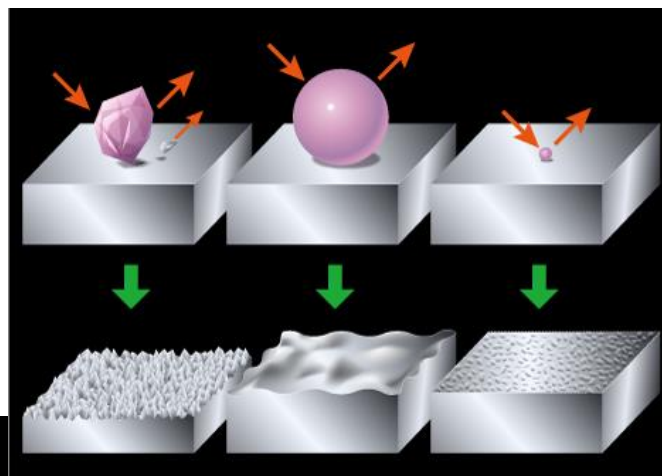
Efeito do Shot Peening sobre a resistência à fadiga (cont.)



TRATAMENTO WPC (*WONDER PROCESS CRAFT*)

Resultados Alegados

- Aumenta dureza, reduz atrito, introduz tensão residual compressiva na superfície.
- Partículas ultra-finas atiradas em alta velocidade contra a superfície do metal.



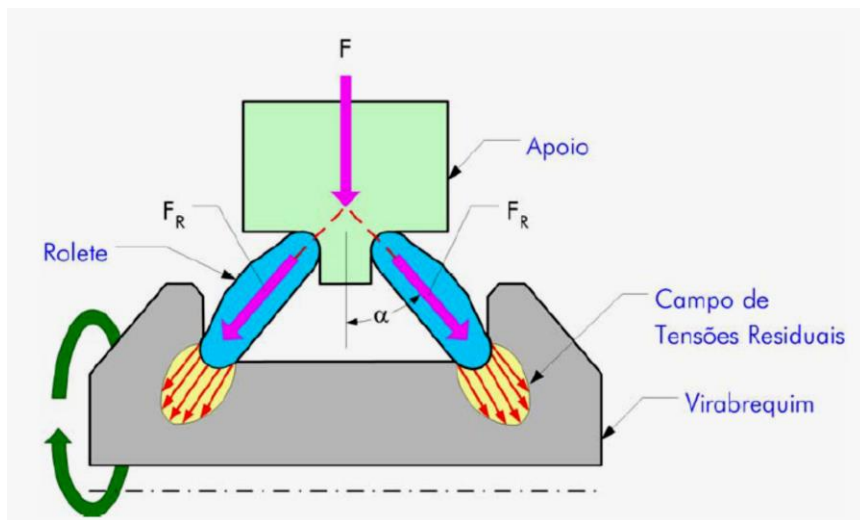
Comparação de processos



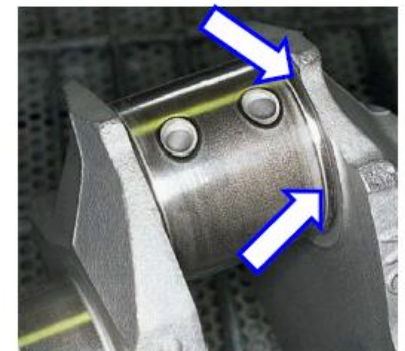
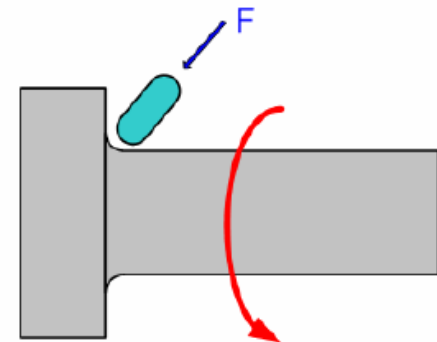
ROLETEAMENTO

Descrição

- Processo de conformação por meio de roletes.
- Induz tensões residuais compressivas próximo à superfície.
- Pode reduzir a nucleação de trincas de fadiga.

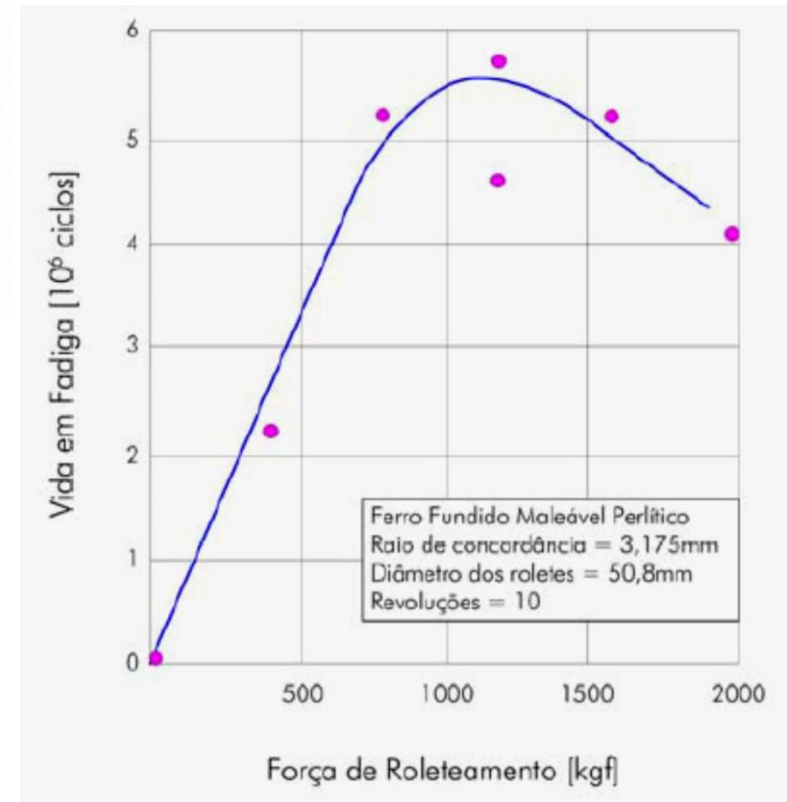
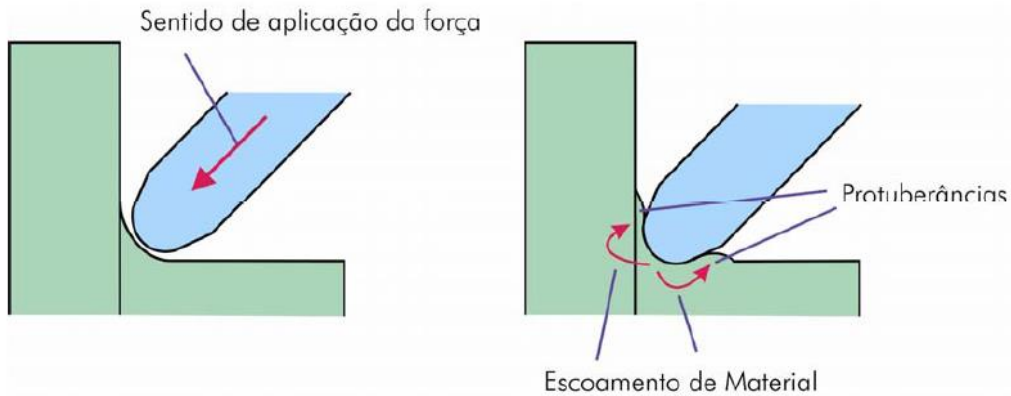


Ex.: Roleteamento de virabrequim



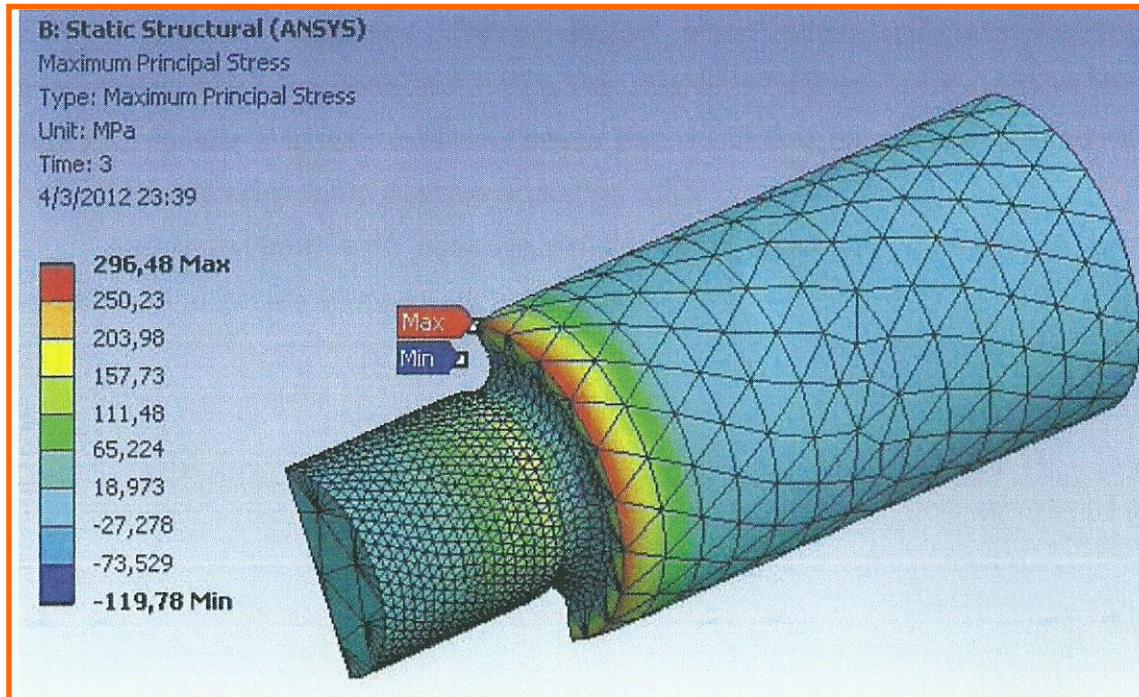
ROLETEAMENTO

Efeito do roleteamento na resistência à fadiga

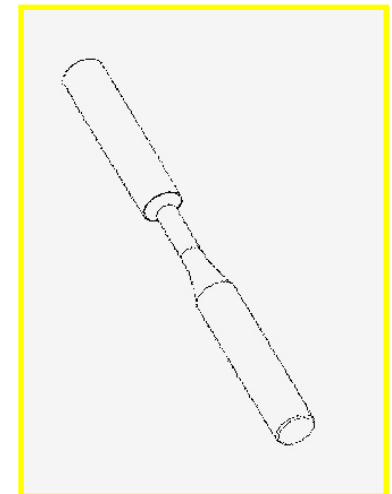


ROLETEAMENTO

Efeito do roleteamento na resistência à fadiga (*cont.*)



Oliveira, C.L., Dissertação de Mestrado. UNITAU, 2012.

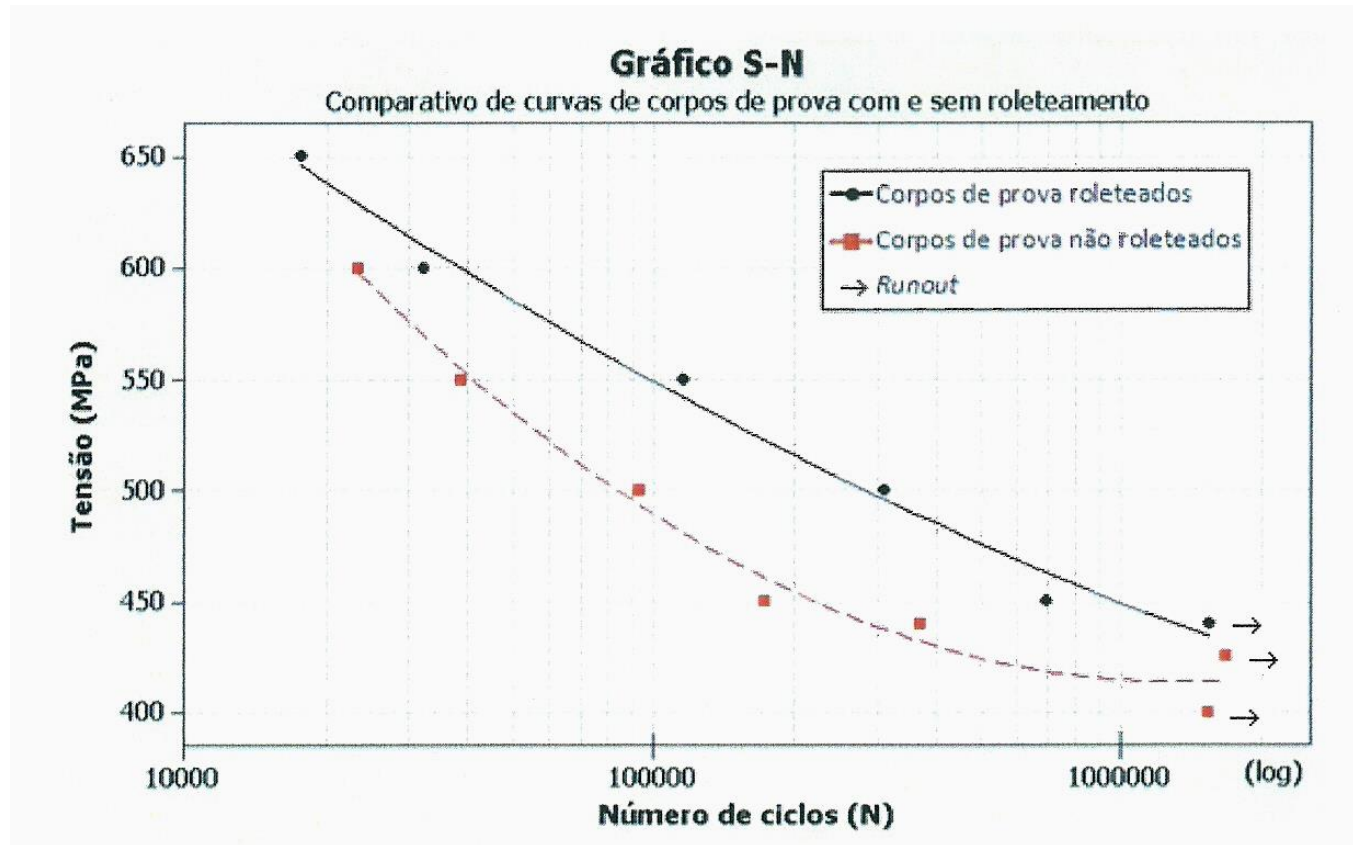


Tentativa de simulação das tensões residuais induzidas pelo processo de Roleteamento usando análise não-linear por Elementos Finitos.

Corpo-de-prova para o ensaio de fadiga.

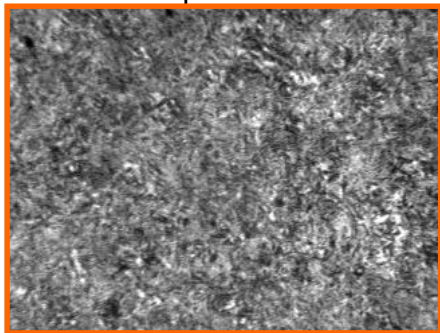
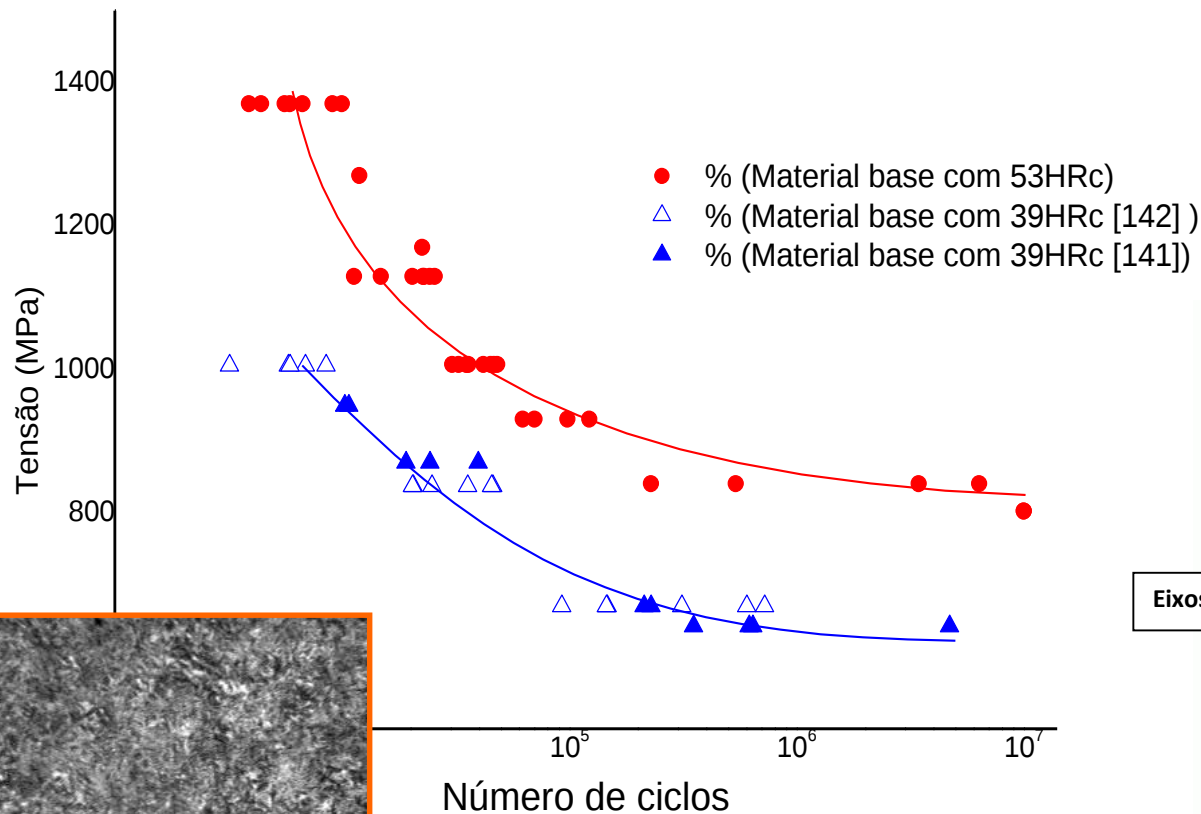
ROLETEAMENTO

Efeito do roleteamento na resistência à fadiga (*cont.*)

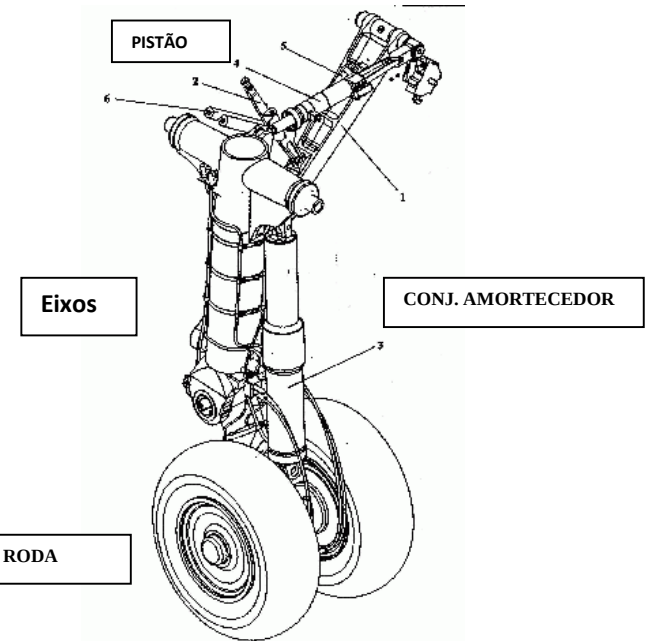


UM ESTUDO REALIZADO COM O AÇO AISI 4340

Aço 4340 empregado em componentes de trens de pouso



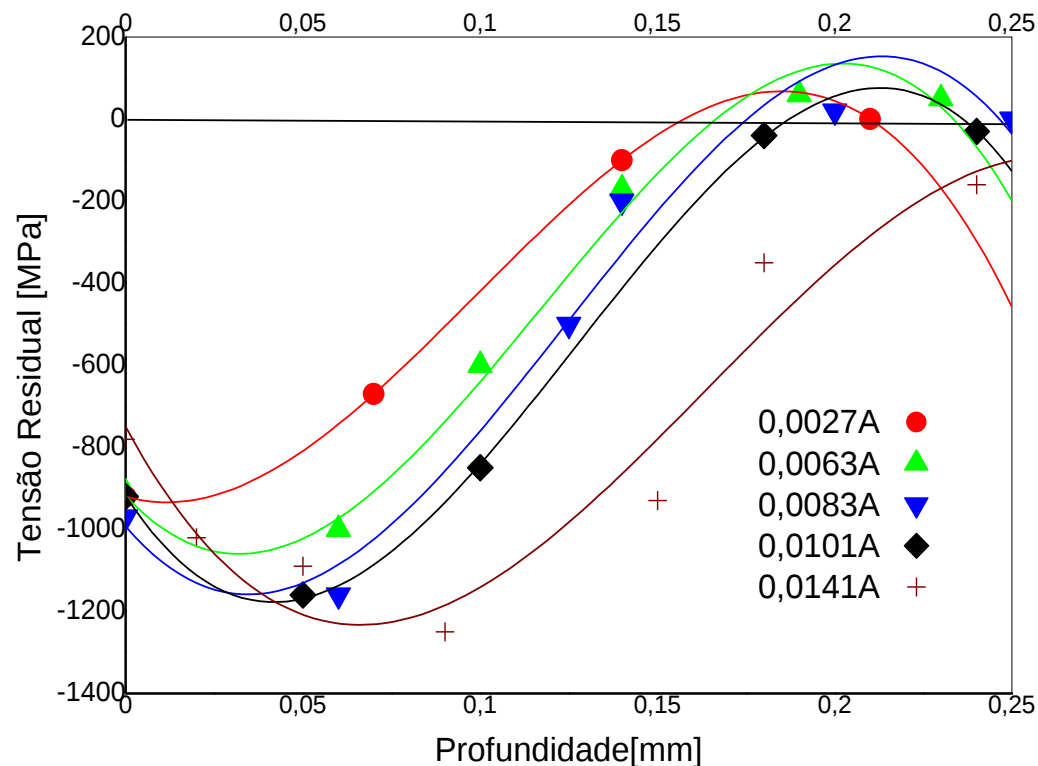
*Torres, M.A.S., Tese de
Doutorado. UNESP, 2002.*



UM ESTUDO REALIZADO COM O AÇO AISI 4340

Resultados Experimentais

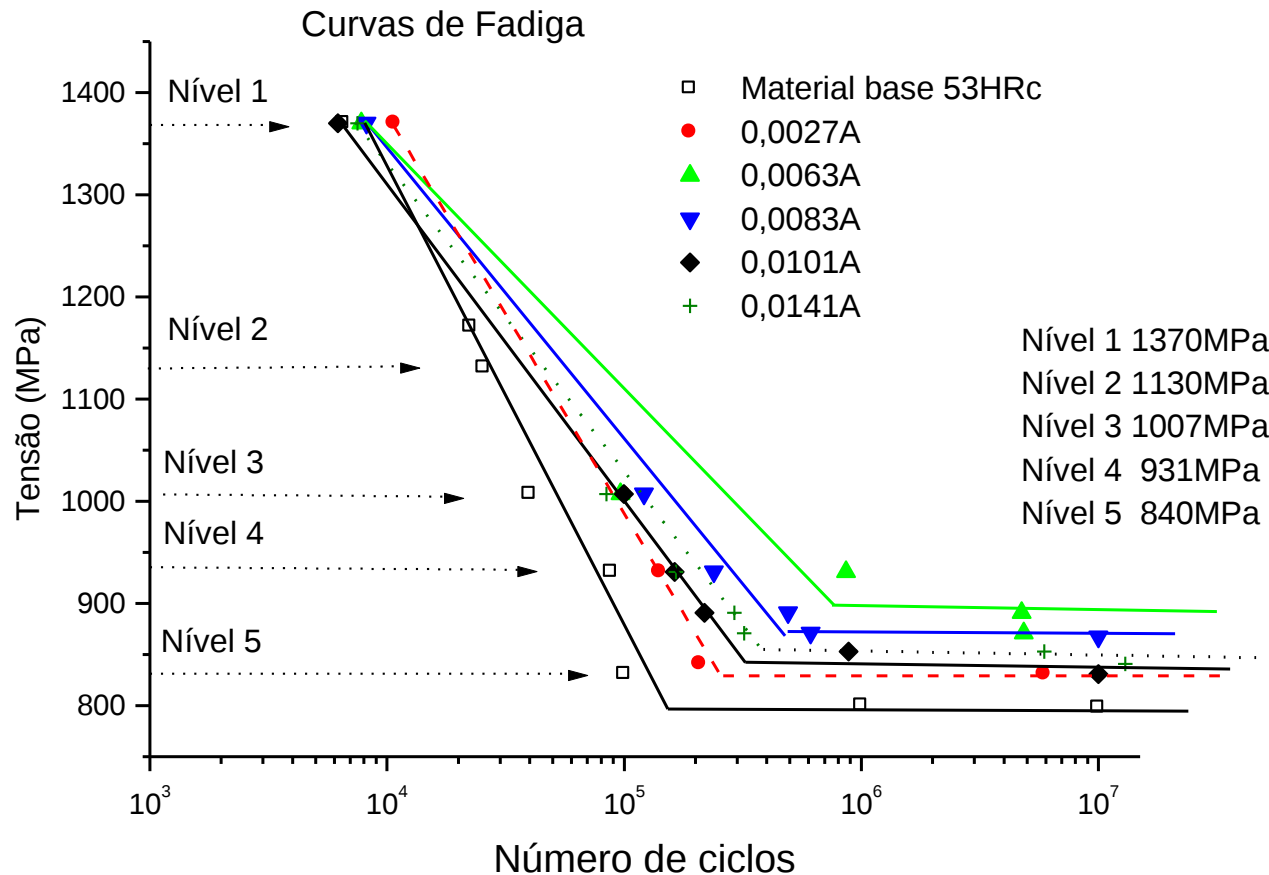
- Aço temperado e revenido para dureza 50-53 HRC.
- Adotou-se 5 diferentes intensidades de shot peening.
- Curvas S/N não apresentam correlação evidente com o CTRC.



UM ESTUDO REALIZADO COM O AÇO AISI 4340

Resultados Experimentais

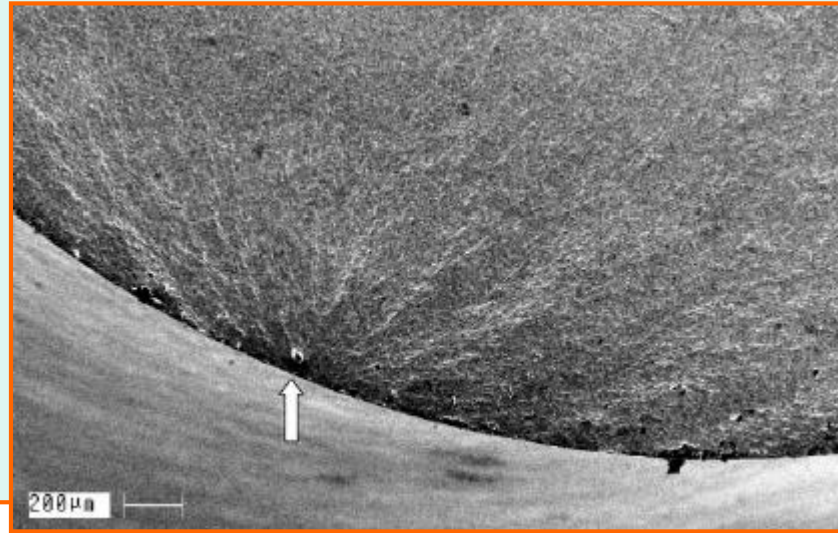
- Curvas S/N: pontos mostrados representam a média de 5 ensaios.



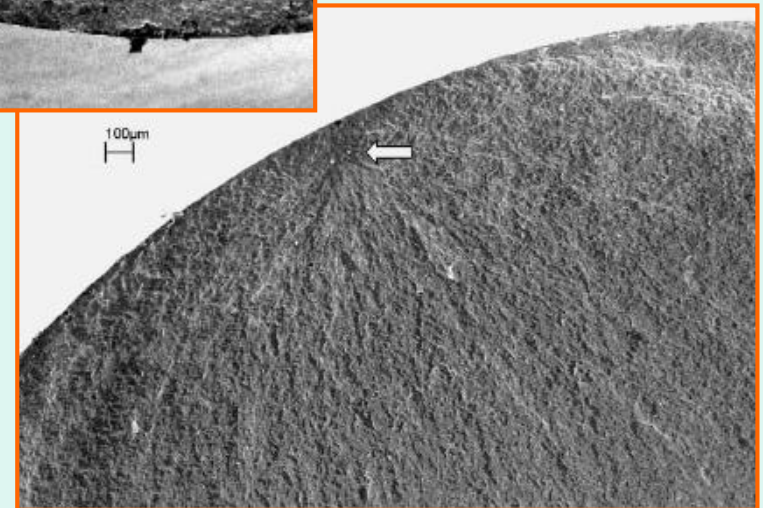
UM ESTUDO REALIZADO COM O AÇO AISI 4340

Determinação dos locais de início das trincas de fadiga

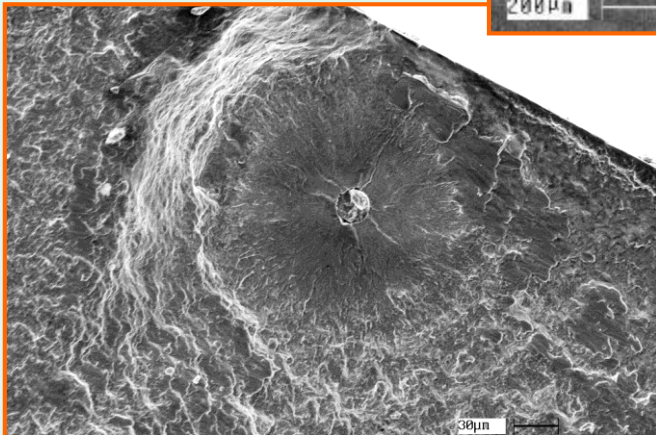
Na superfície.



Abaixo da superfície.

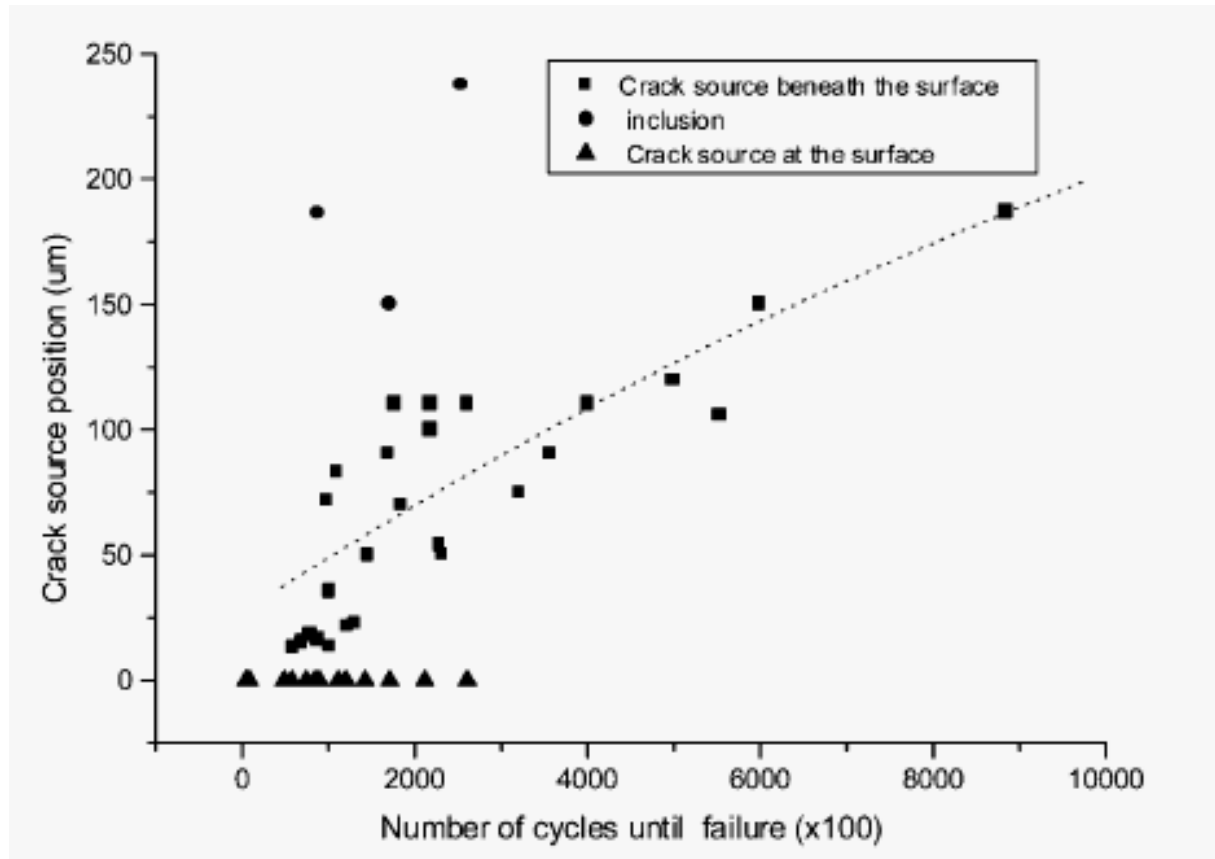


Em inclusão.



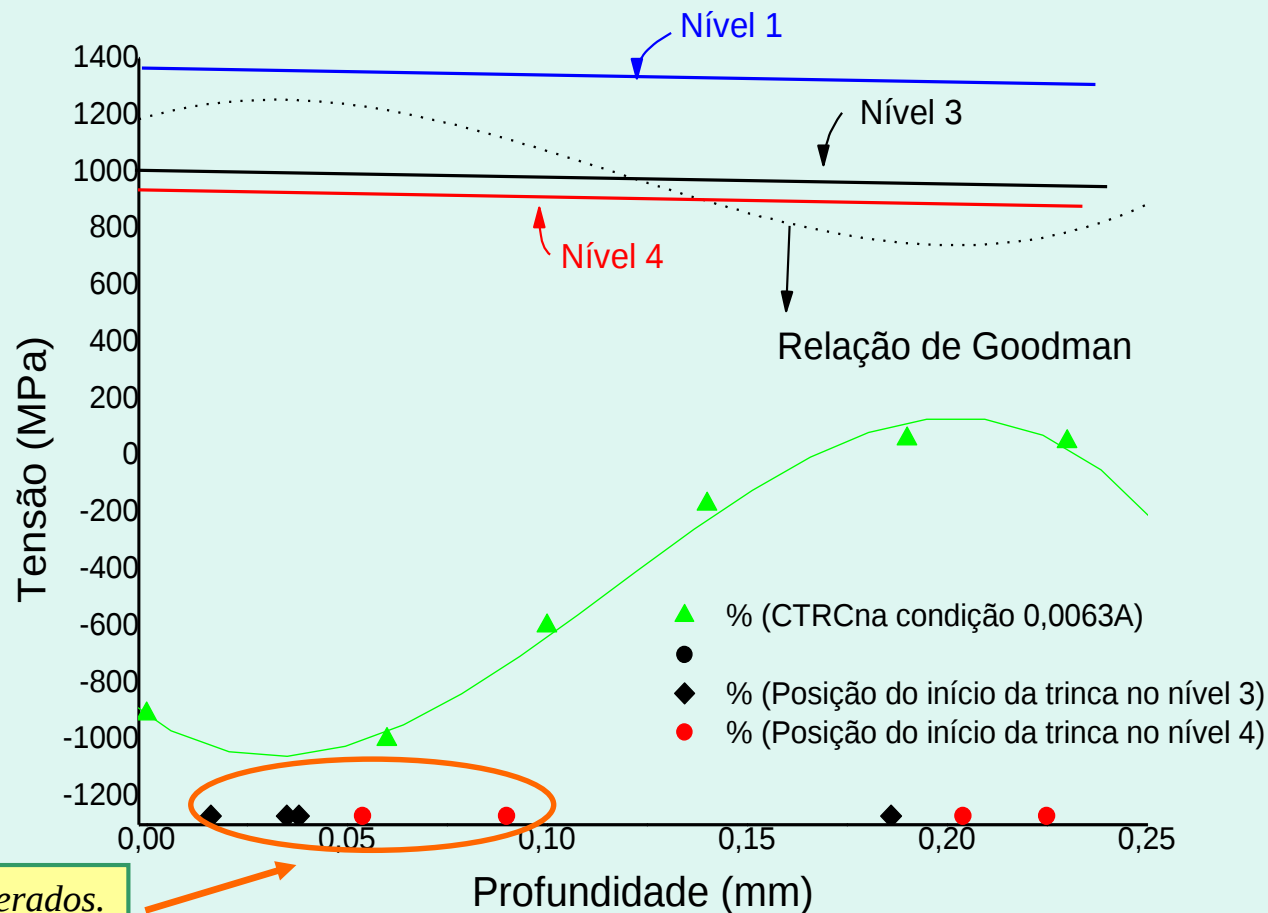
UM ESTUDO REALIZADO COM O AÇO AISI 4340

Relação entre a posição de início da trinca e a vida em fadiga



UM ESTUDO REALIZADO COM O AÇO AISI 4340

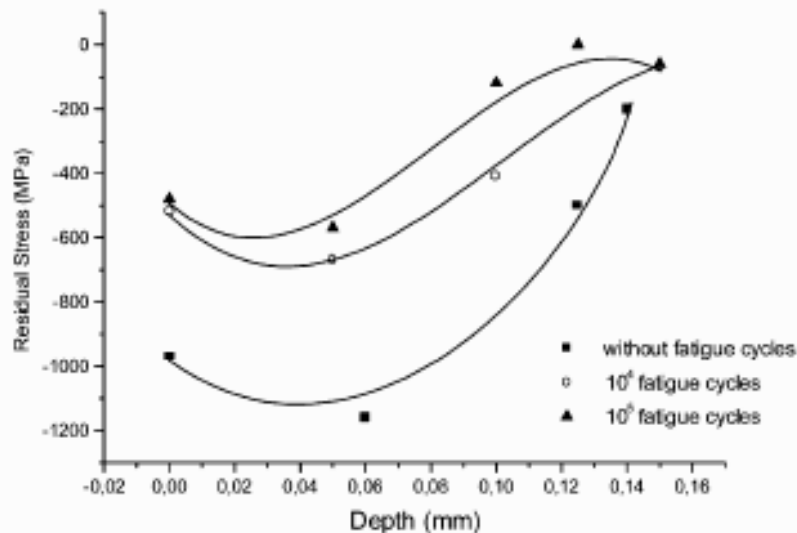
Superposição de tensões e posição de início das trincas



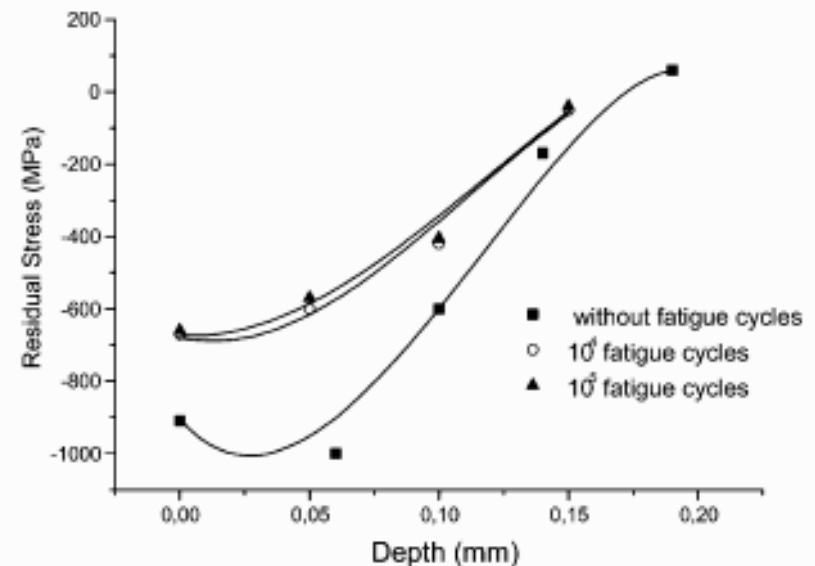
?

UM ESTUDO REALIZADO COM O AÇO AISI 4340

Medição do campo de tensões residuais após um dado número de ciclos



Condição 0,0083A, nível 4.



Condição 0,0063A, nível 4.

RELAXAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS INDUZIDAS.

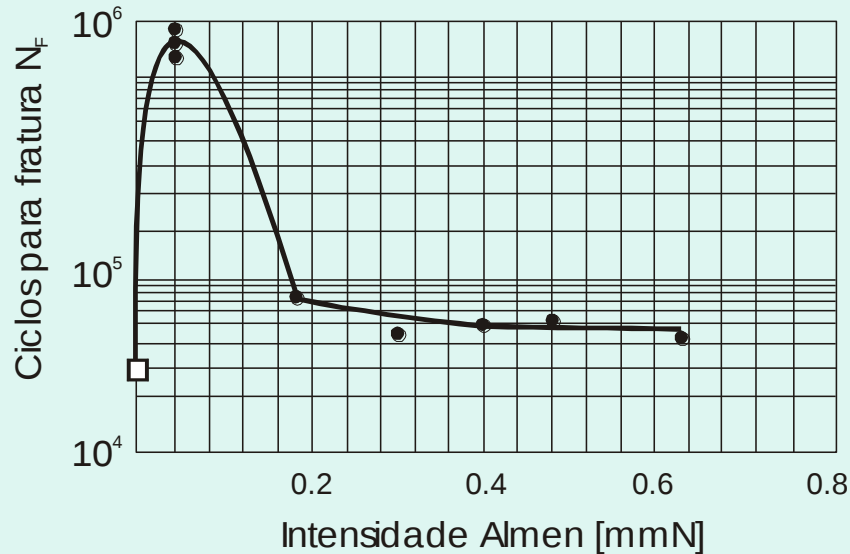
UM ESTUDO REALIZADO COM O AÇO AISI 4340

Medição do campo de tensões residuais após um dado número de ciclos

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.

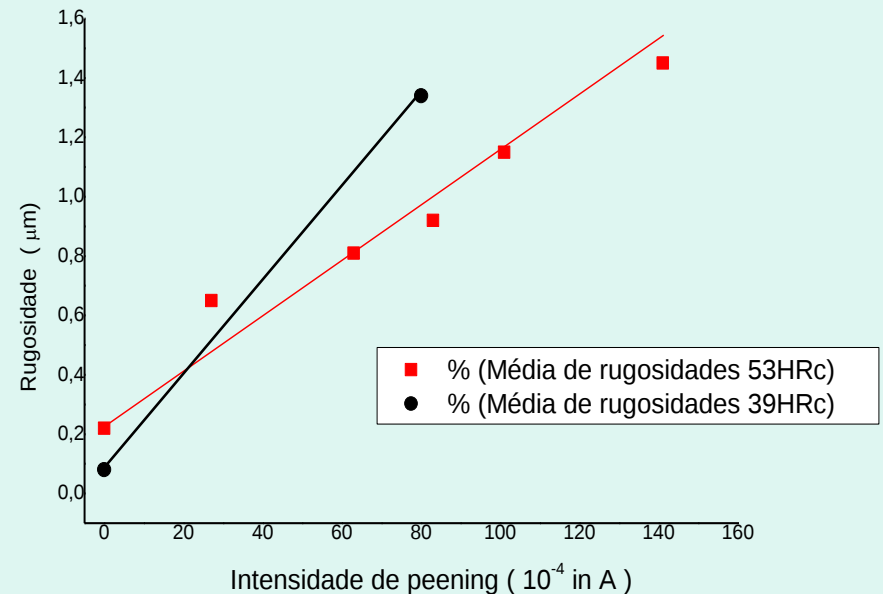
UM ESTUDO REALIZADO COM O AÇO AISI 4340

Efeito de outros fatores, como a Rugosidade



Dados para liga de Mg AZ80 (Wagner, 1999).

Rugosidade no aço 4340 após Shot Peening.





FIM DA PARTE 7