

**ESTUDO DA TÉCNICA ULTRA-SÔNICA DO TEMPO DECORRIDO  
EM ENTALHES INCLINADOS**

**AUTORES:** Luiz Cláudio F.L. Gomes  
(aluno de graduação do Dept<sup>o</sup> Metalurgia da UFRJ)

Carlos Alfredo Lamy  
(Instituto de Engenharia Nuclear/CNEN)

João Marcos Alcoforado Rebello  
(Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE-UFRJ)

Trabalho apresentado no  
IX Congresso Anual de Ensaios Não-Destrutivos  
São Paulo, novembro de 1989

## SINOPSE

Estudo da técnica ultra-sônica do tempo decorrido no dimensionamento de entalhes inclinados de 15 e 30 graus e de profundidades de 5 e 10 mm usando a onda superficial de Rayleigh e a conversão de modo, com um cabeçote transmissor e outro receptor.

O dimensionamento do entalhe e do ligamento da peça foi feito com cabeçotes em diferentes posições entre si e em relação aos entalhes.

Dentre os vários resultados obtidos pode ser citado o que mostra um aumento no subdimensionamento, pelas duas técnicas, com o aumento do ângulo e/ou da profundidade.

## I. INTRODUÇÃO

A maioria dos trabalhos na área de END por ultra-som, quanto ao dimensionamento de descontinuidades, sempre foi voltada prioritariamente para saber qual a(s) técnica(s) que pode dimensionar a menor descontinuidade ou qual a(s) técnica(s) que pode chegar a fornecer o menor erro de dimensionamento. Embora esses conhecimentos sejam importantes, eles passam a ser questionados e muitas vezes desprezados, principalmente por aqueles que lidam diretamente com a fabricação de componentes, uma vez que não é conhecida a confiança ou a repetibilidade dos resultados.

A confiança no dimensionamento depende de vários fatores que incluem a técnica e o equipamento usados, a capacidade do inspetor, as condições de trabalho durante o ensaio, a peça a ser examinada (superfície, geometria, etc), o tipo de descontinuidade a ser dimensionada, etc. Estudar todos esses fatores simultaneamente seria praticamente impossível, mas quanto mais bem conhecidos forem certamente maior será a confiança nos resultados obtidos.

Iunes et al<sup>(1)</sup> estudaram a técnica do tempo decorrido ("time delay", "time-flight") em trincas ortogonais à superfície e de diferentes profundidades (Figura 1) utilizando a onda ultra-sônica superficial de Rayleigh

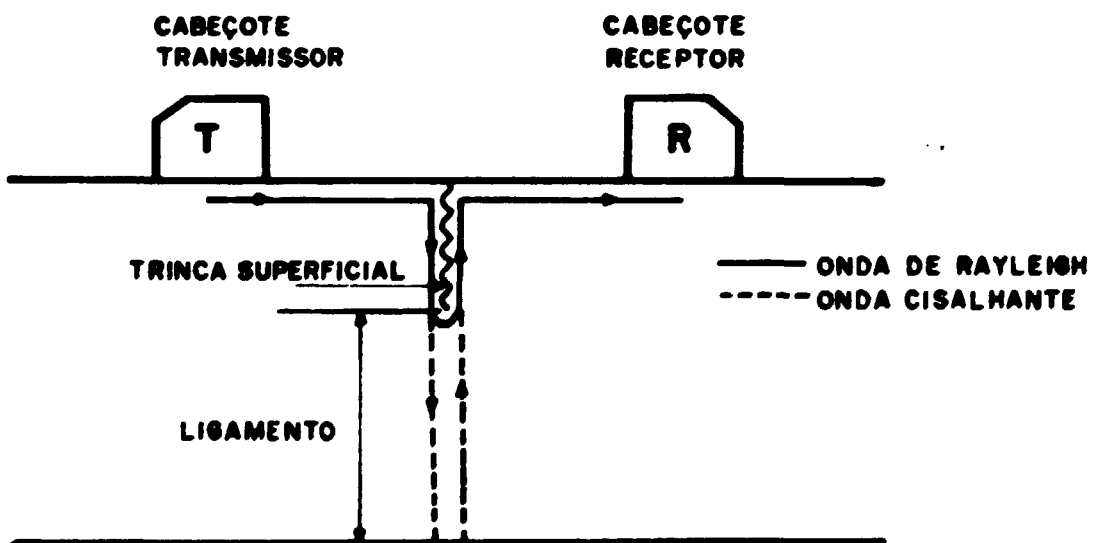


Figura 1. Esquema da técnica usada por Iunes et al<sup>(1)</sup> e neste trabalho

e a conversão de modo em onda cisalhante dentro da peça (ligamento), avaliando assim a dimensão da trinca e do ligamento através do tempo que a onda levava para ir do cabeçote transmissor ao receptor. Entretanto, na região da ponta da trinca geralmente existem tensões compressivas que apertam de tal forma suas faces entre si que fazem a onda ultra-sônica, no caso, a superficial de Rayleigh contornar a trinca antes de chegar na sua extremidade, percorrendo assim um caminho menor e ocasionando um subdimensionamento. Devido a isto, Iunes et al.<sup>(1)</sup> estudaram esta técnica em peças trincadas que eram submetidas a ensaios de tenacidade à fratura (Crack Opening Displacement - COD), com carregamento em três pontos, podendo então avaliar como esta técnica ultra-sônica dimensionava a trinca à medida que as suas faces eram separadas (COD).

Trincas superficiais entretanto podem seguir vários caminhos, durante sua propagação, tomando diferentes formas. Quanto mais bem conhecido o comportamento desta técnica para diferentes formatos de trincas maior será a confiança no dimensionamento. No trabalho aqui apresentado, esta técnica foi estudada no dimensionamento de entalhes superficiais de diferentes inclinações e profundidades, onde pode ser obtido seu comportamento básico sem os fatores perturbadores de uma trinca (rugosidade, fechamento das faces da trinca, etc).

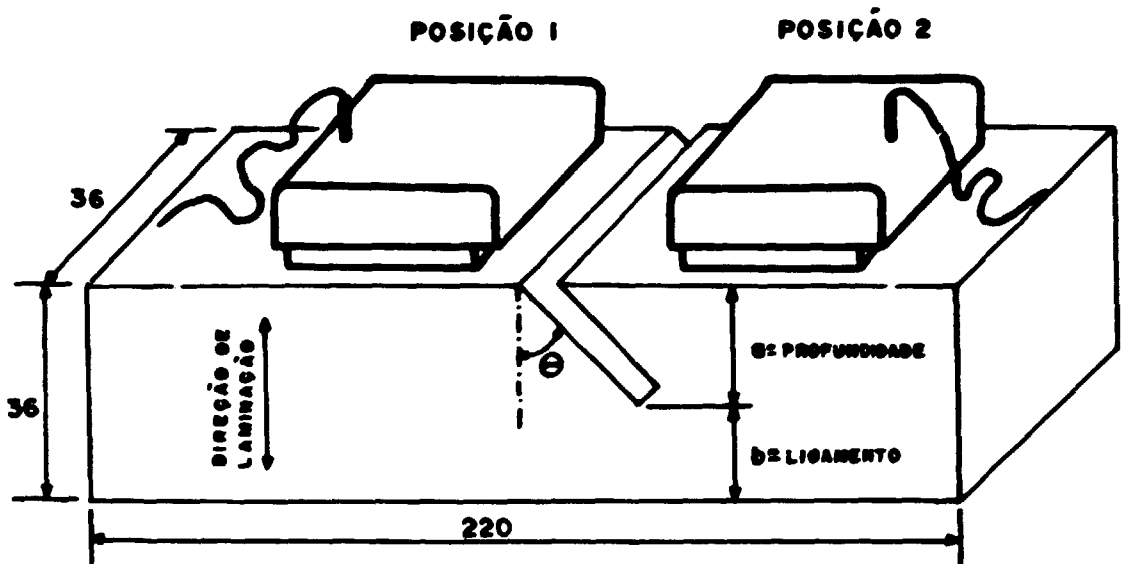
## II. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Foram confeccionados quatro corpos de prova no total, com dimensões 36 x 36 x 220 mm, com entalhes no meio da peça e inclinados de 15° e 30°, sendo que a cada ângulo correspondia duas profundidades diferentes, 5 mm e 10 mm, e os cabeçotes transmissor e receptor eram acoplados como mostra a Figura 2.

Os cabeçotes ultra-sônicos usados eram de onda superficial de Rayleigh, marca Krautkrämer, 4MHz. O aparelho era marca Krautkrämer e modelo USIP 11, e o acoplante vaselina líquida.

A peça era de aço ASTM A 283 C com superfícies plainadas. Todos os entalhes também foram feitos na plaina. A rugosidade superficial  $R_a$  das peças não ultrapassam 20  $\mu\text{m}$ .

Em cada corpo de prova foi feito o mesmo tipo de ensaio que consistia em colocar os cabeçotes transmissor e receptor próximos ao entalhe, distanciando 2 mm, e ir afastando-os em distâncias fixas (i) só o cabeçote transmissor; (ii) só o cabeçote receptor; (iii) os dois cabeçotes de forma equidistante do entalhe. Foi feito o mesmo procedimento invertendo a posição dos cabeçotes em relação à inclinação do entalhe, perfazendo um total de 6 configurações para cada corpo de prova. A distância entre os cabeçotes era dada por blocos-padrão de distância que variaram de 2 mm a cerca de 90 mm. A cada distância entre os cabeçotes a tela do aparelho ultra-sônico era fotografada, registrando assim o dimensionamento que estava sendo feito do entalhe na respectiva posição, tanto pela onda de Rayleigh como pela conversão de modo.



Unidades em mm

$\theta_1 = 15^\circ$	$\rightarrow$	$a_1 = 5 \text{ mm}$	corpo de prova 1
		$a_2 = 10 \text{ mm}$	corpo de prova 2
$\theta_{11} = 30^\circ$	$\rightarrow$	$a_3 = 5 \text{ mm}$	corpo de prova 3
		$a_4 = 10 \text{ mm}$	corpo de prova 4

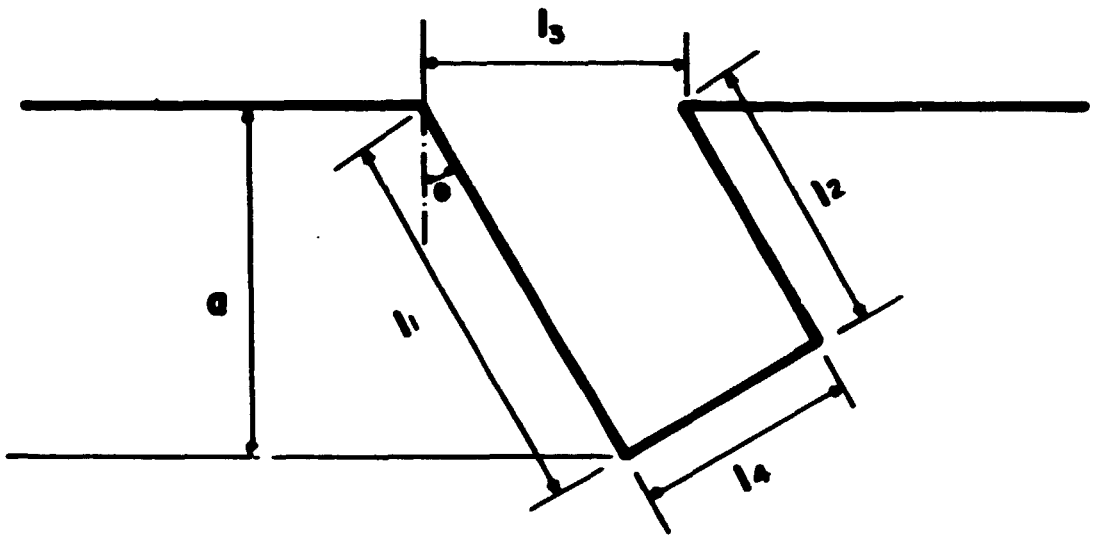
Figura 2. Esquema da peça entalhada e dos cabeçotes acoplados para os ensaios

É bom observar que a onda de Rayleigh, contornando o entalhe dimensionava o comprimento do seu contorno e não a profundidade "a", enquanto que a conversão de modo, através da onda cisalhante que penetrava na peça, dimensionava o ligamento.

A medida real do contorno do entalhe foi obtida por um projetor de perfis, marca Nikon, de precisão até 0,001 mm e de ângulo até 1 minuto, com ampliação de 20 vezes.

O pico que aparece na tela do aparelho ultra-sônico mostra um valor (V) de caminho percorrido pela onda de Rayleigh que vale (Figura 3):

$$V = \text{distância entre os cabeçotes dada pelos blocos-padrão de distância} + \text{contorno total do entalhe } (\ell_1 + \ell_2 + \ell_4) - \text{abertura do entalhe na superfície } (\ell_3) \quad (1)$$



$a =$	profundidade do entalhe
$\ell_1 + \ell_2 + \ell_4 =$	contorno total do entalhe
$\ell_3 =$	abertura do entalhe na superfície
$\theta =$	ângulo do entalhe

Figura 3. Dimensões do entalhe para ser obtido seu valor real

Para efeito de avaliação do dimensionamento foram comparados o valor medido (V), pelo aparelho ultra-sônico usando a onda de Rayleigh, e o valor real do entalhe.

Foi considerado como valor real do entalhe a soma  $\ell_1 + \ell_2$  (Figura 3), e este valor era comparado com V, obtido do aparelho ultra-sônico, que fornecia o  $\ell_1 + \ell_2$  medido pelo aparelho, uma vez que na fórmula (1) eram colocados os valores  $\ell_3$  e  $\ell_4$  reais. Este critério pareceu o mais razoável uma vez que mostra como a onda de Rayleigh percorria o contorno de uma "trinca" com cantos vivos, pois no cálculo de V já havia sido tirada a diferença de comprimento entre a distância entre faces na superfície ( $\ell_3$ ) e o fundo do entalhe ( $\ell_4$ ).

O ligamento (b) da peça (Figura 2) foi medido pelo aparelho ultra-sônico através da diferença das distâncias entre o segundo pico (onda cisalhante que refletia no fundo da peça) e o primeiro pico (onda de Rayleigh que contorna o entalhe), dividida por 1,84 (dobro de 0,92) uma vez que a velocidade da onda de Rayleigh é aproximadamente 92% da velocidade da onda cisalhante.

Todos os valores obtidos foram tirados de fotos da tela do aparelho ultra-sônico, e o valor relativo ao dimensionamento foi considerado o encontro da projeção da maior parte reta do lado esquerdo do pico com a linha de base. As fotos foram tiradas com uma máquina Pentax 35 mm, com lente normal de 50 mm e luz local. O filme usado foi o Kodak TRI-X PAN 400 ASA.

Foram montadas tabelas onde constam a distância entre os cabeçotes, o dimensionamento feito pela onda de Rayleigh (OR) e o seu erro (valor lido-valor real), o dimensionamento do ligamento feito pela conversão de modo (CV) e o seu erro (ligamento lido-ligamento real), intensidade do pico da onda de Rayleigh e da conversão de modo em relação a altura da tela.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram usados os seguintes símbolos:

- |   |                      |
|---|----------------------|
| T | cabeçote transmissor |
| R | cabeçote receptor    |

CV            conversão de modo  
 OR            onda de Rayleigh  
 $P_1 + D_2$     distância entre os cabeçotes

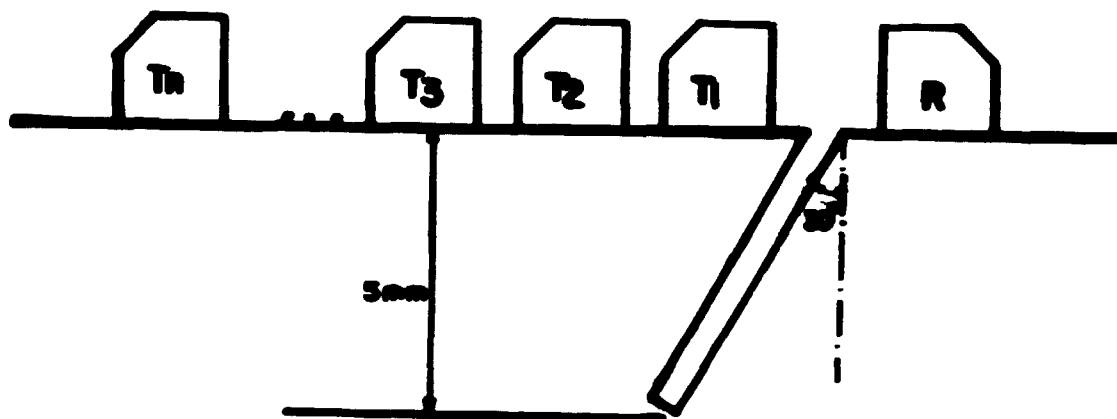


Figura 4. Esquema do ensaio da configuração do exemplo 1, onde R fica sempre na mesma posição, e T fica em várias posições ( $T_1, T_2, T_3 \dots T_n$ ) se afastando do entalhe. A cada posição de T corresponde uma foto da tela do aparelho ultra-sônico

É dado aqui o nome de configuração à posição que os cabeçotes T e R apresentam em relação ao entalhe inclinado e qual deles se afasta.

Por exemplo: Entalhe com 5 mm de profundidade; T no lado do ângulo agudo do entalhe; R no lado do ângulo obtuso do entalhe. Durante o ensaio R fica sempre na mesma posição (parado) e T é colocado em várias posições, variando de 2 mm a 90 mm de R (afastando-se de R) (Figura 4). Sendo que de 2 a 10 mm T foi posicionado de 2 em 2 mm, e de 10 a 90 mm, T foi posicionado de 5 em 5 mm.

Para caracterizar completamente uma dada configuração foram usados símbolos, e para a Figura 4 o código seria:



ST < RT & O 30, o que significa que o ensaio é em peça com entalhe de 5 mm de profundidade, o símbolo < significa que R está do lado do ângulo obtuso do entalhe; T se afasta e o O no lugar de R significa que este não altera sua posição durante o ensaio; 30 é o ângulo do entalhe em graus.

Foi suposto que os resultados seguem uma distribuição normal e foi calculado o erro médio para cada configuração, não no sentido de achar um erro geral para todo o ensaio, mas sim para analisar as tendências. Foram também calculados o desvio padrão dos erros com o intuito de analisar o grau de dispersão em relação ao valor médio dos erros, o que é importante para avaliar a possibilidade de ocorrência de resultados grosseiros e aleatórios. Esses valores do desvio padrão não foram usados em termos absolutos e sim em termos relativos entre as diversas configurações.

São apresentados abaixo a média dos erros, sendo que os valores entre parêntesis são dados em mm e o primeiro valor corresponde à configuração "T e R" (isto é, o T e R se afastam), o segundo valor corresponde à configuração "T e O" (isto é, T se afasta e R fica parado), e o terceiro valor à configuração "O e R" (isto é, T fica parado e R se afasta).

#### . 15 graus

		OR	
5 mm	T < R	super	(0.33, 0.63, 0.35)
	T > R	super	(0.46, 0.43, 0.48)
10 mm	T < R	super	(-0.07, 0.09, 0.13)
	T > R	super	(0.13, 0.07, 0.10)
		CV	
5 mm	T < R	sub	(-0.97, -0.49, -0.02)
	T > R	sub	(-1.02, -0.15, -0.48)
10 mm	T < R	sub	(-1.07, -1.02, -0.89)
	T > R	sub	(-1.08, -0.94, -0.86)

#### . 30 graus

		OR	
5 mm	T < R	super	(0.46, 0.31, 0.17)
	T > R	super	(0.39, -0.09, 0.14)
10 mm	T < R	sub	(-0.23, -0.13, -0.18)
	T > R	sub	(-0.27, -0.07, -0.33)
		CV	
5 mm	T < R	sub	(-0.85, -0.61, -0.60)
	T > R	sub	(-0.56, -0.62, -0.60)
10 mm	T < R	sub	(-1.83, -1.83, -1.88)
	T > R	sub	(-1.83, -1.86, -1.74)

A seguir são apresentados o desvio padrão, seguindo a mesma correspondência e unidades usadas para as médias:

**. 15 graus**

		OR	
5 mm	T < R		(0.21, 0.31, 0.23)
	T > R		(0.47, 0.35, 0.60)
10 mm	T < R		(0.36, 0.33, 0.38)
	T > R		(0.38, 0.13, 0.41)

		CV	
5 mm	T < R		(0.20, 0.36, 0.20)
	T > R		(0.30, 0.23, 0.34)
10 mm	T < R		(0.31, 0.33, 0.27)
	T > R		(0.21, 0.22, 0.19)

**. 30 graus**

		OR	
5 mm	T < R		(0.35, 0.58, 0.35)
	T > R		(0.40, 0.44, 0.47)
10 mm	T < R		(0.46, 0.18, 0.27)
	T > R		(0.58, 0.11, 0.39)

		CV	
5 mm	T < R		(0.21, 0.30, 0.21)
	T > R		(0.32, 0.18, 0.24)
10 mm	T < R		(0.41, 0.15, 0.20)
	T > R		(0.41, 0.21, 0.34)

**A) Pode ser observado para os entalhes de 15 graus**

**1. Usando a onda de Rayleigh (OR)**

Nas profundidades de 5 mm, há uma tendência a superdimensionar tanto para configuração T > R como para T < R.

Para as profundidades de 10 mm, não há uma tendência nítida para as configurações de T > R e T < R.

**2. Usando a conversão de modo (CV)**

Tende a subdimensionar, sendo que este subdimensionamento é maior para as profundidades de 10 mm do que para as de 5 mm.

### 3. Usando OR

A configuração  $T > R$  apresenta maiores erros e maior dispersão dos resultados do que  $T < R$ , para a profundidade de 5 mm. Para a profundidade de 10 mm não há uma tendência nítida.

### 4. Usando CV

Todas as configurações apresentam um subdimensionamento, sendo que para a profundidade de 5 mm há um subdimensionamento menor do que para a de 10 mm.

## B) Pode ser observado para os entalhes de 30 graus

### 1. Usando OR

Nas profundidades de 5 mm tende a superdimensionar.

Nas profundidades de 10 mm tende a subdimensionar.

### 2. Usando CV

Tende a subdimensionar, sendo esta tendência maior para as profundidades de 10 mm do que as de 5 mm.

### 3. Tanto para OR como para CV não houve uma diferença significativa nos erros e na dispersão dos resultados relativamente as configurações $T > R$ e $T < R$ .

## C) Pode ser observado para os ângulos de 15 e 30 graus

1. OR é sempre maior que CV com os cabeçotes na mesma posição.

2. A avaliação da profundidade de 5 mm é sempre maior, no máximo igual, à de 10 mm.

3. Há uma tendência a subdimensionar com o aumento do ângulo, tanto OR como CV.

#### D) Comentários

- 1 O erro de leitura da tela do aparelho é de 0,5 mm. A média dos dimensionamento de OR, tanto para 5 como para 10 mm de profundidade, em 15 ou 30 graus, é menor que 0,5 mm. Porém, o erro deste dimensionamento não pode ser considerado zero na prática, uma vez que com o desvio padrão ele fica maior que o erro de leitura.
2. Quando OR superdimensiona há uma tendência de CV subdimensionar. Isto é razoável uma vez que é o 1º pico da tela que fornece o dimensionamento por OR; e a diferença entre o 2º pico e este 1º pico fornece o dimensionamento por CV. Ora, um erro de leitura da tela do aparelho que forneça um superdimensionamento por OR significa que este pico foi lido mais à direita do seu posicionamento real, ou seja, mais próximo do 2º pico, fazendo com que a diferença do 2º pico para o 1º fique menor, causando assim um subdimensionamento por CV.

#### IV. CONCLUSÃO

Foi estudada a técnica ultra-sônica do tempo decorrido no dimensionamento de entalhes inclinados (15 e 30 graus) de diferentes profundidades (5 e 10 mm), pode ser concluído que:

1. Há uma tendência a subdimensionar com o aumento do ângulo e/ou aumento da profundidade, tanto para a técnica da onda de Rayleigh como para a da conversão de modo sendo que a técnica da conversão de modo tende a um subdimensionamento maior que a da onda de Rayleigh, embora apresente menor dispersão nos resultados.
2. A técnica da onda de Rayleigh superdimensiona, ou no máximo fornece o valor praticamente real, em entalhes de profundidades de 5 mm de 15 e 30 graus. Em entalhes de profundidade 10 mm ela fornece praticamente o valor real em ângulos de 15 graus, e subdimensiona em ângulos de 30 graus.
3. A técnica da conversão de modo subdimensiona, ou no máximo fornece o valor praticamente real, em entalhes de profundidades de 5 mm com ângulo de 15 graus. Para entalhes com esta profundidade e ângulo de 30

graus ela subdimensiona, e subdimensiona também em entalhes de 10 mm de profundidade de 15 ou 30 graus.

## V. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Iunes, P.L.C.; Lamy, C.A.; Rebello, J.M.A. - "Dimensionamento de Trincas Superficiais através da Técnica Ultra-Sônica do Tempo Decorrido ('time-delay')". In: VI Seminário Nacional de Ensaios Não-Destrutivos, ABENDE, Rio de Janeiro, ago/set 1987, 24p.