

## ANÁLISE COMPARATIVA DA TENACIDADE ENTRE CILINDROS DE AÇO FUNDIDO E FORJADO APLICADOS NA LAMINAÇÃO A QUENTE DE NÃO-PLANOS

MIGUEL ANGELO DE CARVALHO (1)  
ARNALDO H. PAES DE ANDRADE (2)  
MARIA CONCEIÇÃO B. V. SOARES (3)  
EDUARDO CANNIZZA (4)  
MARCOS A. STUART NOGUEIRA (5)

- (1) Supervisor da Eng<sup>a</sup> de Produto-Cilindros, Aços Villares
- (2) Doutor em Metalurgia, IPEN-CNEN/SP
- (3) Mestre em Engenharia, IPEN-CNEN/SP
- (4) Assistente Técnico de Cilindros, Aços Villares S.A. e VIBASA
- (5) Gerente de Produto-Cilindros, Aços Villares S.A. e VIBASA

### RESUMO

O desenvolvimento de materiais para cilindros de laminação tem para algumas aplicações a necessidade da avaliação da tenacidade. Essa análise é crítica para cilindros desbastadores com canais profundos para laminação a quente de não planos. Podem ocorrer rupturas nesses cilindros a partir de trincas térmicas nucleadas nas raízes desses canais. Para essas aplicações vem sendo especificado cilindros de aço fundido ou forjado com melhor resistência à quebra para esse último.

A Aços Villares S.A. em conjunto com o IPEN vêm caracterizando a tenacidade de família de materiais utilizados nestas aplicações. São apresentados os resultados de diferentes ensaios para a avaliação comparativa da tenacidade entre um cilindro de aço forjado e um cilindro de aço fundido do tipo: 1,4% C-1,0% Cr-1,0% Ni. O cilindro forjado apresentou melhores resultados de tenacidade quando avaliada através de ensaios de impacto com e sem entalhe, além de melhores resultados de resistência mecânica, estrição e alongamento para mesmos valores de dureza. A tenacidade avaliada pelo parâmetro  $K_{IC}$  nas duas condições de processamento situou-se no intervalo de 32 a 35MPa  $m^{1/2}$ . Essas observações estão relacionadas aos aspectos microestruturais do material nas duas condições.

## 1 - INTRODUÇÃO

Uma das maiores dificuldades no estudo de materiais para cilindros de laminação é obter ensaios de laboratório que possam avaliar seus desempenhos nos laminadores. A razão para esse fato é que os cilindros em uso ficam submetidos a solicitações das mais diversas naturezas, como fadiga térmica, oxidação, fadiga mecânica e desgaste<sup>(1, 2)</sup>.

Apesar dessa dificuldade, sabe-se da observação prática que os cilindros desbastadores e intermediários utilizados na laminação de perfis, figura 1, necessitam de alta tenacidade. Dependendo da intensidade das tensões térmicas e mecânicas atuantes, pode-se especificar cilindros de ferro fundido ou de aço fundido ou forjado para essa aplicação. Os cilindros de ferro fundido podem ser aplicados quando as tensões não são muito intensas e o mecanismo preponderante de consumo é o desgaste. Quando essas solicitações são intensas, a melhor opção recai sobre os cilindros de aço, material de maior tenacidade.

Um exemplo de especificação para desbastadores é o aço fundido, marca VILLARES VAF14A com 1,4C - 1,0 Cr - 1,0 Ni, que resiste mais à formação e à propagação de trincas decorrentes de fadiga do que os cilindros de ferro-fundido. Nos casos mais críticos, têm-se obtido melhor resistência à fadiga térmica e à quebra com cilindros de aço forjado do que com aço fundido. O objetivo deste trabalho é estudar os motivos para essa diferença de comportamento, por meio de ensaios de laboratório para avaliar a tenacidade de cilindros de aço VAF14A fundido ou forjado.

## 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido através da remoção de corpos de prova da superfície de cilindros fundido e forjado de geometrias idênticas conforme indicado no esquema da figura 2. As composições químicas dos cilindros e suas durezas eram iguais, tabela I.

Os cilindros após fundição e forjamento sofreram os mesmos ciclos térmicos de recozimento, de têmpera ao ar e de revenimento.

Os materiais foram submetidos a ensaios de tração, (ASTM A 370-92) de impacto CHARPY com entalhe V (ASTM E 23-92) e sem entalhe (NADCA # 207-90<sup>(3)</sup>) e de tenacidade a fratura,  $K_{IC}$  (ASTM E 399-92). As direções da remoção dos corpos de prova e o tipo destes estão indicados na figura 2. Foram considerados três corpos de prova para cada ensaio de tração e de impacto e dois corpos para os ensaios de  $K_{IC}$ .

As fraturas dos corpos de prova de  $K_{IC}$  foram observadas em microscópio eletrônico de varredura.

Foi realizada análise quantitativa dos carbonetos nos dois cilindros com microscópio óptico por contagem manual de pontos (ASTM E 562). Obteve-se fração volumétrica de carbonetos através da contagem da intersecção e tangência dos carbonetos num reticulado de cem nós. O tamanho de carboneto foi obtido medindo-se o comprimento do maior carboneto de cada campo. Contou-se trinta campos para cada material e calcularam-se as médias e os desvios-padrão. O tamanho de grão foi avaliado pelo método comparativo (ASTM E112).

### 3 - RESULTADOS

As microestruturas dos cilindros são formadas por perlita e carbonetos, figuras 3 e 4. Apesar de apresentarem a mesma fração volumétrica, os carbonetos têm maiores dimensões e estão mais heterogeneamente distribuídos no fundido, tabela II e figuras 3 e 4. No fundido, os carbonetos na forma de bastonetes estão distribuídos preferencialmente em regiões interdendríticas. O tamanho de grão é igual para os dois produtos, tabela II.

Os resultados dos ensaios mecânicos estão na tabela III. Para os mesmos valores de dureza o cilindro forjado apresentou limite de resistência superior ao fundido. Não foram detectados o limite de escoamento e a estrição nas amostras removidas do fundido.

O forjado apresentou maiores valores de energia absorvida nos ensaios de impacto, especialmente quando utilizaram-se corpos de prova sem entalhe, tabela III. Mesmo com essa diferença, a tenacidade avaliada pelo parâmetro  $K_{IC}$  foi igual para ambos cilindros, tabela III.

As figuras 5 e 6 mostram as análises das fraturas dos corpos de prova de  $K_{IC}$  para ambos materiais. Os aspectos das fraturas são de clivagem, com algumas regiões contendo dimples. Estes dimples praticamente inexistem no fundido.

A figura 7 apresenta um detalhe da fratura do material fundido em regiões de aglomerado de carbonetos, característica de suas regiões interdendríticas. Alguns desses carbonetos não sofreram fratura, apenas destacaram-se da matriz.

#### 4 - DISCUSSÃO

Os carbonetos na forma de bastonetes e de maiores dimensões atuaram como fortes agentes iniciadores de trincas, provocando a ruptura dos corpos de prova de tração sem deformação plástica significativa. Essa baixa ductilidade é refletida nos corpos de prova de impacto, especialmente naqueles sem entalhe. Quando o material é entalhado, tem-se uma redução acentuada da energia absorvida do forjado. As diferenças dos valores de energia absorvida caem muito entre os materiais forjado e fundido. No ensaio de tenacidade à fratura, cujo efeito concentrador de tensões é maior, pois o raio de curvatura da ponta da trinca é menor se comparado com o entalhe do ensaio CHARPY, os dois materiais acabam tendo os mesmos valores de  $K_{IC}$ . A figura 8 esquematiza uma possível explicação para esse fato. Aumentando o efeito concentrador de tensões dos entalhes dos corpos de prova, ao passar do ensaio de impacto CHARPY para o de  $K_{IC}$ , o tamanho da zona plástica gerada no ensaio diminui. Com essa redução, tem-se uma menor probabilidade dessa zona plástica atingir os grandes carbonetos do material fundido, pois esses carbonetos não são contínuos e estão distantes entre si de uma região que corresponde às distâncias interdendríticas do estado bruto de fusão. A tenacidade nessa situação passa a depender mais da matriz com os carbonetos mais finos. A matriz é praticamente a mesma nos dois casos, levando a um resultado próximo de  $K_{IC}$ .

Fato similar foi observado em outro trabalho<sup>(4)</sup> onde o parâmetro  $K_{IC}$  crescia com o aumento da temperatura de austenitização num aço-ferramenta para trabalho a quente temperado e revenido. Nesse caso concluiu-se que a tenacidade à fratura,  $K_{IC}$ , depende da relação do tamanho de grão com o diâmetro da zona plástica formada na frente da trinca<sup>(4)</sup>.

A dispersão de valores dos ensaios deve ser maior no material fundido do que no forjado pois, caso a zona plástica coincida com a região com esses carbonetos mais grosseiros, os valores de  $K_{IC}$  devem ser reduzidos consideravelmente. Essa diferença não foi mostrada nesse trabalho devido ao pequeno número de amostras consideradas.

Assim, os ensaios para avaliar a tenacidade devem ser analisados em conjunto quando são comparados materiais de grandes variações microestruturais. As diferenças microestruturais nos materiais utilizados neste trabalho foram tão grandes que chegaram a alterar os valores de limite de resistência dos ensaios de tração nas duas condições comparadas. Caso só fossem realizados ensaios para avaliação de  $K_{IC}$ , poderia-se ter falsa idéia do comportamento mecânico desses materiais nos laminadores. O tamanho de zona plástica formada na ponta das trincas térmicas geradas em serviço deve ser mais compatível com aquele formado no ensaio de impacto do que no ensaio de  $K_{IC}$ .

## 5 - CONCLUSÕES

A comparação entre o cilindro fundido e o forjado mostrou que:

- para uma mesma fração volumétrica dos carbonetos e mesmo tamanho de grão austenítico, o forjado possui maior homogeneidade microestrutural e um menor tamanho de carbonetos em relação ao fundido;
- o forjado apresenta um maior limite de resistência a tração e maior energia absorvida em ensaios de impacto com corpos de prova com e sem entalhe do que o fundido para mesmos valores de dureza. Essas diferenças não foram observadas nos ensaios de tenacidade à fratura -  $K_{IC}$ .

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Manganello, S. J.; Churba, D. R. - "ROLL FAILURES AND WHAT TO DO WHERE THEY OCCUR" - Iron and Steelmaker, 12, 1980.
- 2) Mittalow, F. A. et al - "MILL MONITORING TO DETERMINE THE EFFECT OF VARIABLES ON FIRECRACKING AND BREAKAGE IN BAR MILL ROLLS" - Proceedings of XXIII Mechanical Working and Steel Processing Conference, vol. XIX, p. 175-201, 1981.
- 3) NADCA # 207-90, "Premium Quality H-13 Steel Acceptance Criteria for Pressure Die Casting Dies", 1990.
- 4) PACYNA, J. & MAZUR, A., "The Influence of Grain Size Upon the Fracture Toughness of the Hot-Work Tool Steel", Scandinavian Journal of Metallurgy 12 (1983) 22-28.

ELEMENTO QUÍMICO (%)	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S
DESIGNAÇÃO VILLARES								
VAF14A	1,35	0,40	1,10	1,00	1,05	0,55	0,020	0,015

Tabela I - Composição química da liga VAF14A.

CILINDRO	TAMANHO DE CARBONETOS ( $\mu\text{m}$ )		FRAÇÃO VOLUMÉTRICA (%)		TAMANHO DE GRÃO ASTM E112 - MÉTODO COMPARATIVO
	$\bar{X}$	s	$\bar{X}$	s	
FORJADO	10,9	2,4	8,3	2,3	8
FUNDIDO	27,4	17,8	8,8	4,7	8

Tab. II - Resultados do tamanho de carbonetos, fração volumétrica e tamanho de grão dos cilindros forjado e fundido em VAF14A.

CILINDRO	TRAÇÃO				IMPACTO		KIC (MPa m <sup>1/2</sup> )
	LR (kgf/mm <sup>2</sup> )	LE (kgf/mm <sup>2</sup> )	Z (%)	A (%)	C/ ENTALHE (J)	S/ ENTALHE (J)	
FORJADO	108,0	102,0	4,00	3,00	3,5	25,6	32,78 / 34,09
FUNDIDO	64,0	---	--	0,77	2,6	6,7	32,00 / 35,20

Tab. III - Resultados dos ensaios mecânicos realizados nas amostras dos cilindros forjado e fundido em VAF14A.

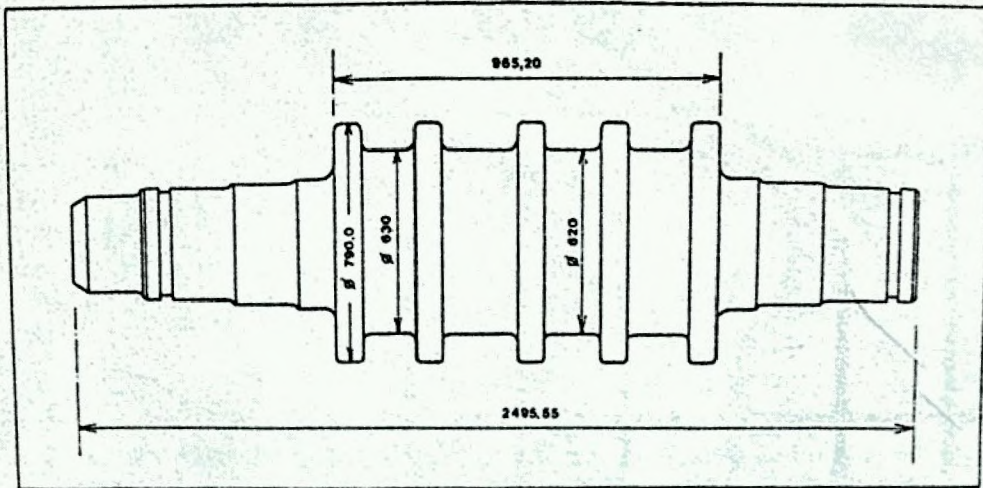


Fig. 1 - Cilindro desbastador utilizado na laminação de perfis.

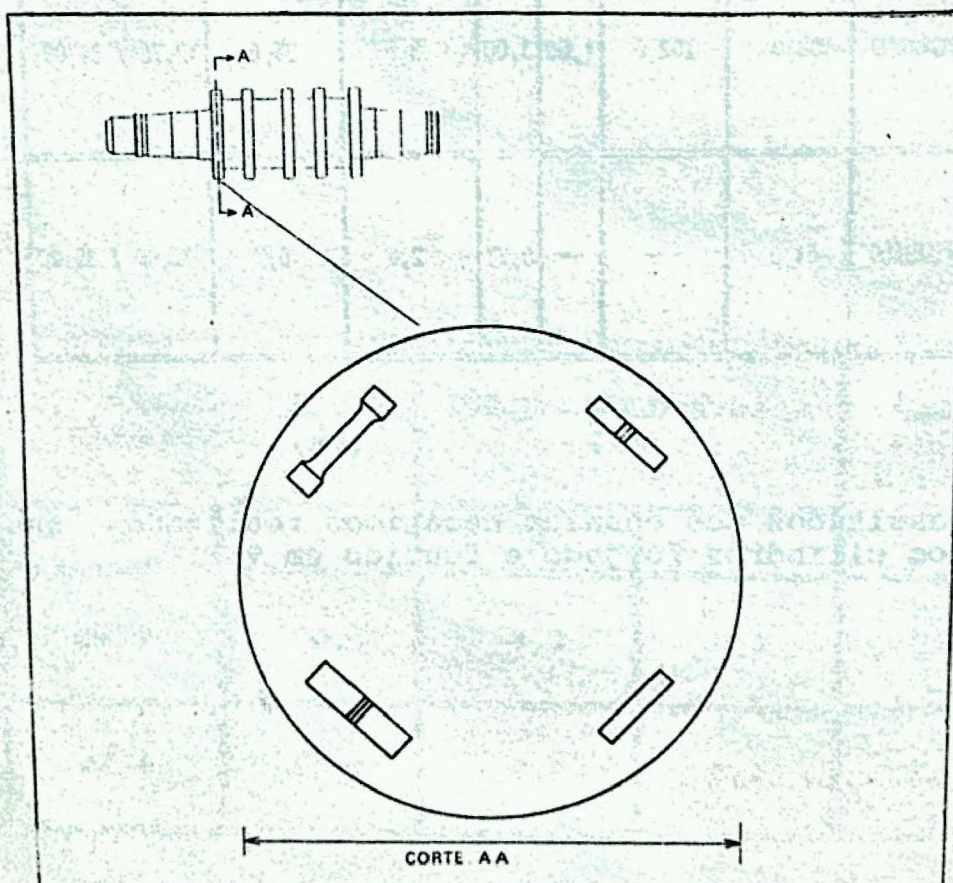
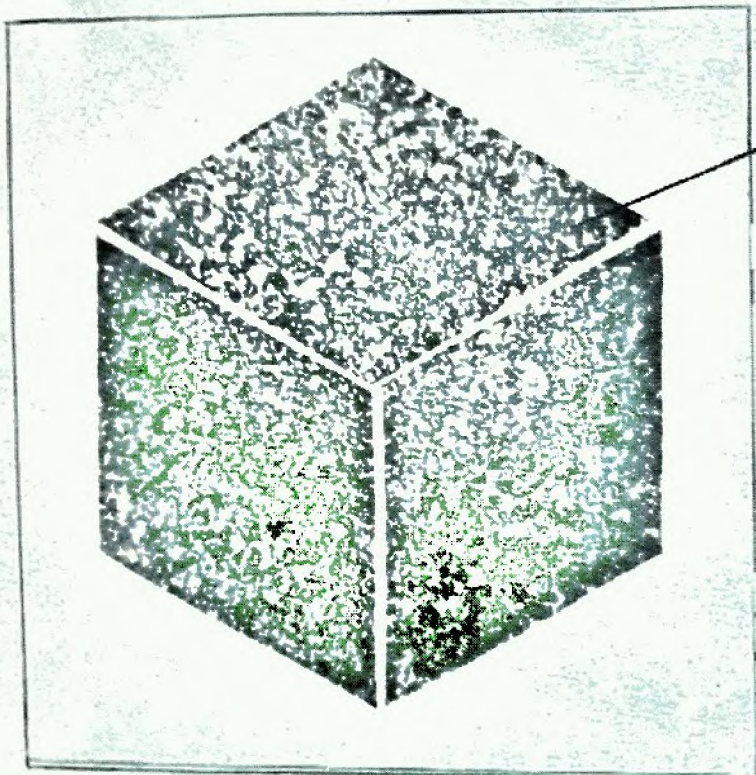


Fig. 2 - Esquema ilustrativo da retirada de corpos de prova de tração, impacto CHARPY com entalhe, impacto "NADCA" sem entalhe e K<sub>IC</sub>.



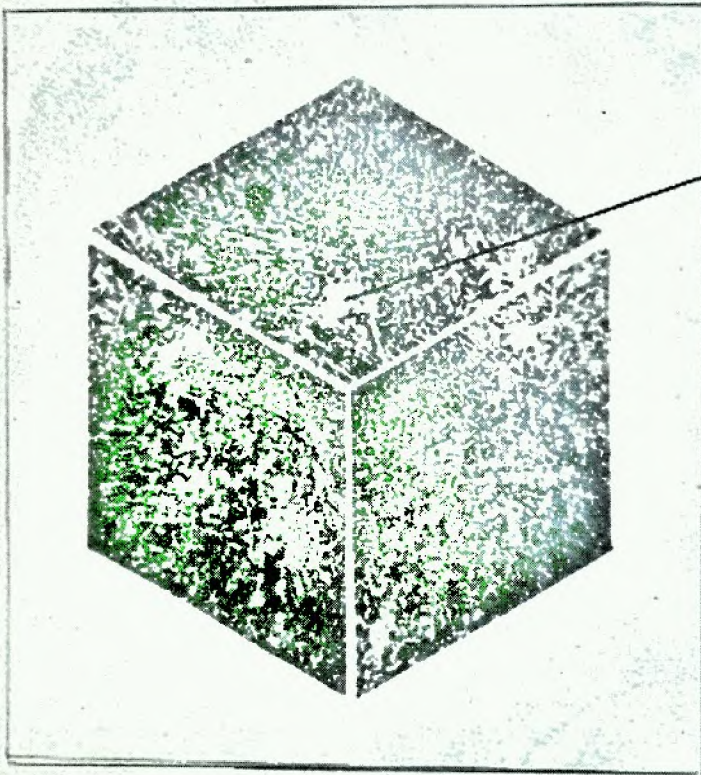
Nital 4%

75 X



Nital 4% 500 X

Fig. 3 - Microestrutura da superfície do cilindro forjado constituída de perlita e carbonetos.



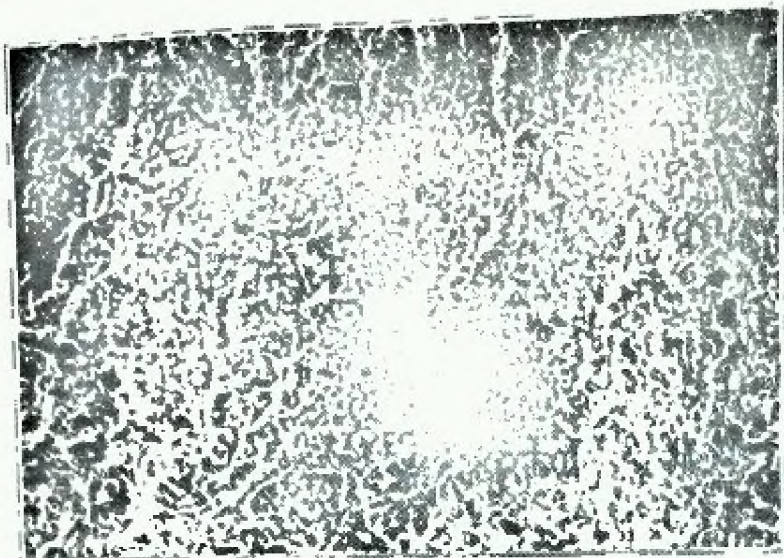
Nital 4%

75 X

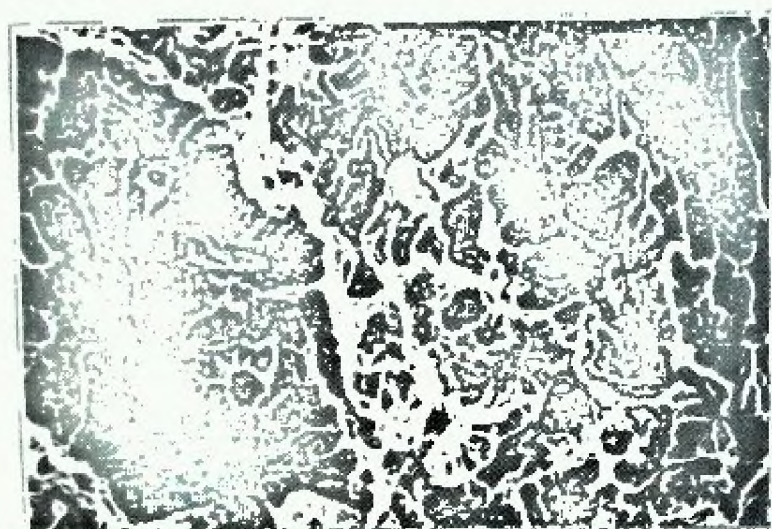


Nital 4% 500 X

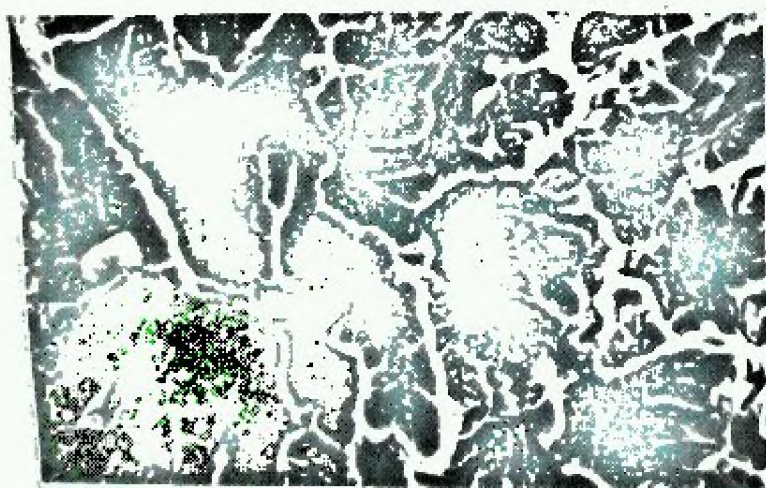
**Fig. 4 -** Microestrutura da superfície do cilindro fundido constituída de perlita e carbonetos.



(A)



(B)

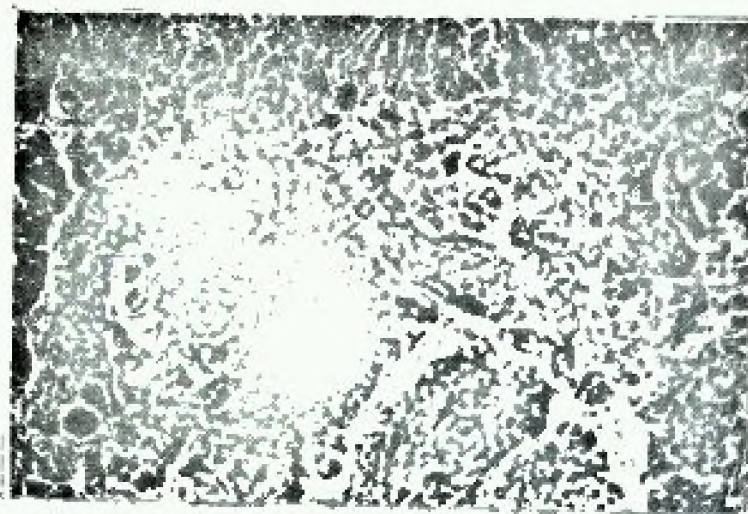


(C)

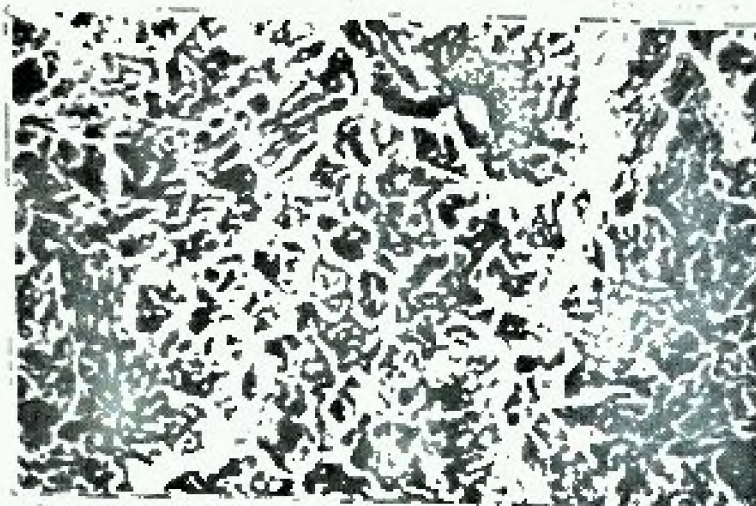
**Fig. 5** - Imagens de elétrons secundários das fraturas dos corpos de prova de  $K_{IC}$  para o cilindro forjado

O aspecto da fratura é de clivagem e apresenta dimples em poucas regiões.

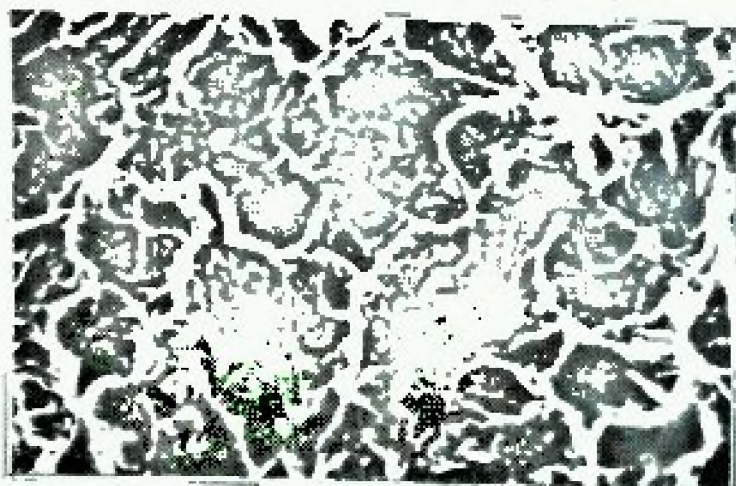
**Aumentos:** (A) = 140 x  
(B) = 1000 x  
(C) = 2000 x



(A)



(B)



(C)

Fig. 6 - Imagens de elétrons secundários das fraturas dos corpos de prova de  $K_{IC}$  para o cilindro fundido.

O aspecto da fratura é de clivagem e praticamente não são notadas regiões com dimples.

Aumentos: (A) = 140 x  
(B) = 1000 x  
(C) = 2000 x

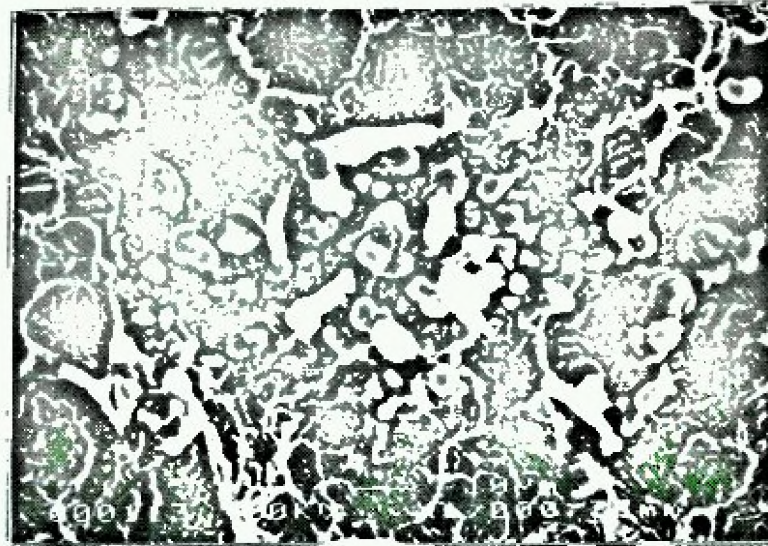
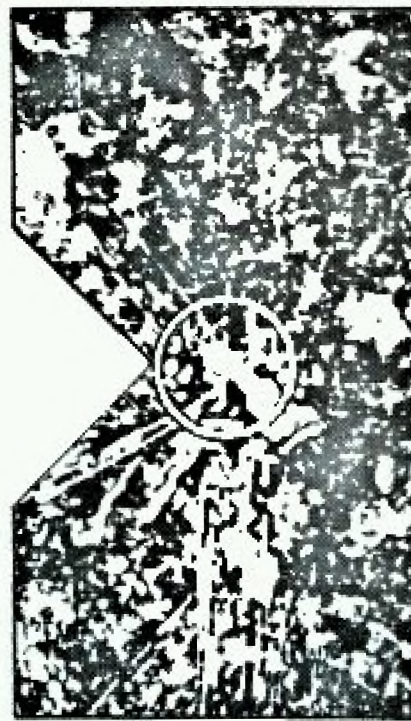


Fig. 7 - Imagem de elétrons secundários da fratura de corpo de prova de  $K_{IC}$  do cilindro fundido. Detalhe do aglomerado de carbonetos.



(a)



(b)

Fig. 8 - Esquema representativo das zonas plásticas dos corpos de prova de: CHARPY (a) e  $K_{IC}$  (b) para o material fundido.