

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA

CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA DE RODAS FERROVIÁRIAS E
CORRELAÇÃO COM A TENACIDADE À FRATURA

Trabalho de Diplomação

André R. Froehlich

Porto Alegre, 1993 / 1

OBJETIVO

Caracterizar as propriedades mecânicas e metalúrgicas de algumas rodas ferroviárias de aço de diferentes fabricantes, para uso em condições de alto carregamento, definindo qual material apresenta maior qualidade.

RESUMO

O presente trabalho aborda as características metalúrgicas de rodas ferroviárias de origem distintas, uma americana e outra sueca.

Para tal realizou-se um embasamento bibliográfico, buscando um conhecimento geral sobre o assunto. A abordagem bibliográfica enfocou aspectos como materiais empregados, propriedades mecânicas e metalúrgicas exigidas, processos de fabricação e outros, propiciando uma boa análise dos resultados obtidos.

A caracterização metalúrgica do aço empregado nas rodas abrangeram análise química, macroestrutura, perfis de dureza, micrografia, inclusões presentes, ensaios mecânicos, tensões residuais e tenacidade a fratura. Os ensaios obedecem a normas de procedimento, buscando a correlação entre os resultados de cada ensaio com as propriedades mecânicas. Para a obtenção dos resultados foram utilizados recursos desde a microscopia ótica, como luz polarizada e campo escuro, até a microscopia eletrônica de varredura, com realização de microanálise de inclusões.

Para finalizar, descreve-se a análise de resultados de forma clara, e conclusões mostrando as deficiências de características metalúrgicas de cada amostra.

A G R A D E C I M E N T O S

Agradeço ao pessoal do Laboratório de Metalurgia Física - LAMEF, em especial as estagiárias Liane Roldo, Michele Pessin e ao Prof. Telmo R. Strohaecker, assim como a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

1 - INTRODUÇÃO	01.
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 - ASPECTOS GERAIS DAS RODAS FERROVIÁRIAS	02.
2.2 - FABRICAÇÃO DE RODAS FERROVIÁRIAS	08.
2.2.1 - Rodas de Ferro Fundido Coquilhado	08.
2.2.2 - Rodas de Aço Forjado e Laminado	09.
2.2.3 - Rodas de Aço Fundido	10.
2.3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E ASPECTOS METALÚRGICOS ...	11.
2.4 - PRINCIPAIS DEFEITOS E SUAS ORIGENS	18.
2.5 - TENSÕES RESIDUAIS	21.
2.6 - PRINCÍPIOS DE MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA.	26.
3 - METODOLOGIA	
3.1 - ANÁLISE QUÍMICA	32.
3.2 - MACROATAQUE	32.
3.3 - PERFIS DE DUREZA	34.
3.4 - ANÁLISES METALOGRÁFICAS E INCLUSÕES	35.
3.5 - ENSAIOS MECÂNICOS	37.
3.6 - ENSAIOS DE TENSÕES RESIDUAIS	38.
3.7 - ENSAIOS DE TENACIDADE À FRATURA	41.
4 - RESULTADOS E ANÁLISES	
4.1 - ANÁLISES QUÍMICAS	42.
4.2 - ENSAIOS DE MACROATAQUE	43.
4.3 - RESULTADOS DOS PERFIS DE DURREZA	44.
4.4 - RESSULTADOS METALOGRÁFICOS E DE INCLUSÕES	49.
4.5 - RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	69.
4.6 - RESULTADOS DE TENSÕES RESIDUAIS	70.
4.7 - RESULTADOS DE TENACIDADE À FRATURA	72.

5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	75.
6 - CONCLUSÕES	77.
DIAGRAMA DE BLOCO COM OS RESULTADOS	79.
BIBLIOGRAFIA	80.

1 - INTRODUÇÃO

Em todo o mundo encontram-se diversas estradas de ferro em condições adversas de temperatura ambiente, com diferentes utilizações. Algumas destinadas a transporte de passageiros, outras à transporte de carga, com concepções de projeto e especificações de material adequadas para os casos específicos.

Vários fatores determinam estas concepções e especificações, tais como: Região em que todo o aparato ferroviário (trilhos, rodas, vagões, locomotivas, etc) irá operar, modo de frenagem e outros. A temperatura da região em que se encontra a linha se torna um fator importante, em função da mudança de comportamento dos aços em temperaturas baixas, ou seja, a temperatura de transição dúctil-clivagem, podendo determinar o uso de elementos de liga que baixem esta temperatura em aços de componentes ferroviários que trabalhem em regiões frias. O tipo de carregamento, pesado ou leve, de carga de passageiro, assim como também os diferentes tipos de frenagem a que as rodas e trilhos serão submetidos. frenagens severas ou não, por longos ou curtos períodos, determinam as diferenças nos designs das rodas, nos tratamentos térmicos a que o aço deva ser submetido e até o desenho da própria linha férrea.

A AAR - Association of American Railroads -, define 5 classes de aços a serem empregados em rodas ferroviárias, que buscam satisfazer as diferentes solicitações de trabalho a que estas estão submetidas. (1)

Devido a estas adversidades de condições de trabalho, além de classes de aços, desenvolveu-se diferentes designs para a adequação a estas condições nas diferentes estradas de ferro espalhadas pelo mundo.

Diversas especificações e métodos de controle dos materiais foram desenvolvidos com o passar dos anos, e abrangem desde a produção do aço até os tratamentos térmicos finais dos componentes ferroviários. Todas as especificações e métodos de controle primam pela obtenção de um aço de boa qualidade, com controle de inclusões, composição química adequada, e tratamentos térmicos que produzam as melhores propriedades frente as condições de trabalho a que os componentes estarão submetidos.

Portanto começa a se tornar necessário o conhecimento da qualidade metalúrgica dos aços empregados nos componentes de estradas de ferro, e o presente trabalho tem como objetivo, o estudo de rodas destinadas a transporte de carga pesada e condições moderadas de frenagem, produzidas por diferentes fabricantes (Americana e Sueca), no sentido de qualificar metalurgicamente e aço empregado.

Para tanto realizou-se uma revisão bibliográfica a respeito das propriedades mecânicas requeridas das rodas, e requisitos metalúrgicos necessários para um bom comportamento em serviço.

Baseado em normas de procedimento foram realizados ensaios mecânicos e caracterização metalúrgica das rodas de origem referida.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - ASPECTOS GERAIS DAS RODAS FERROVIÁRIAS

Existem várias concepções de projeto para rodas de aplicação em estradas de ferro. Procurar-se-á aqui fazer um apanhado geral de algumas destas concepções, dando um conhecimento geral sobre o assunto, sem aprofundar a abordagem

de projeto.

Os veículos ferroviários possuem rodas com diâmetros que variam de 0,90 a 1,10 m na Europa, sendo mais comum o emprego de diâmetros de 1,0 m, e na Espanha de 1,06 m. Na América os diâmetros empregados variam entre 0,76 e 0,91 m. (2,3)

Duas partes principais compõe as rodas, denominadas de: aro e centro (cubo). (2,3)

A figura 1 mostra uma roda e suas nomenclaturas e parâmetros dimensionais.

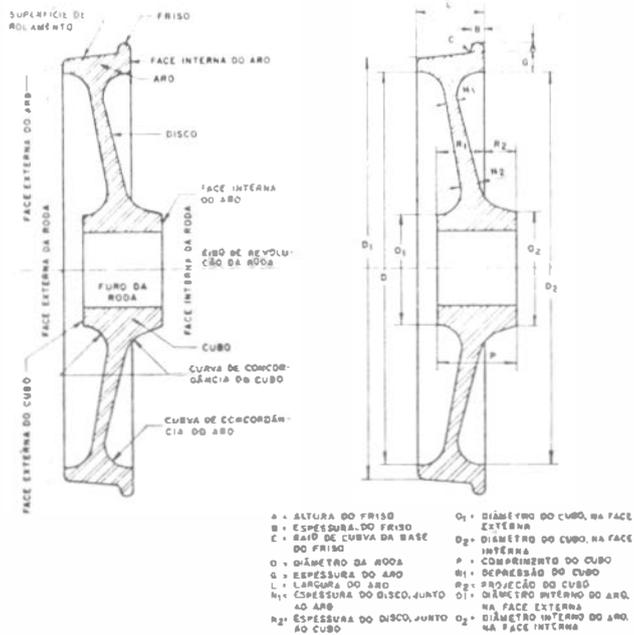


Fig. 1 - Nomenclatura e parâmetros dimensionais de rodas ferroviárias. (2)

O centro da roda possui uma grande durabilidade, podendo ser raiado ou cheio, sendo que as rodas raiadas estão em desuso, pois com o aumento das velocidades, estas apresentam o efeito de ventiladores, levantando pó e prejudicando os componentes. (2,3)

O aro contém a superfície de rolamento, e está submetido a grandes esforços e a desgaste, exigindo reparação ou substituição. A figura 2 mostra duas concepções de projeto diferentes, sendo em 2a visualizada a roda de centro cheio, e em 2b a roda de centro raiado. (3)

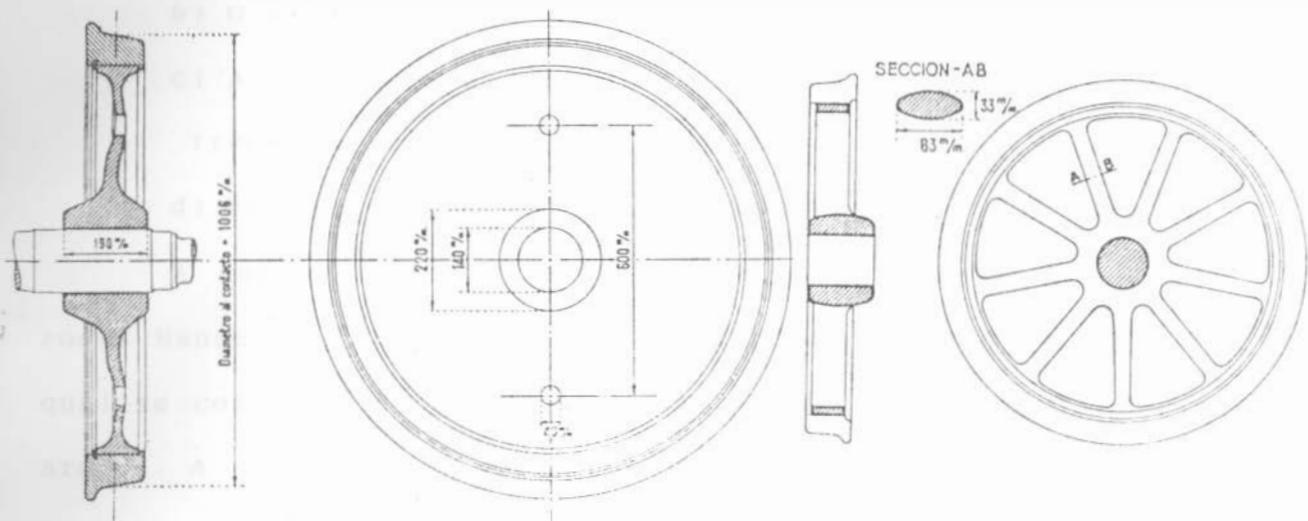


Fig. 2 - Diferentes concepções do centro da roda. Os furos mostrados em 2a são para fixação durante torneamento. (3)

Observa-se que nos dois casos apresentados na figura 2, o aro compõe um elemento a parte, o qual é fixado ao centro por dispositivos adequados. As rodas abordadas neste trabalho são inteiriças, ou seja, o centro e o aro fazem uma só peça, formando as rodas monobloco como mostrado na figura 1.

As rodas de centro cheio podem ser de disco reto ou ondulado em S ou duplo S, sendo que estas últimas são preferenciais, pois proporcionam uma maior elasticidade (3). Na figura 1 se observa o centro reto e em 2a um exemplo de disco ondulado.

Para se obter uma maior elasticidade e diminuir os efeitos dos impactos roda/trilho e as vibrações pelas rodas aos carros, muitos desenvolvimentos foram realizados, e resultaram em diversas concepções de rodas. Com estas concepções de projeto, buscou-se obter:

a) Absorção elástica dos choques verticais sobre a junção dos trilhos;

b) O amortecimento dos choques laterais;

c) A transmissão elástica dos esforços de arranque e frenagem;

d) Redução do ângulo de ataque na entrada de curvas.

A concepção mais simples com estes objetivos, foram as rodas Mansell, as quais eram formadas por um centro fundido, na qual se colocava um disco de madeira, sobre o qual se montava o aro⁽³⁾. A figura 3 mostra um esquema destas rodas.

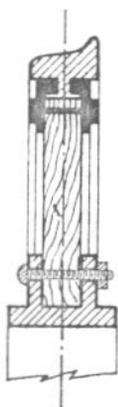


Fig. 3 - Roda Mansell, com disco de madeira para aumentar a elasticidade das rodas.

Com isto se aumentou a durabilidade da pista de rolamento dos aros, e assegurou-se um rodar mais suave e silencioso.

Outra concepção de rodas com objetivos semelhantes, envolve o uso de sistemas pneumáticos, sendo que o elemento elástico pode estar no aro ou no centro da roda.

O uso da elasticidade no aro, é mostrado na figura 4, tratando-se da roda Michelin. Tem-se em C a câmara de ar, que propicia ao aro uma boa amortização das vibrações. Caso a

pressão do pneumático baixe ou até se o sistema for totalmente desinflado, o núcleo rígido D do aro, vem de encontro com a parede interna do aro, impondo um abaixamento que não passa de 1 (um) centímetro, permitindo que o veículo continue rodando. (3)

A principal vantagem desta roda é o aumento de aderência da roda de um fator de 3, que se deve a pressão de apoio se repartir em uma grande área de contato, dando boas condições de arranque e frenagem. A grande limitação é quanto ao apoio oferecido pelos trilhos, que não passa de 5 a 6 mm, reduzindo a carga admissível por roda a uns 1500 Kg. (3)

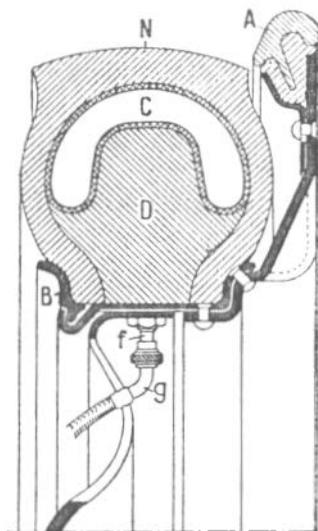


Fig. 4 - Roda Michelin, com sistema pneumático e elemento elástico no aro.

Tal limitação de carregamento foi melhorada com o uso da câmara pneumática no centro da roda, como foi o caso da roda Daimler, mostrada na figura 5. (3)

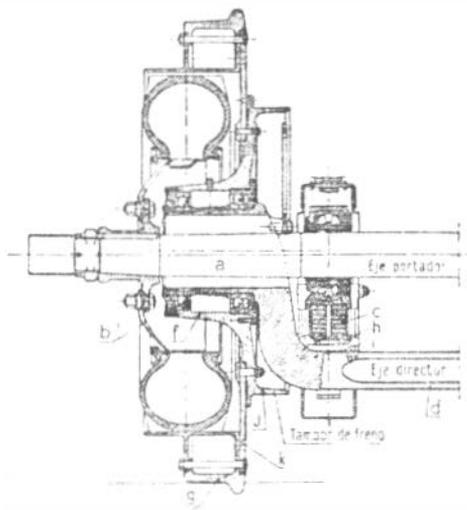


Fig. 5 - Roda Daimler, com sistema pneumático e elemento elástico no centro da roda.

Este sistema se compõe de um eixo reto A, sobre o qual se fixam as rodas pneumáticas e a suspensão elástica da caixa, e um eixo diretor D, onde giram as rodas diretrizes que são fixadas pelos tambores K de um lado, que conduzem o aro de aço G, e por outro o tambor de freio J. No caso de desinflamento do pneumático, o eixo reto desce 20 mm, até que o suporte H se apóie sobre o eixo diretor, e o veículo pode continuar rodando. (3)

Com este sistema a carga por roda pode ser aumentada para valores que foram de 2500 a 4000 Kg.

Naturalmente existem outros sistemas que buscam o amortecimento de vibrações, no entanto o objetivo desta explanação é o de deixar claro a existência de diversas concepções de projeto de rodas, mesmo por que, o carregamento suportado por rodas elásticas estão bem aquém do objetivo deste trabalho, que são rodas para transporte de cargas que vão até 15000 Kg (15 t) por roda.

2.2 - FABRICAÇÃO DE RODAS FERROVIÁRIAS

Atualmente as rodas mais usadas, principalmente para transporte de cargas pesadas, são as rodas monobloco, ou seja, constituídas de uma só peça, que podem ser de três tipos⁽²⁾:

- Rodas de ferro fundido coquilhado;
- Rodas de aço forjado e laminado;
- Rodas de aço fundido.

2.2.1 - Rodas de Ferro Fundido Coquilhado⁽²⁾

São rodas empregadas a vários anos nas estradas de ferro, mas limitam-se aos vagões, não sendo utilizadas para carros e locomotivas.

O emprego deste tipo de rodas vem diminuindo com o aumento da velocidade dos trens, o que acarreta grandes esforços de frenagem produzindo aquecimentos excessivos prejudicando o material. Nos Estados Unidos já não se empregam estas rodas assim como em outros países, mesmo com a vantagem de menor preço, grande dureza e maior coeficiente de atrito nas sapatas de freio.

Para sua fabricação o ferro fundido de cubilô é vazado em moldes de areia, com coquilhas de ferro fundido na pista de rolamento, que resfria bruscamente, obedecendo o diagrama metaestável do sistema Fe-C, produzindo ferro fundido branco (coquilhado) na superfície de rolamento, propiciando bom endurecimento.

Após retiradas dos moldes, as rodas são levadas a câmaras termicamente isoladas para resfriamento lento (por várias horas) a fim de eliminar tensões residuais.

2.2.2 - Rodas de Aço Forjado e Laminado(2)

São empregadas em locomotivas, carros e vagões. Variam quanto a composição química, tratamento térmico e dimensões, conforme sua finalidade.

Sua fabricação consiste no forjamento de um tarugo que recebe a forma de um disco e, depois a de uma roda. Em seguida é levado para um laminador específico, horizontal ou vertical, sendo que tais operações podem realizar-se com aquecimentos intermediários entre uma etapa e outra.

O resfriamento é uniforme e controlado, e conforme o caso, podem sofrer um tratamento térmico e uma usinagem.

Dentro das rodas de aço, há dois tipos, sendo uma chamada de one wear (único uso) e outras de multiple wear (múltiplo uso), sendo as primeiras usadas somente para vagões e as últimas para vagões carros e locomotivas.

As rodas one wear são assim chamadas por que suportam somente um torneamento antes de atingirem a espessura de rejeito. Este tipo de rodas obedecem as especificações da AAR - Association of American Railroads - e não sofrem tratamentos térmicos, porém passam por um resfriamento controlado.

Quanto ao acabamento, estas rodas são divididas em duas classes:

- Classe 1 - A superfície de rolamento e frisos podem ser laminados em bruto ou usinados, a critério do fabricante.
- Classe 2 - Há obrigatoriedade de usinagem na superfície de rolamento e frisos.

Quanto as rodas multiple wear, estas permitem vários torneamentos antes de atingirem a espessura de rejeito, e para tal possuem uma espessura de $2\frac{1}{2}$ " (38,1 mm). Também obedecem as especificações da AAR, e definidas por 5 classes: (1,2)

- Classe U - Para serviços gerais, em que a roda sem tratamentos térmicos é satisfatória;
- Classe L - Serviços de alta velocidade e condições mais severas de frenagem que outras classes, e leve carregamento;
- Classe A - Para alta velocidade, com condições severas de frenagem porém com carregamento moderado sobre as rodas;
- Classe B - Para alta velocidade, condições severas de frenagem e com cargas mais pesadas;
- Classe C1 - Para condições de frenagem leve, porém com altas cargas sobre a roda;
- Classe C2 - Para serviços em condições severas de frenagem, mas com freios fora da superfície de rolamento (freio a disco).

A classe U não recebe tratamento térmico, mas o resfriamento é controlado. As outras classes são temperadas e revenidas, sendo também especificadas a composição química do aço. (1,2)

2.2.3 - Rodas de Aço Fundido (2)

Como já foi citado, com o aumento da velocidade, as rodas de ferro fundido foram aos poucos sendo eliminadas, e isso forçou as fundições, principalmente americanas, a desenvolverem rodas que atendessem as novas exigências de trabalho (aumento da

velocidade), resultando nas rodas de aço fundido. São rodas one wear, cujo aço é produzido em forno elétrico, tratadas termicamente e usinadas.

2.3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E ASPECTOS METALÚRGICOS

Em termos de propriedades mecânicas, as especificações determinam que, pelas rodas estarem sujeitas a desgaste, choques na via e ao escoamento produzido pela carga do veículo, devem ser fabricadas de aço duro, porém com ductilidade, pelo fato de ser submetido a efeitos de contração e expansão, sob o esforço dos freios, e a mudanças de temperatura. Em geral, para os aços atuais utilizados nesta aplicação a resistência mínima a tração exigida esta em 70 Kg/mm^2 , alcançando-se freqüentemente os valores de 90 KG/mm^2 , e alongamentos que variam de 14 a 8%.(2,3)

Bowles e Roland(4) apresentam alguns resultados experimentais quanto as propriedades mecânicas da classe U, as quais são apresentadas na tabela I.

Tabela I - Propriedades mecânicas medidas em rodas da Classe U.

Sentido	Tensão Esc. (Mpa)	Tensão Trac. (Mpa)	Along. (%)	Impacto (J)			K_{Ic} ($\text{Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
				-40°	26°	93°	
Circunferencial	390 a	818 a	8,4 a	1,9 a	2,6 a	6,2 a	44,7 a
	400	857	10,9	2,3	2,8	6,2	50,1
Transversal	398 a	819 a	9,0 a	2,3 a	3,8 a	5,8 a	---
	435	890	9,2	2,2	3,0	6,1	

Os valores apresentados como mínimo e máximo correspondem aos valores médios obtidos com a composição química no limite superior e inferior da classe U.

A AAR especifica as durezas exigidas na banda de rodagem para as diferentes classes de rodas, mostrada na tabela II.(1)

Tabela II - Durezas especificadas pela AAR para a banda de rolamento

Classe	Dureza min. (HB)	Dureza máx. (HB)
L	197	277
A	255	321
B	277	341
C	321	367

A composição química de cada classe de rodas também consta nas especificações da AAR, as quais são mostradas na tabela III.(1)

Tabela III - Composições químicas das diversas classes de rodas.(1)

Classe	Elementos				
	C	Mn	P(máx.)	S(máx.)	Si(min.)
U	0,65 - 0,67	0,60 - 0,85	0,05	0,05	0,15
L	0,47 (máx.)	- " -	- " -	- " -	- " -
A	0,47 - 0,57	- " -	- " -	- " -	- " -
B	0,57 - 0,67	- " -	- " -	- " -	- " -
C	0,57 - 0,77	- " -	- " -	- " -	- " -

As classificações quantitativas dos elementos químicos é bastante importante, pois estes podem melhorar a qualidade do aço, como por exemplo boro, molibdênio, titânio, cromo, vanádio e outros.(5)

Uma das propriedades que podem ser melhoradas com estes elementos é a temperabilidade, sendo que os aços neste aspecto podem ser divididos em duas categorias:(5)

- Aços baixa liga, com Bo, Ti, Mo:

- Aços baixa liga, com Cr e V.

Notou-se que a adição de Cr e V, as características mecânicas se equivalem muito com os aços com adições de Bo, Mo e Ti.(5)

A classe C apresenta os seguintes conteúdos destes elementos em porcentagem: Cr - 0,50; Mo - 0,10; V - 0,02.(5)

Com a adição de baixos percentuais de vanádio não diminuem os valores de impacto. Isto é muito importante, pois em rodas para transporte pesado, este elemento é importante para aumentar a temperabilidade reduzindo o desgaste.(5)

Em todos os casos dos aços para rodas, o fator limpeza, ou índice de inclusões, é fundamental. Neste sentido, o tratamento de banho com cálcio-silício e a desgaseificação a vácuo podem propiciar um material de maior qualidade, distribuindo e globulizando inclusões, ou retirando juntamente, com os gases prejudiciais ao banho.

O controle de inclusões é bastante importante para melhorar o desempenho das rodas, limitando a deteriorização da banda de rodagem (aro), devendo-se adotar alguns procedimentos como por exemplo, melhorar a dispersão de inclusões através do referido tratamento com Ca-Si durante a desoxidação, e limitando o efeito prejudicial de agrupamentos de inclusões; realização de forte desgaseificação a vácuo, a fim de evitar flocos de inclusões, melhorando a limpeza do aço e promover tratamentos de globulização buscando diminuir os efeitos de concentradores de tensões (entalhe) de inclusões alongadas, que favorecem a

propagação de trincas.

A nível de tratamentos térmicos pode-se, pelo o que já foi exposto, concluir que sempre buscam estruturas que propiciem alta resistência ao desgaste com elevada tenacidade para resistir as condições de impacto.

Para tal tem-se tratamentos de têmpera superficial, com o objetivo de obterem martensita, que possui elevada dureza.⁽³⁾

No entanto tal estrutura é frágil e não possui boas propriedades de impacto.

Com as rodas ou trilhos temperados pode-se chegar a resistências de até 140 Kg/mm^2 .

Um aspecto que é considerado é o fato deste tipo de tratamento resultar em uma camada temperada e subsequente estrutura de transição e depois estrutura normal do aço, o que produz uma estrutura bastante heterogênea, grandes níveis de tensões residuais, acompanhado de grandes alterações de propriedades mecânicas a medida que se distancia do ponto que recebeu o meio refrigerante.⁽³⁾

Há casos em que o aço é resfriado rapidamente na região desejada, ou seja, onde se requer alta dureza, e em seguida deixa-se o resfriamento ao ar, fazendo com que o calor das outras regiões da peça normalizem ou revinam a superfície resfriada.⁽³⁾

A bibliografia mais atual tem afirmado que a estrutura martensítica não é a mais apropriada para a aplicação em rodas e trilhos.

Atualmente o tratamento térmico objetiva a obtenção de perlita super-fina, promovendo um bom endurecimento da superfície e mantendo boas propriedades de tenacidade. Tal comportamento pode ser comprovado pela mecânica da fratura, que

fornece dados do aumento da tenacidade a fratura (K_{IC}) com a diminuição do espaçamento lamelar da perlita.

A medida que se afasta da região resfriada, observam-se mudanças morfológicas na perlita com uma queda progressiva e gradual de dureza, até chegar à microestrutura original da roda ou trilho. A grande vantagem desse perfil microestrutural se baseia no fato de que o microconstituente básico é o mesmo, ou seja, perlita, sendo gradual e contínua a variação de propriedades mecânicas ao longo do mesmo. (6)

As estruturas convencionais perlíticas, apresentam superioridade em relação as martensíticas, no entanto em frenagens violentas, devido a aquecimentos localizados, podem ultrapassar a 750° , ocorrendo transformação de fase da perlita para austenita, que com o rápido resfriamento acabará formando martensita não revenida com alta dureza e frágil que aumenta com o teor de carbono.

Esta transformação com rápido resfriamento é difícil de suprimir, mas com menores teores de C pode-se produzir uma martensita mais dúctil. (7)

Existem evidências que indicam a formação de martensita não revenida sobre a pista de rolamento em rodas lisas com freio a disco, estrutura esta produzida por aquecimento localizado na roda devido ao deslizamento ou severas frenagens com subsequente rápido resfriamento pela massa da roda. Isto eleva a possibilidade de se obter soluções metalúrgicas para os problemas de rodas lisas através do uso de rodas de baixo carbono ligadas.

Neste sentido tem-se trabalhado no desenvolvimento de rodas bainíticas, que alia alta dureza e boas propriedades de tenacidade, de aços de baixo teor de carbono, os quais possuem

baixa temperabilidade em resfriamento rápido e tem propriedades geralmente equivalentes aos aços perlíticos para rodas.⁽⁷⁾

Devido a boa estabilidade térmica dos aços bainíticos de baixo carbono se espera maior resistência a prejuízos causados por aquecimentos localizados.⁽⁷⁾

A bainita é uma estrutura produzida da transformação da austenita em resfriamento entre 400 e 600^o, e geralmente tem a forma ripóide (forma de ripas), mas não similar a martensita, pois os mecanismos de formação das duas fases são diferentes, sendo que a bainita requer difusão de carbono.

Normalmente a transformação bainítica é difícil por requerer um resfriamento controlado ou por um recozimento isotérmico e a reação é mascarada por ferrita, perlita e reações martensíticas. A adição de 0.5% de Mo e 0,002% de Bo combinados em aço de baixo carbono, retardam a formação de ferrita e perlita, permitindo a formação de bainita, com um resfriamento em uma maior faixa de temperatura.⁽⁷⁾

Steven e Haynes dão as seguintes equações empíricas para as temperaturas de início (B_S) e final (B_f) de formação da bainita:

$$B_S = 830 - 270.(\%C) - 90.(\%Mn) - 70.(\%Cr) - 37.(\%Ni) - 83.(\%Mo) \quad (1)$$

$$B_f = B_S - 120 \quad (2)$$

Estas equações foram desenvolvidas para transformações isotérmicas, Haynes tem recomendado para o resfriamento contínuo a redução da constante em (1) para 810, e a temperatura inferior, de final de formação de bainita é dada por 75^o abaixo da temperatura isotérmica.⁽⁷⁾

Quanto as propriedades de impacto, as rodas bainíticas são comparáveis as rodas da classe D, sendo os dois aços com resultados comparáveis, mostrando-se que as bainíticas apresentam-se superiores em elevadas temperaturas como é observado na figura 6. (7)

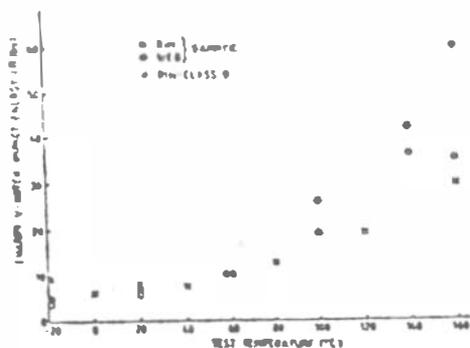


Fig. 6 - Comparação das propriedades de impacto das rodas bainíticas com as rodas da classe D.

O sistema de aquecimento para a realização dos tratamentos térmicos mais comuns para as rodas ferroviárias, é o aquecimento por indução que apresenta algumas vantagens como: (6)

- Facilidade de controle operacional e automação do processo;
- Alta taxa de aquecimento e conseqüentemente menor tempo de tratamento térmico;
- Mínima formação de óxidos na superfície da região tratada;
- Elevada reprodutibilidade do ciclo de aquecimento;
- Baixo custo operacional.

2.4 - PRINCIPAIS DEFEITOS E SUAS ORIGENS

Os defeitos mais comuns encontrados em rodas podem ser classificados em duas categorias:(5)

- Defeitos superficiais ou descascamentos originados por trincas superficiais;

- Trincas internas na pista de rolamento, causando os defeitos de shelling.

De uma forma geral, os defeitos de shelling estão relacionados com a perda de material devido a ação de laminação do material na superfície de contato com os trilhos. Os autores tem mostrado que com frenagens normais e aumentos na carga, os defeitos de shelling tem se pronunciado com maior frequência nas rodas.(8)

Os defeitos de descascamento são resultados do escorregamento das rodas, produzindo altos aquecimentos, chegando a temperaturas, sobre a pista de rolamento, de transformação de fase resultando em mudanças na estrutura do material. Estas transformações produzem martensita não revenida, que é frágil e possui uma estrutura cristalográfica aproximadamente 4 % menor que a estrutura base de perlita. Isto resulta em altas tensões residuais trativas subsuperficialmente a uma profundidade de 0,5 a 5 mm da superfície martensítica.(8)

A aparência visual do defeito de shelling e de spalling são idênticas. O ataque da superfície de rolamento ao redor de um defeito de spalling com uma solução saturada de persulfato de amônio ataca a martensita e produz uma banda cinza ao redor do defeito, conforme é mostrado na figura 7.

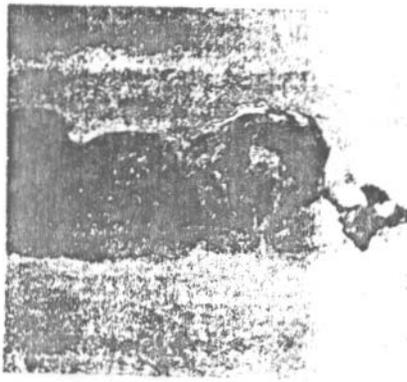


Fig. 7 - Aparência de uma roda com defeito de spalling mostrando martensita atacada com persulfato de amônio. (8)

O corte da região defeituosa é a única forma de diferenciar os dois defeitos.

A figura 8 mostra o defeito de spelling (descascamento) após o corte, e atacada, mostrando a superfície clara na superfície (camada de martensita) e a trinca formando uma rede, com trinca perpendicular a superfície interligada a uma trinca paralela a camada de martensita (paralela a superfície). (8)

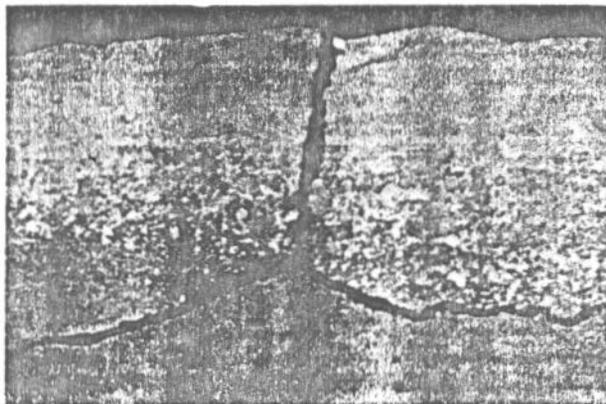


Fig. 8 - Secção transversal de um defeito de descascamento. 200x.

2.3 A figura 9 mostra a trinca em corte características dos defeitos de shelling, onde a trinca forma um ângulo agudo com a superfície e não há evidências do surgimento de estrutura martensítica. (8)

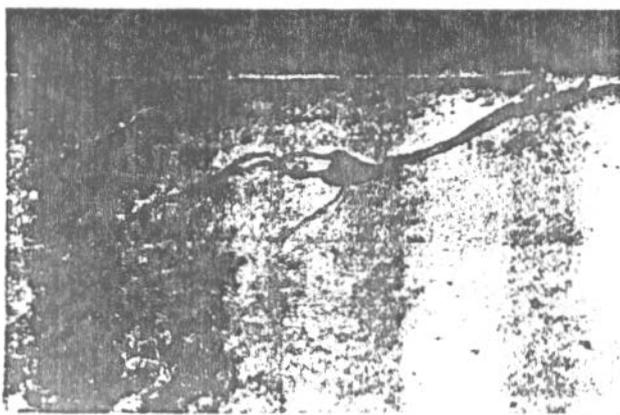


Fig. 9 - Secção transversal do defeito de shelling. 200x

Os defeitos tem varias origens relacionada a qualidade metalúrgica das rodas e a diferentes tipos de tensões.

A limpeza do aço, os fenômenos de fadiga por contato, heterogeneidades e baixa dureza sobre uma área suficiente podem dar defeitos sobre a pista de rolamento.

Para se evitar a deteriorização da pista de rolamento, pode-se buscar o aumento da temperabilidade do aço, afim de se obter uma boa profundidade endurecida com um perfil uniforme.

Pode-se buscar o aumento da espessura da pista de rolamento a fim de dissipar melhor o calor, evitando o desenvolvimento de energia superficial sob frenagens e finalmente melhorar as propriedades mecânicas buscando materiais de alta ductilidade e poder de encruamento.

2.5 - TENSÕES RESIDUAIS

Um dos aspectos importantes para a vida de diversos componentes, são as tensões residuais. São tensões como por assim dizer, aprisionadas no interior do material⁽⁹⁾. Permanecem no seio do material do componente, mesmo quando este não se encontra submetido a esforços.

Tais tensões podem ter diversas causas, tais como: usinagem, corte, tratamentos térmicos, choques mecânicos, solidificação, soldagem etc.

As tensões residuais são geradas por deformação plástica não uniforme^(9,10) e podem ser produzidas em diversas etapas da fabricação dos componentes.

A grosso modo a formação das tensões residuais são classificadas em três métodos gerais:⁽¹⁰⁾

- Trabalhos a frio - Como shot-peening, laminação ou trefilação a frio;

- Aquecidos ou a quente - São os que ocorrem em tratamentos térmicos, em endurecimentos superficiais e soldas;

- Por eletrodeposição.

As tensões são referidas a tensões internas e são em geral de dois tipos: macrotensões e microtensões.⁽¹⁰⁾

As macrotensões são as que se encontram distribuídas uniformemente sobre uma considerável área, e as microtensões são as associadas com os contornos de grão e o seu interior.⁽¹⁰⁾

As macrotensões são chamadas de 1ª ordem, e são determinadas quantitativamente e avaliam o desempenho e a manufatura dos produtos. Quanto as micro tensões, suas influências exatas não são bem conhecidas, mas são relacionadas a endurecimentos por envelhecimento, precipitação e difusão de

elementos de liga. As determinações destas são simplesmente qualitativas e são chamadas de tensões de 2ª ordem. (10)

Um estado superficial de tensões residuais biaxial superposto a tensões devido ao carregamento externo pode alterar o plano de fratura por fadiga do material. Quando as tensões residuais na superfície são nulas, o plano de fratura se mostra perpendicular ao eixo da amostra, e no caso do aço possuir tensões residuais biaxiais na superfície de considerável grandeza, ocorre fratura diagonal típica de esforço torcional. (10)

Este tipo de fratura é explicado por altas tensões residuais tangenciais na superfície, quando comparadas com tensões longitudinais. (10)

O caminho da fratura é portanto influenciado pela componente tangencial e torna-se inclinado em relação ao eixo.

Quando as tensões forem de origem térmica é característico se encontrar as tensões tangenciais excedendo as longitudinais, enquanto em aços estruturais que não apresentam tensões térmicas, as tensões longitudinais excedem as tangenciais. (10)

As rodas ferroviárias, como já se sabe, são fabricadas por forjamento ou por fundição, e tratadas termicamente, o que sem dúvida resulta em tensões residuais. Tais tensões dependendo de sua localização, e associada as pressões de contato rodã/trilho, podem caracterizar o aparecimento de defeitos como shelling nas bandas de rolamento. As próprias condições de trabalho, no transporte de cargas pesadas, produzem a deformação plástica e resultam em acúmulo de tensões residuais.

Desta forma torna-se necessário o maior conhecimento destas tensões.

Quando um material, no caso metálico, é deformado plasticamente de forma não homogênea, ou seja, existem porções do material que se encontram no regime elástico, quando a força é retirada, as regiões plasticamente deformadas impedem as regiões elásticas adjacentes de experimentarem sua recuperação elástica completa. Desta forma, estas são deixadas em tração residual e as regiões deformadas plasticamente devem estar em um estado de compressão residual, pois é necessário que ocorra um estado de balanço destas tensões. De maneira geral, a região deformada plasticamente em tração apresentará após o descarregamento, tensões compressivas, e quando a deformação plástica da região for compressiva, resultará em tensões residuais trativas. (9)

As tensões residuais na superfície dos componentes quando compressivas, na condição em que o componente é solicitado em tração nesta região, que é o caso de eixos, aumenta a vida do componente, diminuindo a probabilidade de ocorrer falhas por fadiga. (9)

A figura 10a mostra a distribuição de tensões elásticas numa viga em presença de tensões residuais, mostradas na figura 10b, caracterizando uma típica distribuição de tensões obtida por Shot-peening, onde tem-se tensões compressivas na superfície, as quais devem estar equilibradas com tensões trativas no centro da viga. Na figura 10c é mostrado a distribuição de tensões devido a soma algébrica das tensões externa e internas.

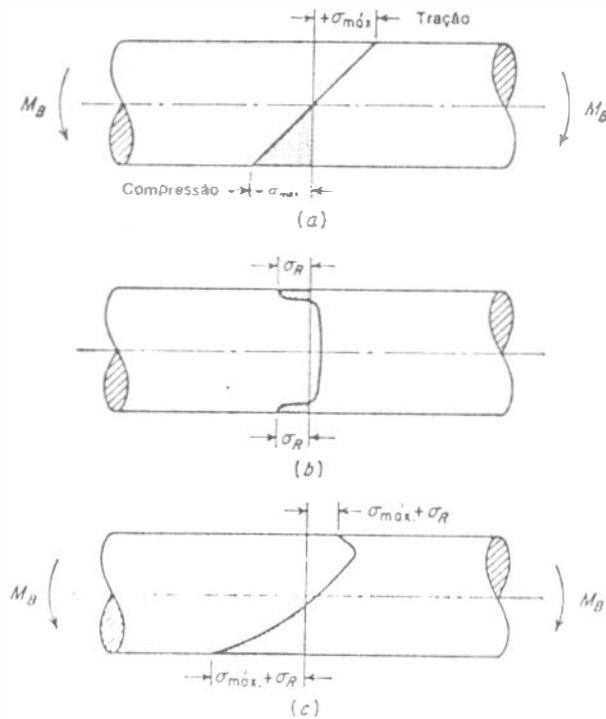


Fig. 10 - Superposição das tensões aplicadas e residuais.

A tensão trativa na superfície é reduzida devido a componente compressiva residual, e o pico de tensões trativas é deslocado para o interior do componente, sendo sua grandeza, uma função do gradiente de tensões aplicado e da distribuição das tensões residuais. (9)

Desta forma é provável que o início da falha ocorra abaixo da superfície. (9)

Os principais métodos comerciais de introdução de tensões residuais compressivas favoráveis são a laminação com cilindros especiais e a jacto-percussão (shot-peening). (9)

O processo de laminação superficial é particularmente adequado para o caso de peças grandes, sendo utilizado frequentemente como garantias de eixos de manivelas e em superfícies de apoio de eixos de estradas de ferro. Já o processo de jacto-percussão consiste no jateamento de partículas

finíssimas de aço ou ferro fundido contra a superfície da peça. Este processo é particularmente adequado para peças de pequeno porte produzidas em massa.(9)

As tensões térmicas produzidas por tratamentos térmicos, como a têmpera e tensões decorrentes das variações volumétricas que acompanham as transformações de fase resultantes da cementação e nitretação como também o endurecimento por indução, também introduzem tensões compressivas na superfície dos componentes.(9)

As tensões residuais são difíceis de serem calculadas com precisão por métodos analíticos, e são então determinadas por uma variedade de técnicas experimentais.

As técnicas de medição de tensões residuais, devem adequar-se a certas exigências, tais como:(11)

- Não podem ser dependentes nem prejudicadas pelo tamanho e espessura dos componentes a serem testados;

- Devem medir o quanto as tensões superficiais estão presentes, de forma a permitir a avaliação da influência destas na propagação de trincas;

- O equipamento deve ser portátil, para se transportado ao local de medição e possível de ser utilizado em espaços confinados;

- Para minimizar o tempo, deve ser rápido e de fácil operação, para poder ser utilizado por técnicos.

O método não destrutivo principal é a análise com raios X, sendo estes utilizados para determinar o espaçamento interatômico de um determinado conjunto de planos cristalinos, no material tensionado, calculando-se as tensões residuais

apartir de comparações dos espaçamentos medidos em material livre de tensões. (9) Este método indica as tensões somente na superfície de cristais que tem uma orientação favorável para a incidência dos raios, o que introduz possíveis erros no volume de tensões devido a presença de microtensões. (11)

A maioria das técnicas são destrutivas, e baseiam-se na remoção de parte do material tensionado causando uma redistribuição das tensões no resto do corpo. Isto pode ser feito removendo-se material por usinagem, corte ou furos, monitorando-se a redistribuição de tensões através de extensômetros resistivos (strain-gages) posicionados de forma adequada.

2.6 - PRINCÍPIOS DE MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA

Em poucos anos as velocidades e os esforços dos vagões tem aumentado, o que levou ao aumento das potências de frenagem e portanto ao uso de rodas mais resistentes, considerando o conseqüente aumento do carregamento térmico. Contudo não se pode esperar que as rodas mais resistentes sejam adequadas a satisfazer a todas as condições requeridas, pois o mal uso e as irregularidades dos serviços tem aumentado o número de rodas falhadas. (12)

A ocorrência principal de falhas foi caracterizada após trajetos com longas inclinações. (12)

No final deste trajeto e conseqüentemente depois de diminuir as frenagens, as tensões compressivas periféricas (no aro) devido ao carregamento térmico do superaquecimento da roda tornam-se tensões trativas sobre a roda fria. Isto produz uma trinca radial podendo levar a fratura da roda. (12)

Torna-se então necessário, tal como foi feito com tensões residuais, uma abordagem da mecânica da fratura e determinação da tenacidade à fratura para as rodas, até por que os artigos modernos apontam para a necessidade de maiores valores de K_{IC} nestes materiais, que seriam acima de $80 \text{ MPa.m}^{1/2}$ (12), para melhorar o comportamento frente a estes carregamentos térmicos.

Os projetos convencionais de engenharia baseiam-se em evitar a ocorrência de fratura por colapso plástico, sendo que a propriedade principal é a tensão de escoamento e a faixa de dureza especificada.(13)

Assim a tensão de projeto sera a tensão que levaria o componente ao colapso plástico dividido por um fator de segurança, desta forma considerando a possibilidade de fratura por um modo alternativo como a fratura frágil.(13)

Existem inúmeras situações em que a falha ocorre a partir de trincas com tensões aplicadas abaixo da tensão de projeto, sendo a fratura frágil incentivada por concentradores de tensões, atuando no sentido de restringir a deformação plástica.(13)

Os defeitos internos como trincas e outros concentradores de tensões, podem ser detectados por meio de ensaios não destrutivos.(13)

A mecânica da fratura tem como objetivo determinar se um defeito tipo trinca irá ou não levar a fratura catastrófica para tensões normais de serviço, permitindo ainda determinar o grau de segurança efetivo de um componente trincado. Com a mecânica da fratura, determina-se valores quantitativos de tenacidade à fratura do material, permitindo projetos que aliem segurança e viabilidade econômica.(13)

Vários fatores afetam o modo de fratura dos materiais,

tais como: (13)

a) Entalhes e Trincas: Atuam no sentido de restringir a deformação plástica de forma até a aumentar a carga admissível. Esta restrição da deformação plástica, resulta em uma mudança no modo de fratura, passando esta a ser controlada por tensão e não por deformação. Assim ocorrerá a passagem de mecanismo de fratura dúctil (coalescência de microcavidades) para fratura frágil (clivagem). Na figura 11 se observa a redistribuição das tensões.

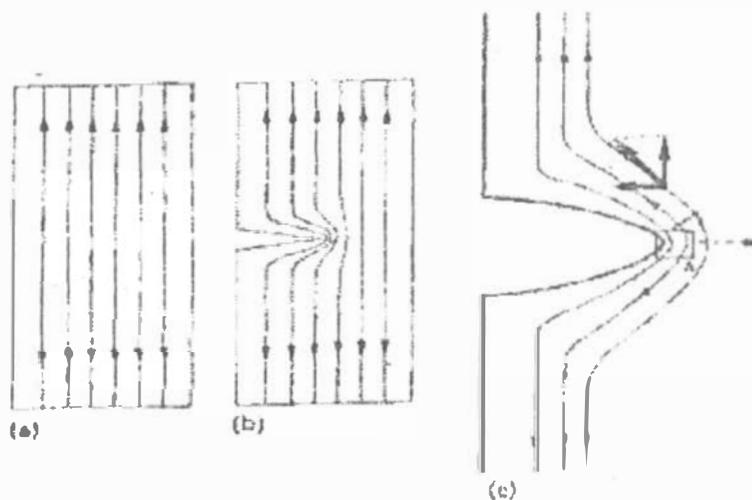


Fig. 11 - Tendência de concentração e de redistribuição de tensões devido a existência de um defeito.

b) Efeito da Espessura: Em espessuras finas, a componente de tensão Z , mesmo no centro da espessura, não consegue crescer muito, sendo próxima de 0, promovendo um estado de tensão plana, possibilitando a deformação plástica na direção em que não existe tensões para restringir esta deformação (direção Z).

Assim ocorrerá fratura dúctil. No caso de maiores espessuras, a tensão em Z atinge valores consideráveis, criando um estado triaxial de tensões, ou seja, um estado plano de deformações. Os critérios de escoamento mostram que com um estado triaxial hidrostático de tensões ($S_x=S_y=S_z$), não se produz fratura dúctil, com a periferia rompendo por cisalhamento. A figura abaixo mostra o comportamento da tenacidade a fratura em função da espessura do corpo de prova. (13)

ü

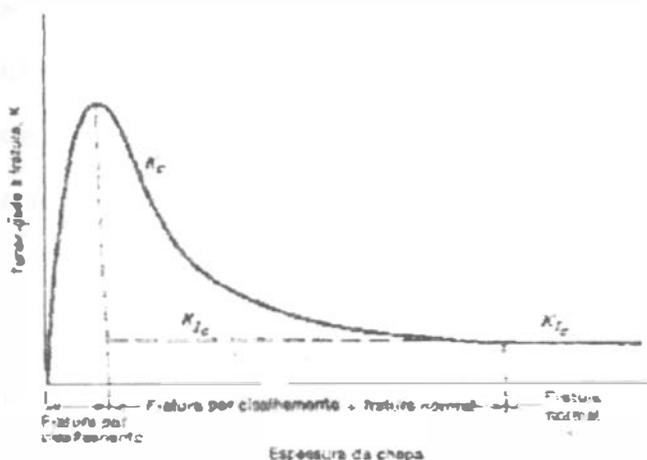


Fig. 12 - Efeito da espessura do corpo de prova sobre a fratura do material.

c) Efeito da Microestrutura: O efeito da microestrutura está relacionado ao tamanho de grão, ao filme de cementita, a fragilidade de revenido, que resultam em fratura intergranular. As inclusões presentes também afetam o modo de fratura do material atuando como concentradores de tensões.

A mecânica da fratura linear elástica (MFLÉ) é uma metodologia a ser empregada em situações em que há possibilidade de ocorrer fratura sem ser precedida de deformação plástica. (13)

O campo de tensões na vizinhança da ponta de uma trinca pode ser caracterizado em termos de um fator de intensidade de tensões (K_I). As tensões alcançadas entre componentes trincados depende apenas do parâmetro de intensidade de tensões K que é governado pela configuração geométrica do componente trincado e pelo nível e modo de carregamento imposto. (13)

Existe um valor crítico para o fator de intensidade de tensões (K_{IC} - em que I é o modo de carregamento), que é uma constante e uma propriedade intrínseca do material da peça trincada para uma dada situação de temperatura, taxa de carregamento e condição de microestrutural. (13)

A propriedade K_{IC} pode ser utilizada na análise de qualquer geometria possibilitando o cálculo do tamanho crítico de trincas no projeto de estruturas. (13)

Para o caso de uma trinca de comprimento $2a$, por exemplo no centro de uma placa com dimensões tendendo ao infinito e submetida a um carregamento trativo, ter-se-á:

$$K_I = S (P_i \cdot a)^{0,5}$$

Observa-se que a equação prevê que a medida que r tendo a zero as tensões tendem para o infinito. Evidentemente, em materiais reais, estas tensões serão limitadas pelo escoamento localizado que ocorre em uma região à frente da trinca, denominada de zona plástica.

No entanto para materiais de altíssima resistência mecânica, em que o tamanho da zona plástica é 15 vezes menor que

as dimensões significativas do componente (espessura, secção remanescente e tamanho da trinca) esta metodologia é empregada com grande precisão.

Devido a espessura dos aros das rodas e do fato de se tratar de um aço de alta resistência, é uma metodologia perfeitamente empregada para os materiais das rodas ferroviárias.

3 - METODOLOGIA

3.1 - ANÁLISE QUÍMICA

As análises químicas quantitativas foram realizadas em espectrômetro de emissão ótica, em três (3) amostras de cada roda retiradas do centro e da periferia da secção transversal, sendo realizada três (3) queimas em cada amostra. O resultado apresentado consiste na média de 9 (nove) análises por cada roda.

Os resultados são apresentados em tabela V no próximo capítulo.

3.2 - MACROATAQUE

Os ensaios para visualização da macroestrutura das rodas, caracterizou-se por um preparo (lixamento) da secção transversal da roda e posterior ataque com reativo a base de iodo com a seguinte composição:

- | | |
|----------------------|---------|
| - Iodeto de potássio | - 20%. |
| - Iodo sublimado | - 10%. |
| - Água destilada | - 100%. |

O ataque é realizado a frio, embebendo-se um algodão com o reativo e passando-se sobre a superfície preparada, ou então por imersão, deixando-se a superfície bastante escurecida pelo reativo (queimada). Após a superfície limpa e seca, retira-se o excesso de ataque com uma lixa fina (1000), passando-a levemente sobre a superfície, possibilitando assim a revelação da estrutura. Caso seja necessário, repete-se o procedimento até se obter o ataque no grau desejado.

3.3 - PERFIS DE DUREZA

Os perfis de dureza foram realizados na escala Vickers com carga de 30 Kg. Procurou-se realizar as impressões de dureza de forma a seguir perpendicularmente as linhas de isodureza devido ao tratamento térmico, conforme mostra a figura 13, além da localização das amostras tomadas para metalografia para a roda americana.

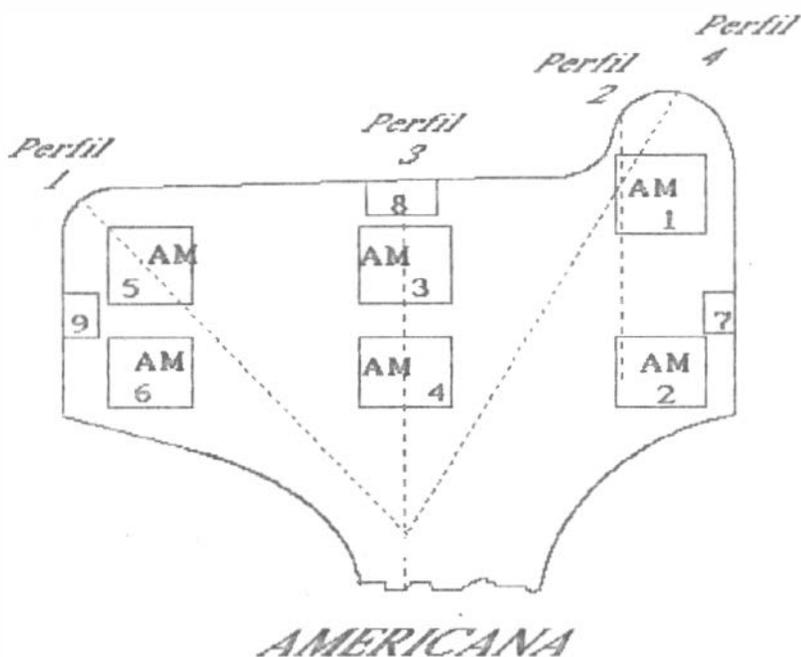


Fig. 13 - Caracterização da localização dos perfis de dureza e das amostras para metalografia da roda americana.

A figura 14 mostra a secção transversal da roda sueca, caracterizando também a localização dos perfis realizados e das amostras tomadas para metalografia.

Os perfis foram realizados com espaçamento entre as impressões de 2 em 2 mm de profundidade conjuntamente com deslocamento lateral também de 2 mm formando um serrilhado com as impressões. Tal procedimento é recomendado por norma para

evitar erros devido a deformação imposta pela impressão anterior.

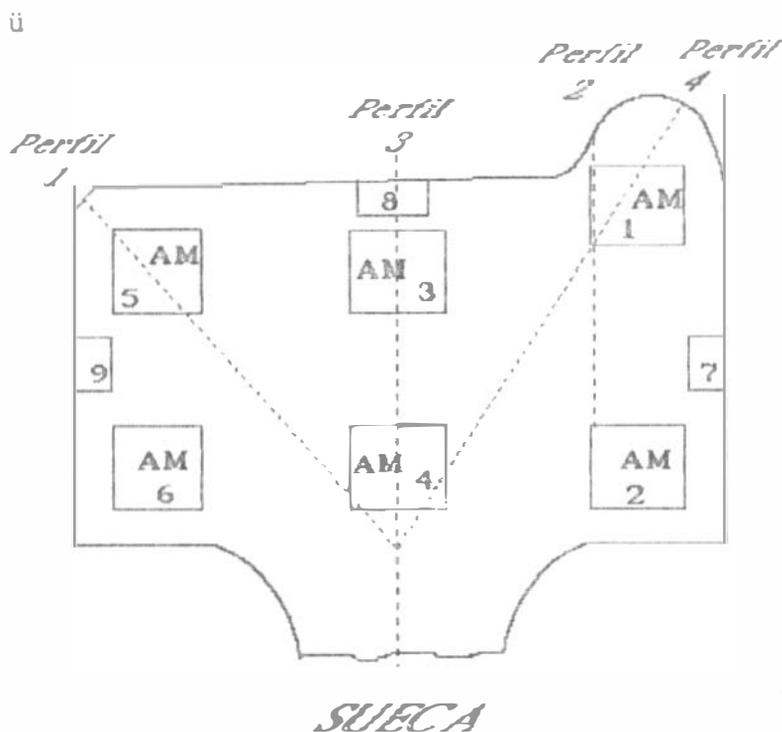


Fig. 14 - Caracterização da localização dos perfis de dureza e das amostras para metalografia da roda sueca.

O perfil 2 foi realizado pelo fato de que na periferia desta região ocorrem grandes esforços e alta solicitação ao desgaste, principalmente nas entradas de curvas, tendo sido caracterizadas fraturas que iniciaram nesta região.

Os resultados destes perfis foram plotados em gráfico para melhor visualização da variação de dureza da periferia ao núcleo, ou seja, até o início da alma da roda (centro).

3.4 - ANÁLISES METALGRÁFICAS E INCLUSÕES

As amostras para metalografia foram retiradas da secção transversal, conforme mostram as figuras 13 e 14, para as rodas americana e sueca respectivamente, resultando num total de 9 amostras por roda.

As amostras centrais (3 e 4), após analisadas, foram preparadas nas respectivas secções circunferenciais para melhor caracterização das inclusões.

As amostras foram analisadas tanto em microscopia ótica como em microscopia eletrônica de varredura, e foram identificadas por código de letras, de forma que a 1ª letra indica a origem da roda (A para americana e S para sueca), a 2ª indicando a localização horizontal (interna, central, externa ou superficial), e a 3ª indicando a localização vertical (superior, inferior ou topo). A tabela IV apresenta a identificação empregada nas amostras relacionando a codificação com o número visualizado nas figuras 13 e 14.

A análise metalográfica refere-se à caracterização da microestrutura do material, à constatação de ferrita pró-eutetóide, ao espaçamento lamelar da perlita e ao tamanho de grão.

As inclusões foram caracterizadas quanto ao tipo, tendo sido contadas e medidas 500 inclusões na roda americana e 370 na roda sueca, e analisadas conforme Norma ASTM E 45 - 87, quantificando em inclusões finas ($< 10\mu$), médias ($10 \text{ à } 30\mu$) e grossas ($> 30\mu$).

Para a medição do espaçamento lamelar as amostras foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), realizando análise em microsonda nas inclusões para sua caracterização qualitativa.

Tabela IV - Codificação das amostras para metalografia.

Origem	Nº	Código	Especificação
Americana	1	AI S	<u>A</u> mericana <u>I</u> nterna <u>S</u> uperior
	2	AI I	<u>A</u> mericana <u>I</u> nterna <u>I</u> nferior
	3	AC S	<u>A</u> mericana <u>C</u> entral <u>S</u> uperior
	4	AC I	<u>A</u> mericana <u>C</u> entral <u>I</u> nferior
	5	AE S	<u>A</u> mericana <u>E</u> xterna <u>S</u> uperior
	6	AE I	<u>A</u> mericana <u>E</u> xterna <u>I</u> nferior
	7	AS I	<u>A</u> mericana <u>S</u> uperficial <u>I</u> nterna
	8	AS T	<u>A</u> mericana <u>S</u> uperficial <u>T</u> opo
	9	AS E	<u>A</u> mericana <u>S</u> uperficial <u>E</u> xterna
Sueca	1	SIS	<u>S</u> ueca <u>I</u> nterna <u>S</u> uperior
	2	SII	<u>S</u> ueca <u>I</u> nterna <u>I</u> nferior
	3	SCS	<u>S</u> ueca <u>C</u> entral <u>S</u> uperior
	4	SCI	<u>S</u> ueca <u>C</u> entral <u>I</u> nferior
	5	SES	<u>S</u> ueca <u>E</u> xterna <u>S</u> uperior
	6	SEI	<u>S</u> ueca <u>E</u> xterna <u>I</u> nferior
	7	SSI	<u>S</u> ueca <u>S</u> uperficial <u>I</u> nterna
	8	SST	<u>S</u> ueca <u>S</u> uperficial <u>T</u> opo
	9	SSE	<u>S</u> ueca <u>S</u> uperficial <u>E</u> xterna

Nas análises em microscopia ótica foram empregadas as técnicas de luz polarizada e campo escuro, para melhor caracterização da estrutura perlítica e das inclusões.

3.5 - Ensaio Mecânicos

A nível de ensaios mecânicos, foram realizados ensaios de tração conforme a Norma ASTM E 8 - 82, obtendo-se os valores de limite de resistência, alongamento e redução em área.

Foram realizados 3 (três) ensaios em cada roda, conforme corpos de prova mostrados na figura 15. As amostras foram retiradas no sentido circunferencial do centro do aro, conforme mostrado na figura 16, onde também visualiza-se a região de tomada de amostra para os ensaios de K_{IC} .

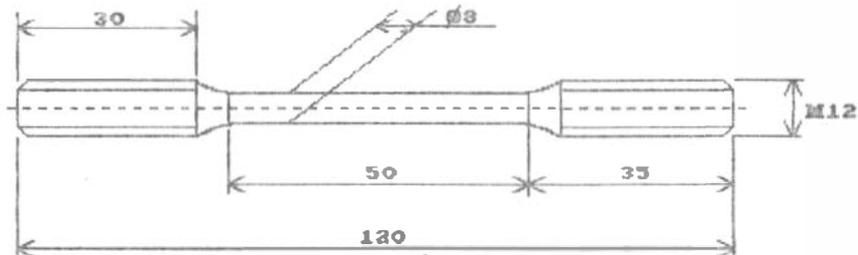


Fig. 15 - Corpo de prova para ensaio de tração.

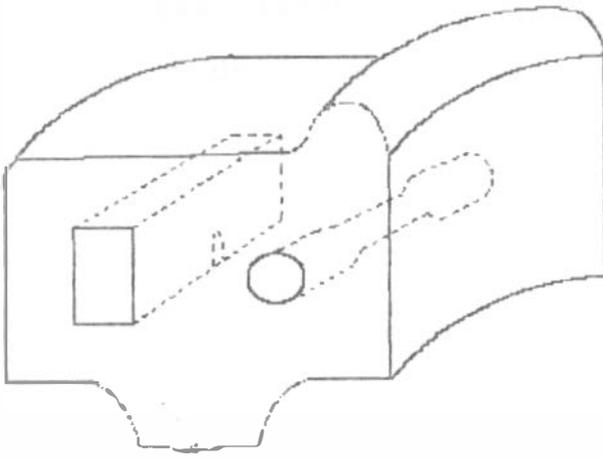


Fig. 16 - Caracterização da região em que foram retiradas amostras para os ensaios de tração e de K_{IC} .

As fraturas dos corpos de prova após ensaiados foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura, para caracterização dos micromecanismos de fratura.

3.6 - ENSAIOS DE TENSÕES RESIDUAIS

Os ensaios de tensões residuais foram realizados pelo método destrutivo do seccionamento.

O método se baseia na mudança do campo de tensões devido a realização de um corte na região tensionada. Este seccionamento produz um desvio do campo de tensões, uma vez que estas não podem se propagar através do corte. Este desvio resulta em uma porção de material livre de tensões nas adjacências do corte. Desta forma, realizando-se este seccionamento frente a um extensômetro resistivo, colado

adequadamente e na direção em que se deseja determinar as tensões residuais, pode-se monitorar as deformações causadas pela relaxação dessas tensões. O extensômetro, colado no material, sente estas deformações, resultando em alteração de sua resistência elétrica. Esta variação da resistência é convertida em deformação, e esta por sua vês, através do módulo de elasticidade, convertida em tensão.

A figura 17 caracteriza bem este desvio do campo de tensões e a porção de material relaxada. O extensômetro neste caso estaria colado adjacentemente ao corte sobre a porção de material livre de tensões.

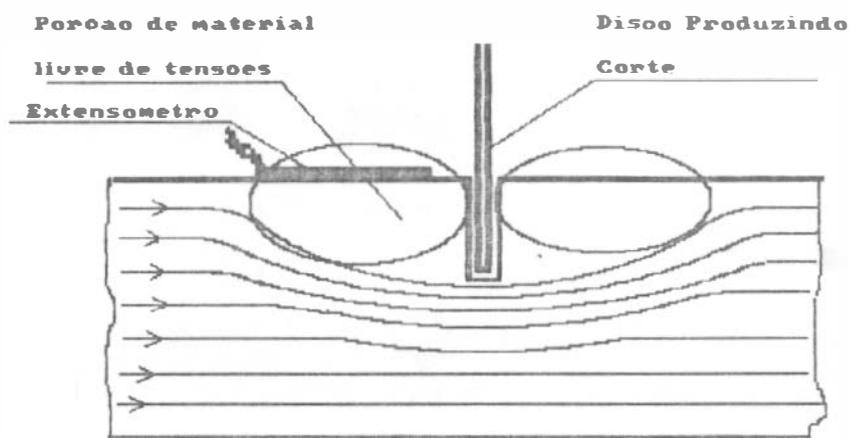


Fig. 17 - Caracterização do desvio do campo de tensões devido a realização do corte.

O corte deve ser feito de forma a não impor deformações devido a sua realização. Para o ensaio ele é feito em máquina miniton, com disco de diamante de 0,35 mm de espessura, com

velocidade lenta e mínima pressão de corte.

A figura 18 mostra o equipamento utilizado para a realização deste ensaio. A variação de resistência elétrica passa por um condicionador de sinais que converte em deformação, e a profundidade de corte é medida com um relógio comparador posicionado adequadamente. Com estes dados gera-se uma curva de deformação versus profundidade de corte.

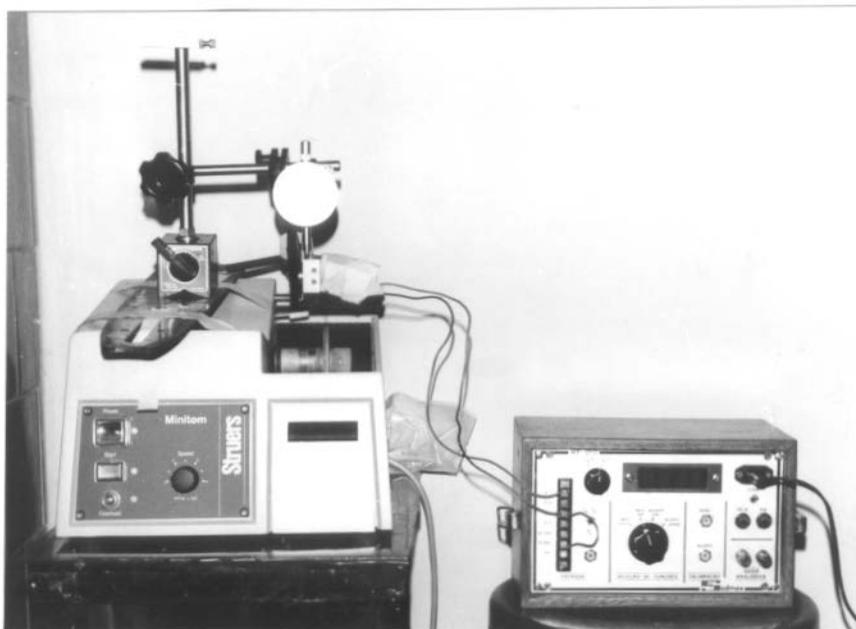


Fig. 18 - Equipamento para realização do ensaio de determinação de tensões residuais.

Foram colados dois extensômetros lado a lado em cada amostra buscando a obtenção de dois resultados simultaneamente. Os extensômetros foram colados a uma profundidade de 12 mm da pista de rolamento, no centro do aro, onde se caracteriza problemas de falhas como shelling.

3.7 - ENSAIOS DE TENACIDADE À FRATURA

Os ensaios de tenacidade a fratura seguiram a Norma ASTM E 399 - 83. Tratando-se de material perlítico, trabalhou-se com uma espessura calculada a partir da tensão de escoamento e do K_{IC} obtido da bibliografia. Conforme a Norma, a espessura mínima do corpo de prova (B), deve ser maior que 2,5 vezes $K_{IC}/R_{esc.}$. Considerando $R_{esc.} = 900$ MPa e o $K_{IC} = 60$ MPa m, a espessura mínima seria de 0,015 m ou 15 mm.

O corpo de prova utilizado é apresentado na figura 19.

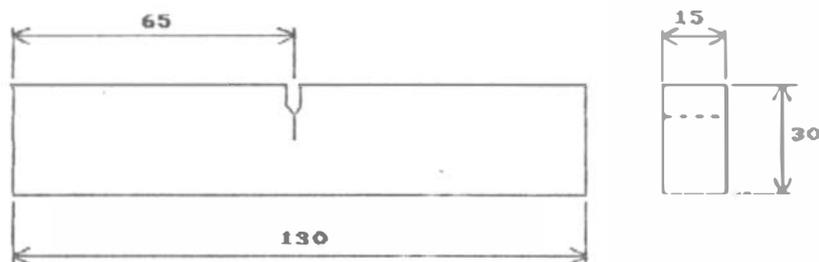


Fig. 19 - Corpo de prova para ensaio de tenacidade a fratura (k_{IC}).

Foram realizados três ensaios por roda. Na figura 16 caracteriza-se a localização dos corpos de prova no aro da roda, que também foram no sentido circunferencial.

4 - RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 - ANÁLISES QUÍMICAS

Os resultados da análise química são apresentados na tabela V:

Tabela V - Resultados das análises químicas.

Elemento	Amostra	
	Americana(%)	Sueca(%)
C	0,736	0,644
Mn	0,750	0,682
Si	0,296	0,364
S	0,065	0,031
P	0,021	0,014
Cu	0,150	0,164
Cr	0,101	0,164
Ni	0,072	0,106
Mo	0,016	0,039
Al	0,010	0,004
As	0,006	0,014
Nb	0,003	0,002
Sn	0,008	0,011
Sb	0,002	0,002
Ti	0,021	0,002
V	0,006	0,043
B	0,0006	0,0005
O	109 (ppm)	38 (ppm)
N	95 (ppm)	60 (ppm)
C _{eq}	0,87	0,78

Observa-se que os teores de elementos básicos (C, Mn, Si, S, P) encontram-se dentro do que especifica a AAR (Association of American Railroads) para a classe C, sendo que os contaminantes S e P são mais baixos na roda sueca, e os elementos de liga como Cr, Ni, Mo, e V são maiores nesta mesma roda.

4.2 - ENSAIOS DE MACROATAQUE

Os resultados do macroataque revelaram uma estrutura característica de forjamento na amostra da roda americana, caracterizada pela presença de estrutura alinhada na região da curva de ligação entre o aro e a alma da roda, conforme mostrado na figura abaixo.

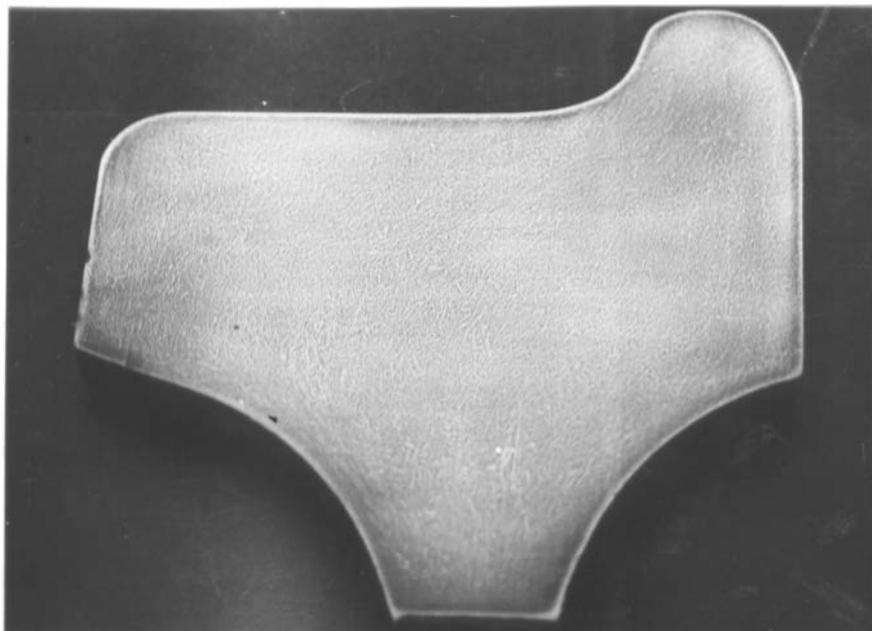


Fig. 20 - Macroestrutura da roda americana.

A roda sueca apresenta uma estrutura característica de peça fundida, com estrutura dendrítica mais grosseira, conforme pode ser observado na figura 21.

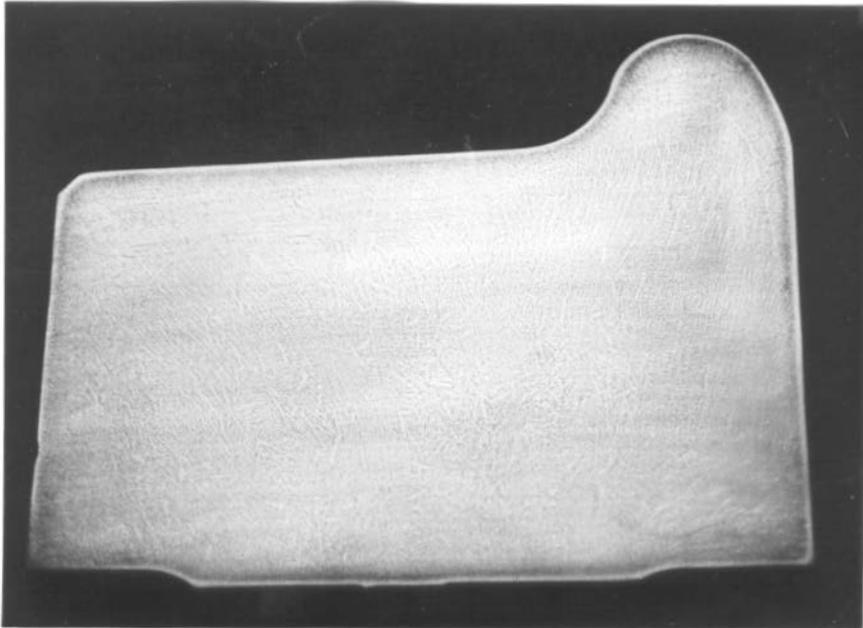


Fig. 21 - Macroestrutura da roda sueca.

4.3 - RESULTADOS DO PERFIS DE DUREZA

Os perfis de dureza apresentaram-se bastante homogêneos, caracterizando uma estrutura com queda de dureza bastante lenta e gradual.

Observa-se que nas quatro direções em que foram realizados os perfis em cada roda, o comportamento e os valores foram bastante homogêneos tanto na amostra da roda americana como na sueca.

As especificações da AAR para as durezas na pista de rolamento estão entre 327 e 375 vickers, constatando-se a conformidade das duas amostras em relação a este requisito.

O perfil 1 da roda Americana é mostrado abaixo e sua localização na secção transversal pode ser visualizada no croqui ao lado para um perfeito entendimento.

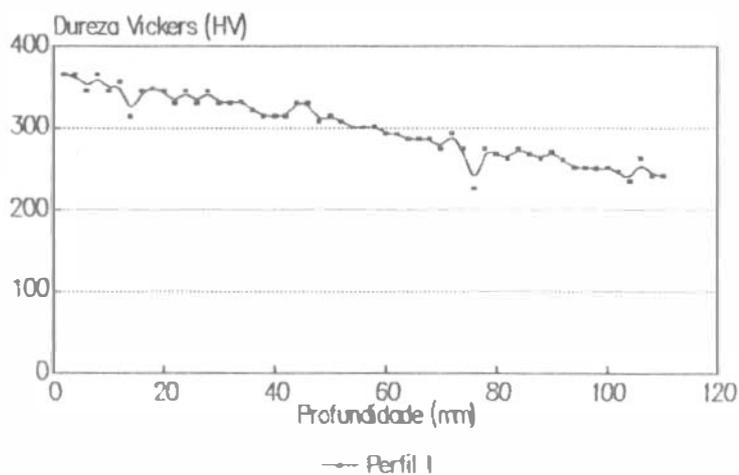
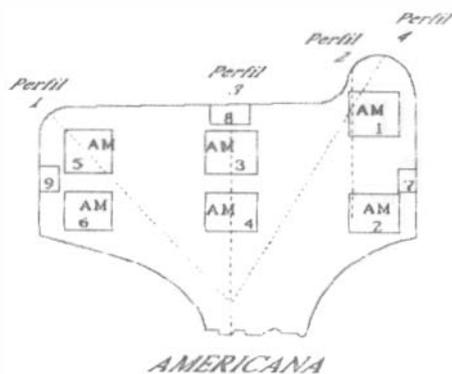


Fig. 22 - Perfil de durezas na linha 1 da roda americana.

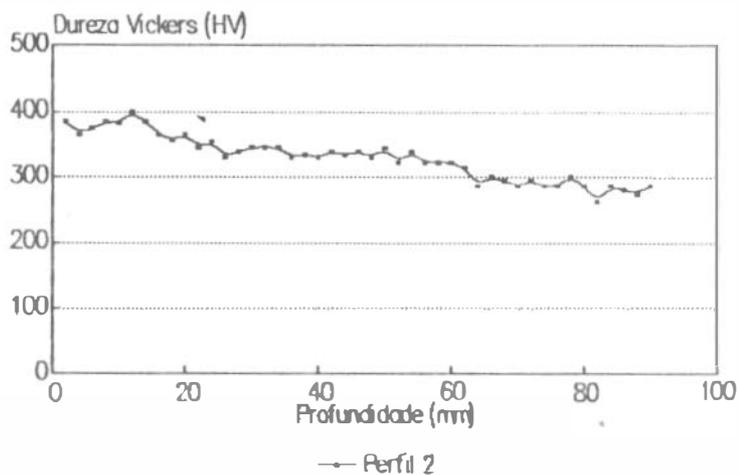


Fig. 23 - Perfil de durezas na linha 2 da roda americana.

Abaixo apresenta-se os perfis 3 e 4 da mesma secção da roda americana, localizados conforme croqui ao lado.

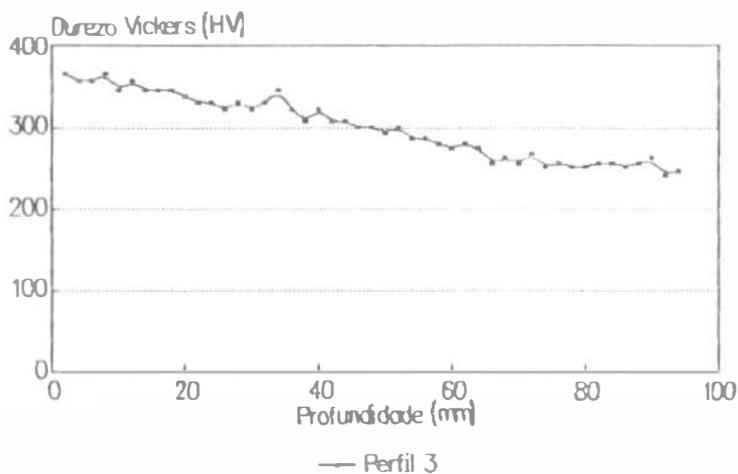
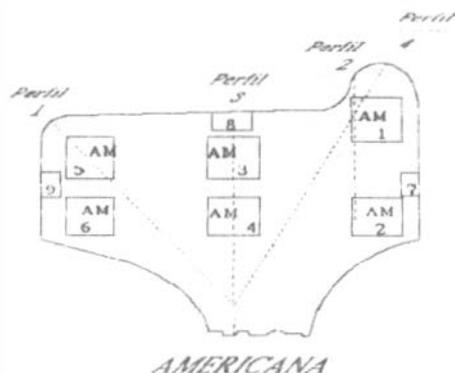


Fig. 24 - Perfil de durezas na linha 3 da roda americana.

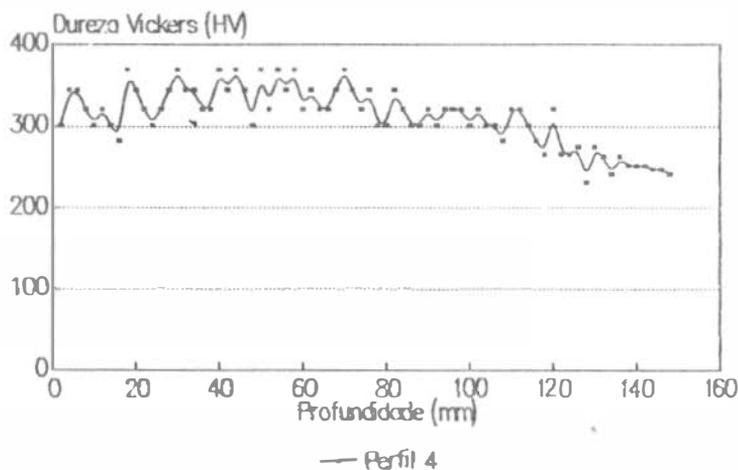


Fig. 25 - Perfil de durezas na linha 4 na roda americana.

A próxima seqüência de resultados de perfis de dureza referente a roda sueca, sendo as localizações das impressões também mostradas no croqui ao lado.

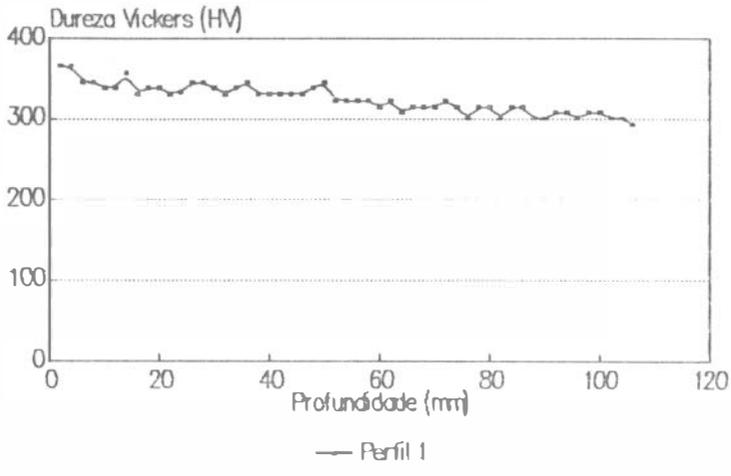
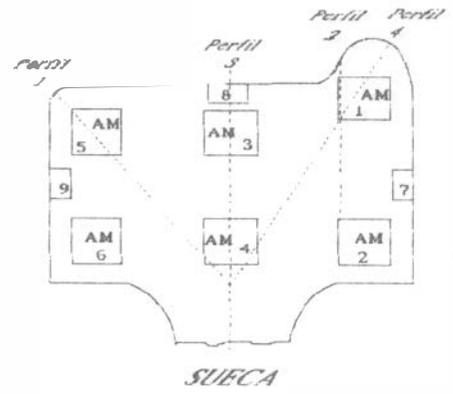


Fig. 26 - Perfil de durezas na linha 1 da roda sueca.

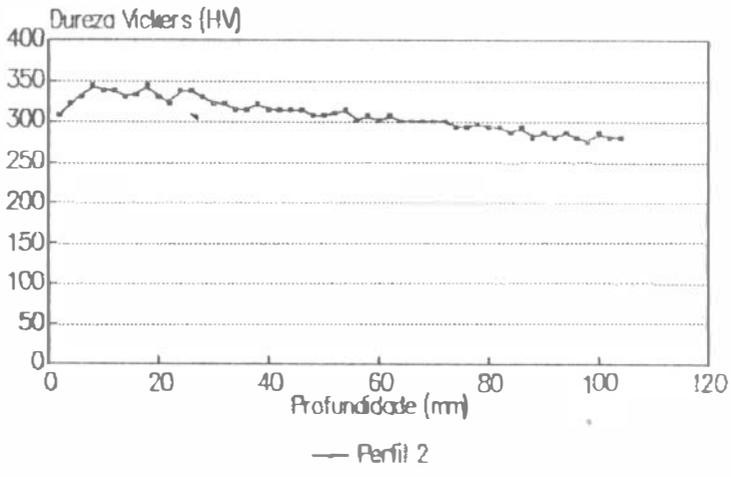


Fig. 27 - Perfil de durezas na linha 2 da roda sueca.

Abaixo são mostrados os perfis localizados nas linhas 3 e 4 do croqui ao lado.

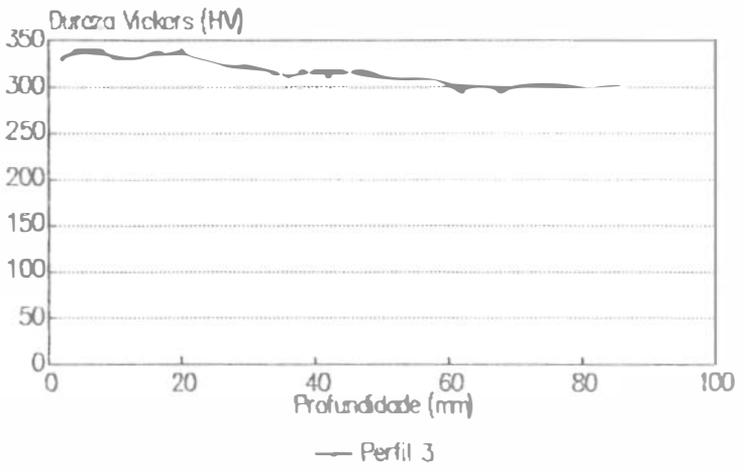
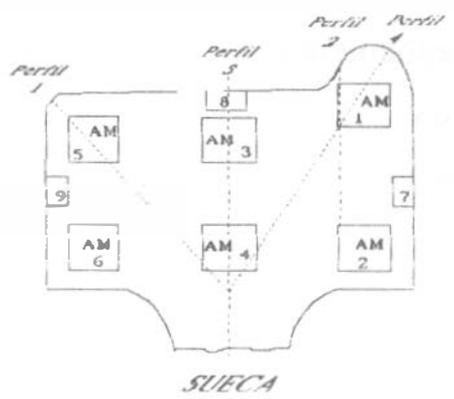


Fig. 28 - Perfil de durezas na linha 3 da roda sueca.

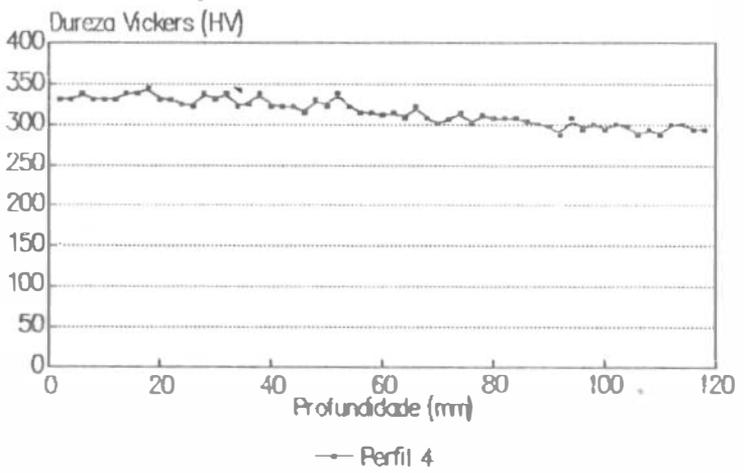


Fig. 29 - Perfil de durezas na linha 4 da roda sueca.

4.4 - RESULTADOS METALOGRAFICOS E DE ANÁLISE DE INCLUSÕES

Os ensaios metalográficos foram realizados, conforme metodologia de amostragem descrita em 3.4, ou seja, em nove (9) amostras de cada roda. Como as variações estruturais são pequenas de amostra para amostra da mesma roda, o que é também indicado pelos perfis de dureza, apresentar-se-á as micrografias mais representativas das respectivas rodas, que são as amostras 3,4 e 8, todas na linha central do aro. Conforme já visto a amostra 8 encontra-se próxima à superfície, a amostra 4 bem no centro e a 3 na região intermediária.

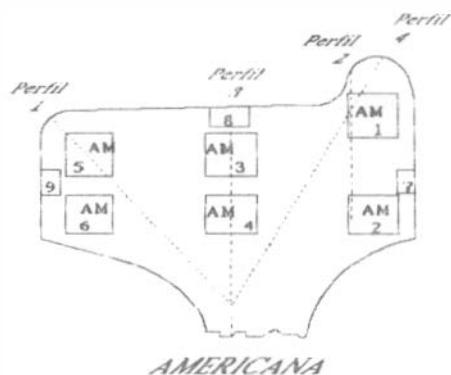
A estrutura observada apresentou-se bem homogênea e em ambos os casos é constituída de perlita fina. Foi observado na roda sueca, junto à pista de rolamento, a presença de bainita, resultado do ciclo térmico desta região. Outro aspecto característico da roda sueca foi a presença de rede de ferrita em contorno de grão. O tamanho de grão para os dois casos apresentou-se da ordem de 8 (ASTM).

As inclusões nos dois casos são predominantemente do tipo sulfetos de manganês (MnS), conforme é observado nas análises realizadas em microsonda sobre as inclusões.

O espaçamento lamelar foi medido nas amostras centrais, ou seja, nas amostras 3 e 4 da tabela I (ACS, ACI, SCS e SCL), onde se tem um gradiente de taxa de resfriamento que produzirá variações no espaçamento lamelar.

Os resultados são apresentados de forma similar aos resultados dos perfis de dureza, apresentando um croqui da secção transversal de cada roda para melhor visualização da região em que se está mostrando a estrutura.

A figura 30 mostra a microestrutura observada na amostra 8 da roda americana (AST). Estrutura perlítica bastante fina e, praticamente a ausência total de rede de ferrita (pró-eutetóide).



O croqui na margem superior direita da página, mostra a localização desta micrografia. Nota-se a inexistência de ferrita pró-eutetóide (rede de ferrita em contorno de grão).



Fig. 30 - Microestrutura próxima a pista de rolamento da roda americana, amostra 8 (AST). Estrutura de perlita fina. Luz polarizada. Ataque de nital 2%. (500x)

A figura 31, mostra a mesma região porém com maior ampliação, caracterizando o fino espaçamento lamelar.

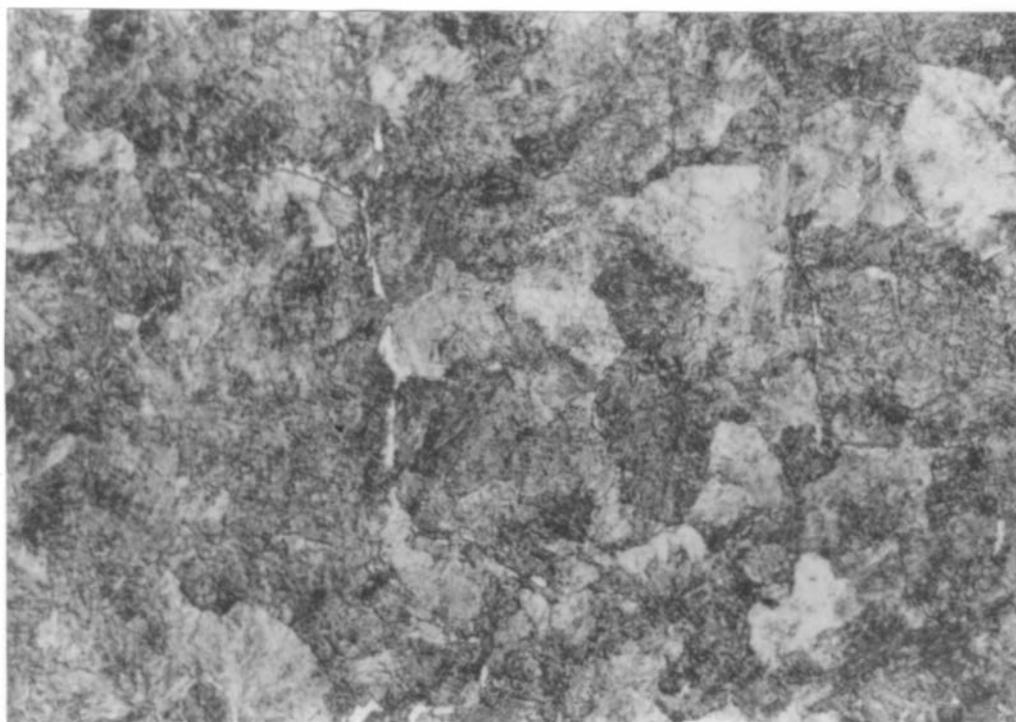
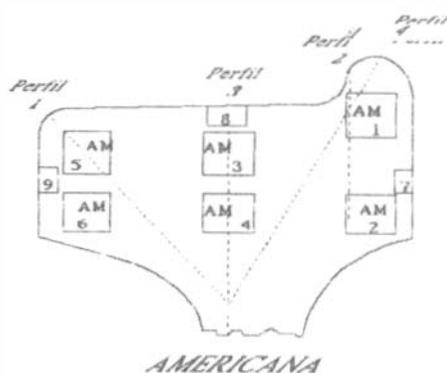
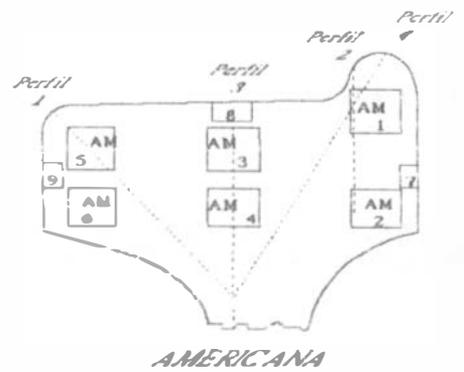


Fig. 31 - Microestrutura da amostra da figura 18. Luz polarizada. Ataque de nital 2%. (1000x)

A figura 32 mostra a estrutura característica da amostra 3 (ACS), já sendo em alguns locais possível a visualização de pouca ferrita pró-eutetóide.



A ferrita que aparece é bastante fina e descontínua, não sendo identificada em ampliação de 100x. É pouco significativa para o aumento da tenacidade do material. Com a técnica ótica de luz polarizada, pode-se observar as colônias de perlita no interior de grão, pela diferenciação de cores.

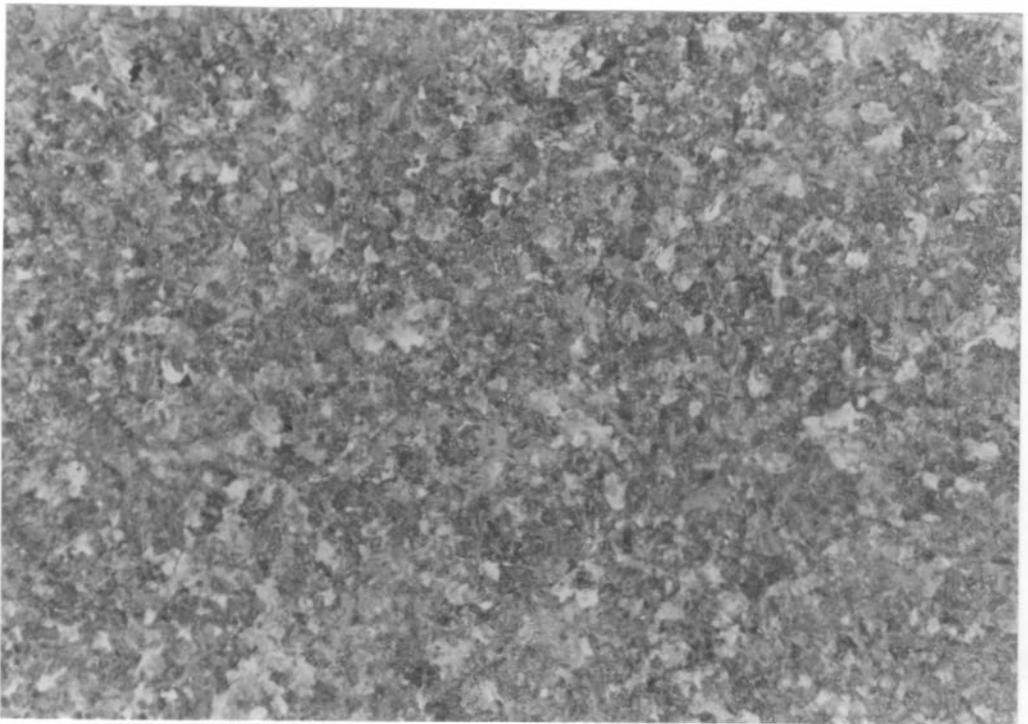


Fig. 32 - Microestrutura observada na amostra 3 (ACS - Americana). Luz refletida. Ataque de nital 2%. (100x)

Nas figuras 33 e 34 caracteriza-se a mesma amostra, porém com aumento de 1000x.

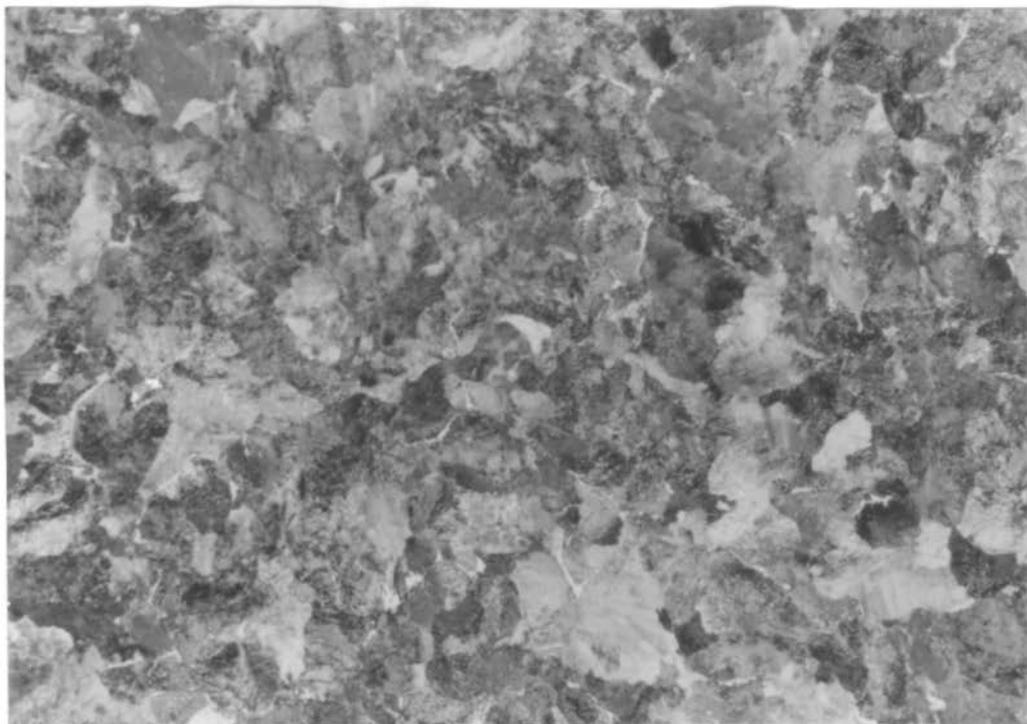


Fig. 33 - Mesma amostra anterior, em maior ampliação. Luz polarizada. Ataque de nital 2%. (500x)

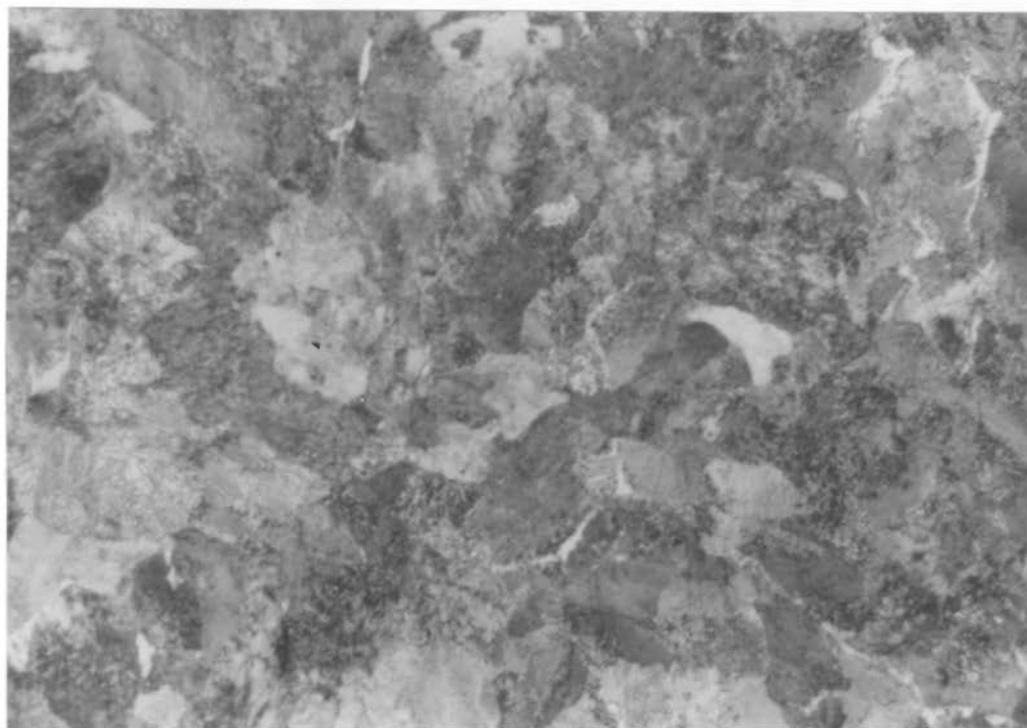


Fig. 34 - Mesma amostra anterior em luz polarizada. Ataque de nital 2%. (1000x)

As figuras 35 e 36 caracterizam a amostra 4 (ACI) da roda americana. Mesmo nesta região tem-se perlita fina e pouca ferrita em contorno.

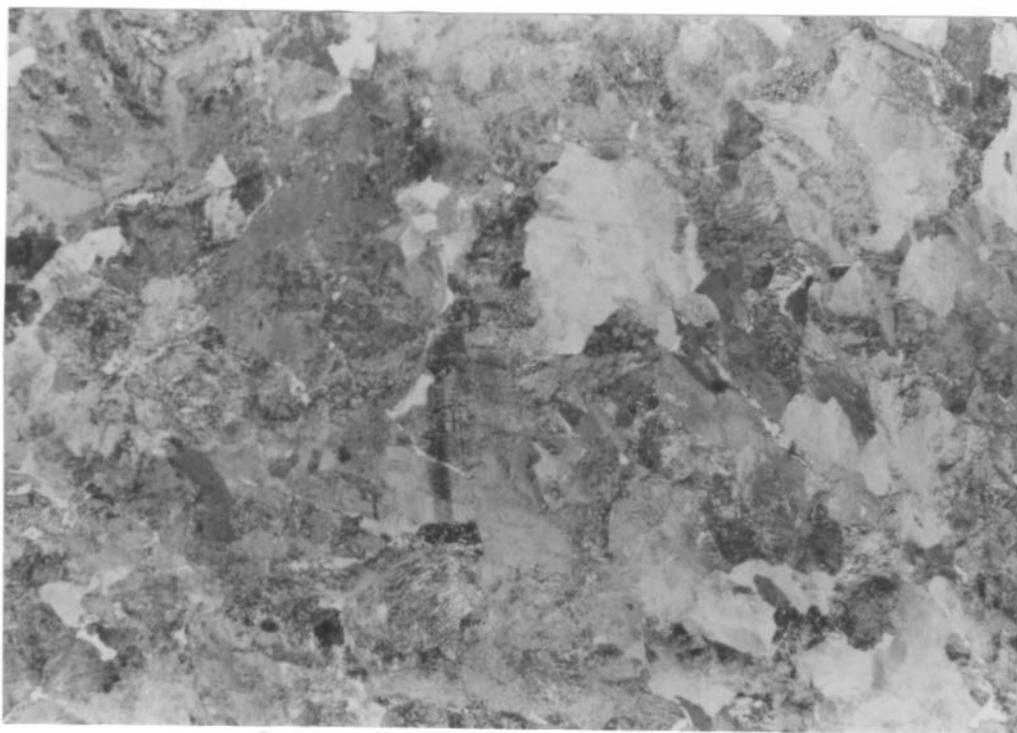
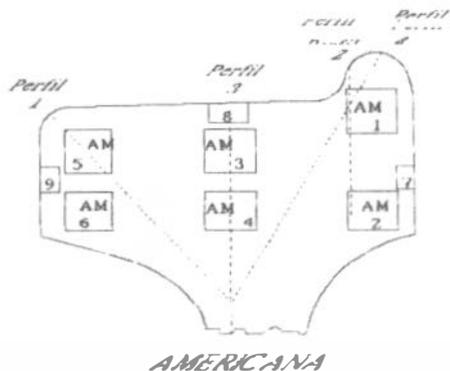


Fig. 35 - Microestrutura da amostra 4 (ACI), caracterizando presença de perlita fina com pouca ferrita em contorno. Luz polarizada, ataque de nital 2%. (500x)

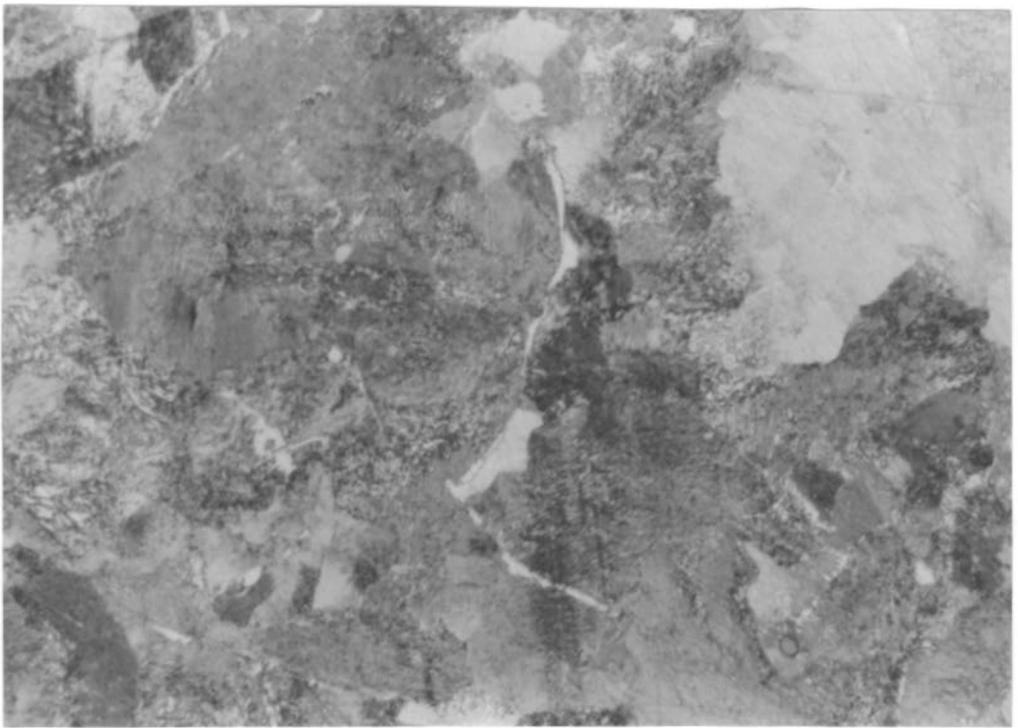


Fig. 36 - Mesma amostra anterior. Ataque de nital 2%. (1000x)

Como característica principal da análise metalográfica destas amostras, tem-se a presença de quase 100% de perlita bastante fina, homogênea.

O tamanho de grão também apresenta-se homogêneo e com bom tamanho (ASTM 8).

As outras amostras analisadas desta roda, apresentaram estrutura idêntica às observadas nas figuras 18 a 24, sendo estas bem representativas da secção observada.

A homogeneidade desta estrutura é compatível com os perfis de dureza levantados nesta secção, os quais se apresentaram igualmente homogêneos e com uma queda lenta e gradual de dureza, desde a pista de rolamento até o final do aro.

As figuras 37 e 38 mostram a estrutura da amostra 8 da roda sueca (SST), mostrando a presença de estrutura de bainita superior, junto à pista de rolamento.

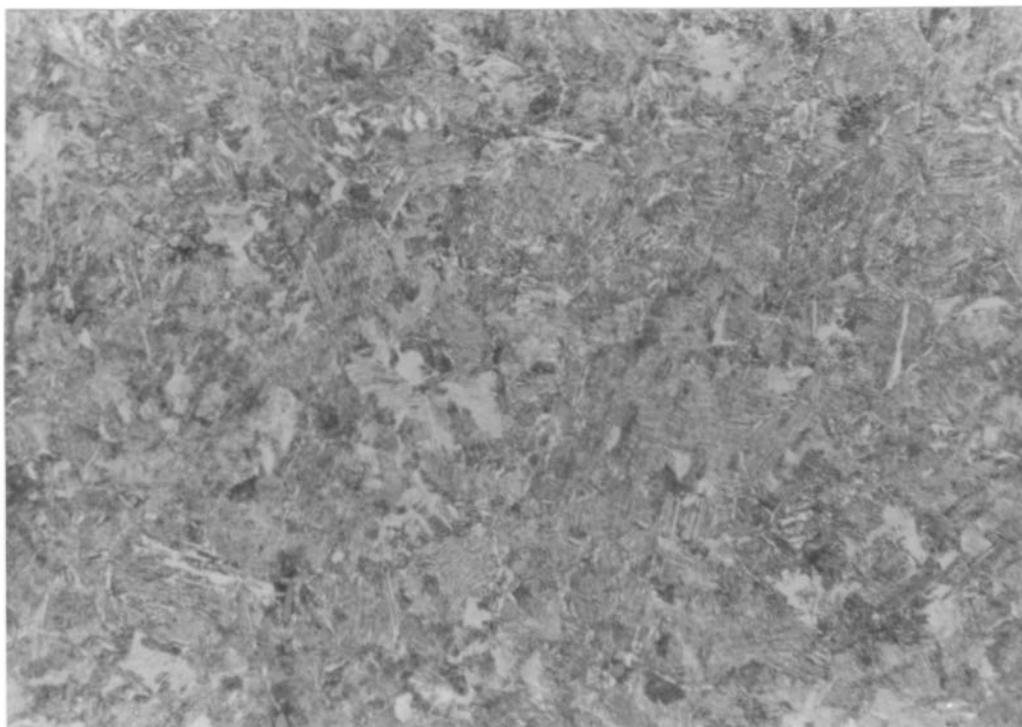
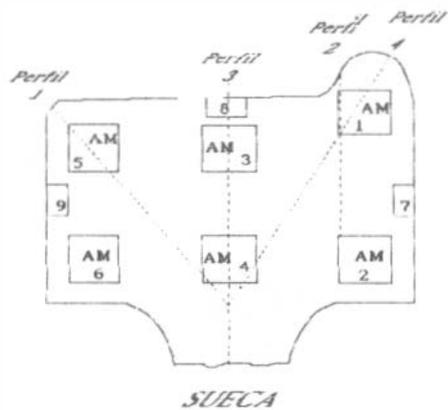


Fig. 37 - Microestrutura da amostra 8 (SST - Sueca), próxima a pista de rolamento. Estrutura com presença de bainita superior. Luz polarizada. Ataque de nital 2%. (500x)

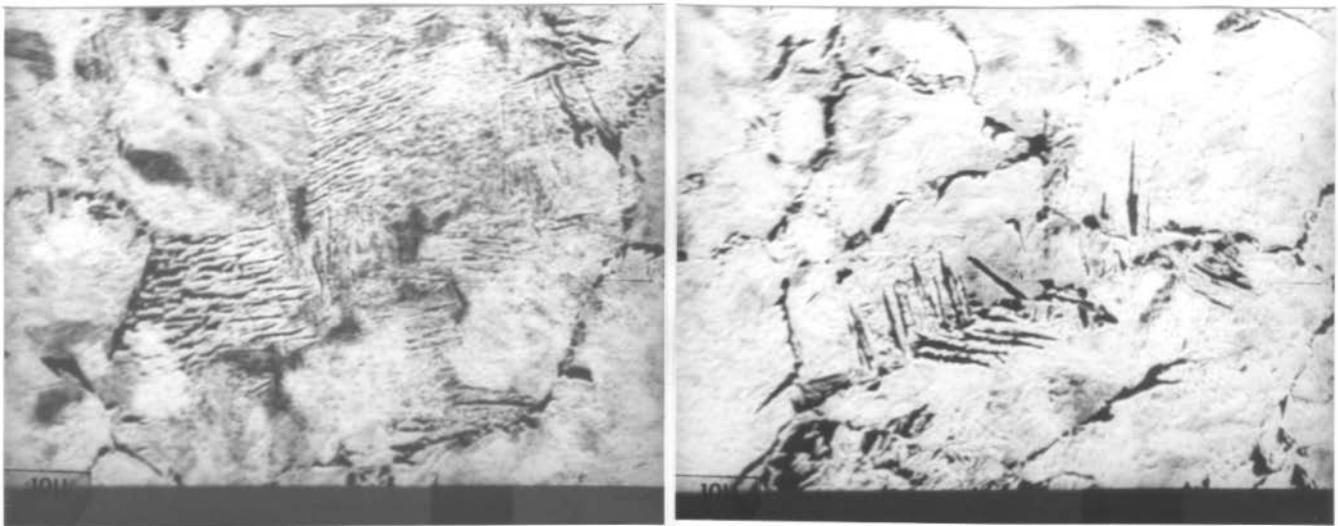


Fig. 38 - Mesma região, analisada em microscópio eletrônico de varredura. Caracteriza bem presença de bainita. Aumento de 1100x. Ataque de nital 2%.

Na figura 39 aparece a mesma amostra das figuras 37 e 38, porém com maior aumento. A figura 40 é a mesma amostra a uma profundidade de 4 mm, não se observando mais presença de bainita, e sim perlita fina com rede de ferrita em contorno de grão.

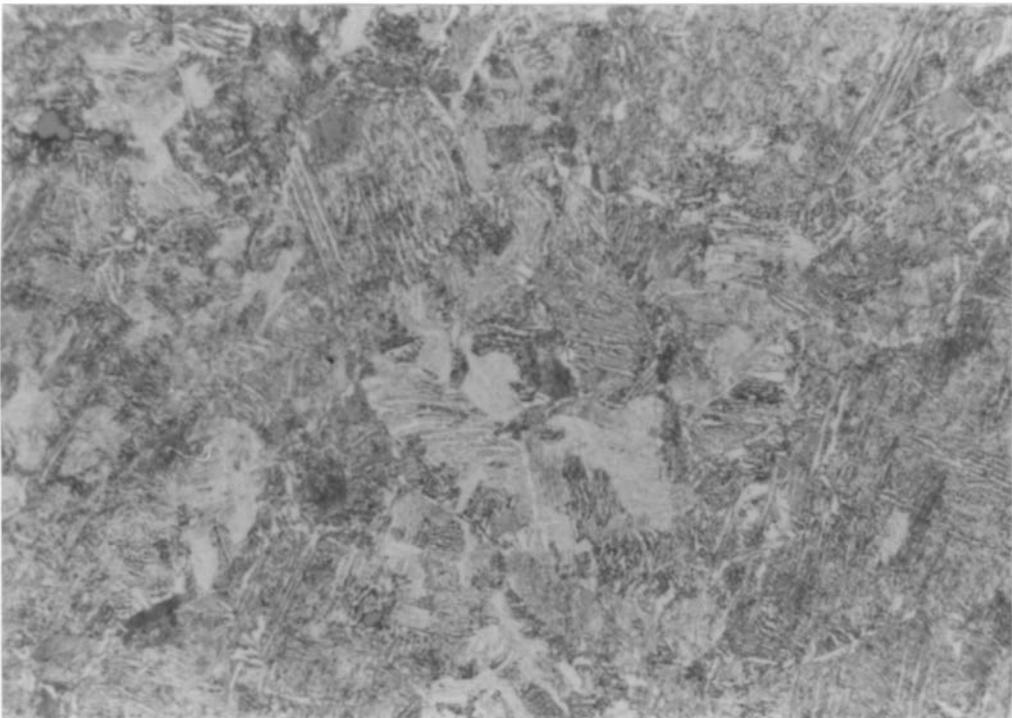


Fig. 39 - Mesma amostra da figura 37 em maior aumento. Luz polarizada. Ataque de nital 2%. (1000x)

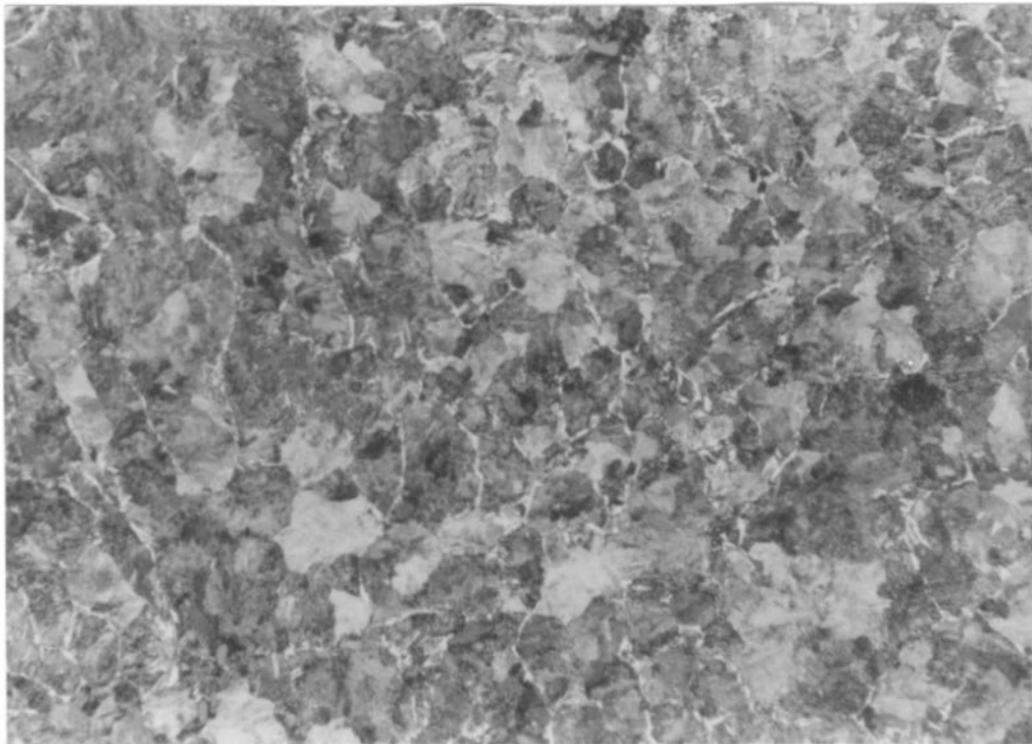


Fig. 40 - Amostra 8 da roda sueca (SST), caracterizando presença de perlita fina e rede de ferrita. Luz polarizada. Ataque de nital 2 %.(500x).

Abaixo mostra-se os resultados de metalografia para a amostra 3 da roda sueca (SCS). Observa-se maiores quantidades de ferrita em contorno de grão.

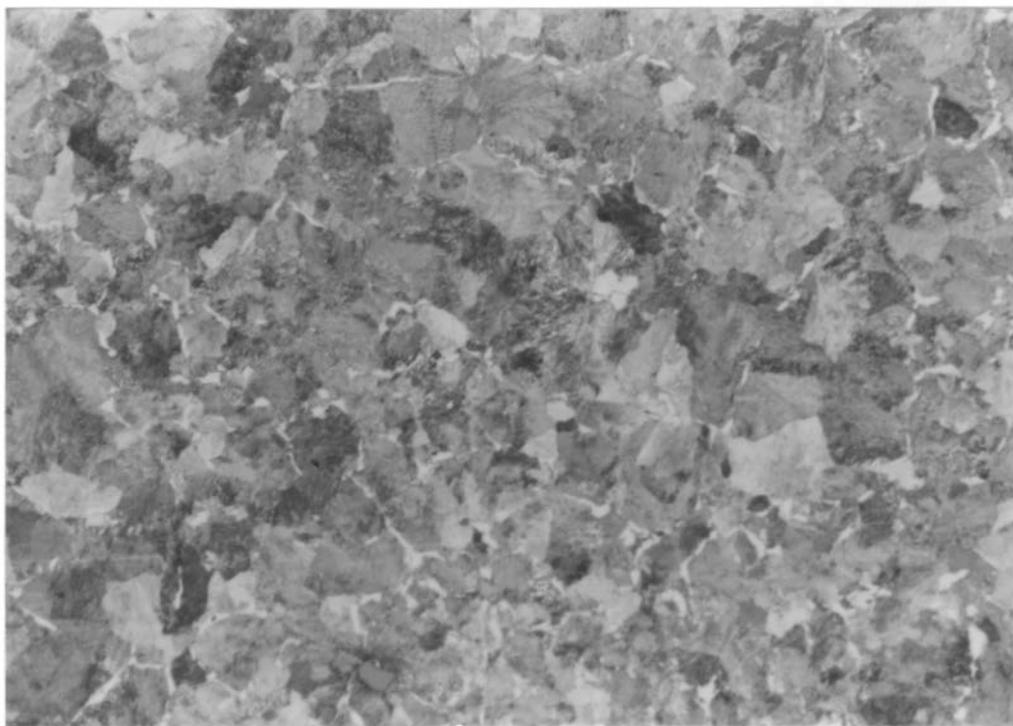
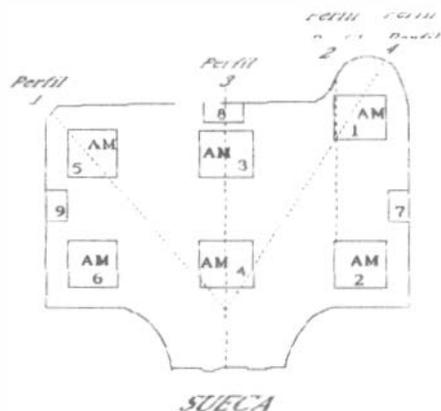


Fig. 41 - Amostra 3 da roda sueca (SCS). Estrutura de perlita fina com ferrita pró-eutetóide em contorno. Luz polarizada. Ataque de nital 2%. (500x)

A figura 42 mostra a mesma região porém com maior aumento, aparecendo a perlita fina e a maior quantidade de ferrita pró-eutetóide.

A presença de ferrita pró-eutetóide em contorno de grão é benéfica para um melhor comportamento em fratura do material, resultando em um maior valo de K_{IC} . Deve ser chamada a atenção para o fato de que a roda americana praticamente não apresenta ferrita pró-eutetóide.

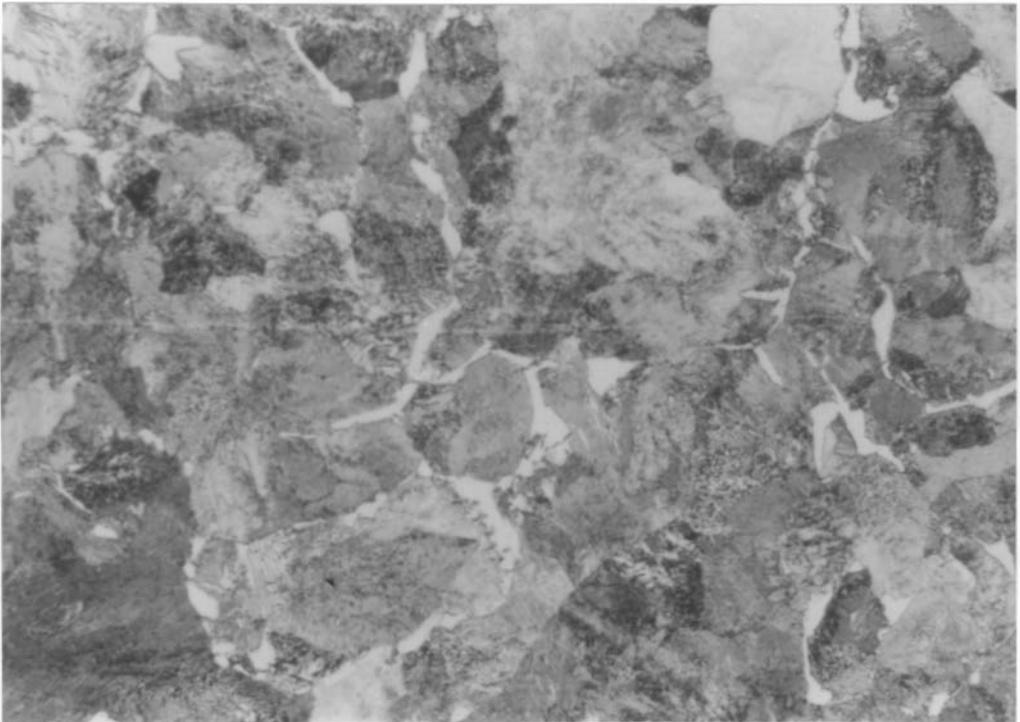


Fig. 42 - Mesma região anterior com maior aumento. Luz polarizada. Ataque de nital 2%. (1000x)

A figura 43 apresenta a estrutura observada na amostra 4 da roda sueca (SCI).

Amostra SCI mostran-do a homogeneidade da estrutura e a presença de ferrita em contorno.

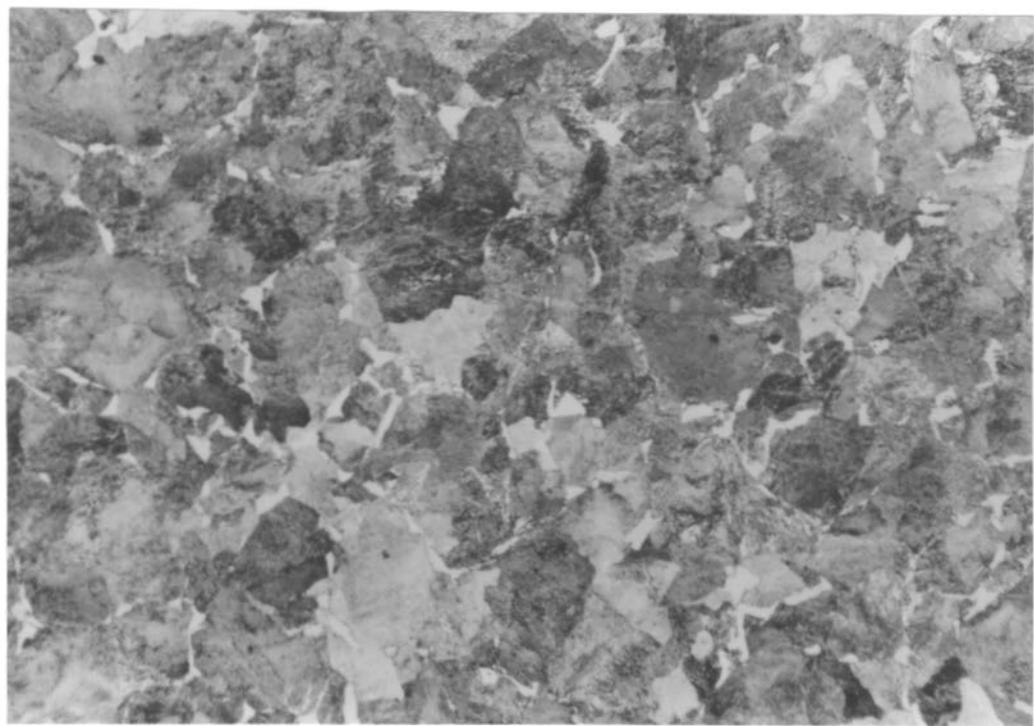
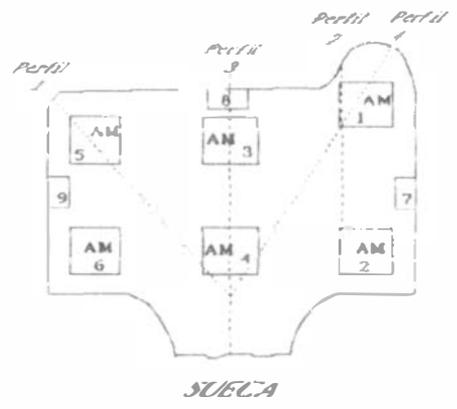


Fig. 43 - Amostra 4 da roda sueca (SCI). Estrutura de perlita fina e ferrita em contorno de grão. Luz polarizada. Ataque de nital 2%. (500x)

Os resultados metalográficos mostram uma diferença muito clara entre as duas rodas, que é a presença de rede de ferrita em contorno na roda sueca, o que é benéfico para o aumento da tenacidade à fratura do material. Outro aspecto diferenciador esta na presença de estrutura bainítica na pista de rolamento da roda sueca.

Os resultados de espaçamento lamelar são mostrados na tabela abaixo, os quais foram medidos nas amostras 3 e 4 das respectivas rodas. (ACS, ACI, SCS e SCI).

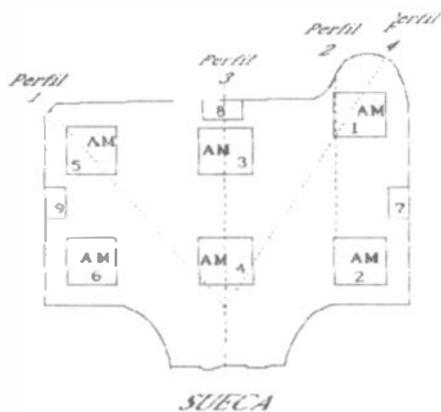


Tabela VI - Espaçamento lamelar da perlita para as rodas.

Origem	Americana	Sueca	Americana	Sueca
Número	Nº 3	Nº 3	Nº 4	Nº 4
Código	ACS	SCS	ACI	SCI
Esp. Lam. (μm)	0,54	0,64	0,57	0.83

Os resultados demonstram perlita mais fina na roda americana. Segundo a mecânica da fratura, quanto menor o espaçamento lamelar melhor o comportamento em fratura do material. Na figura 44 pode visualizar-se algumas fotos obtidas em MEV para medição do espaçamento lamelar.

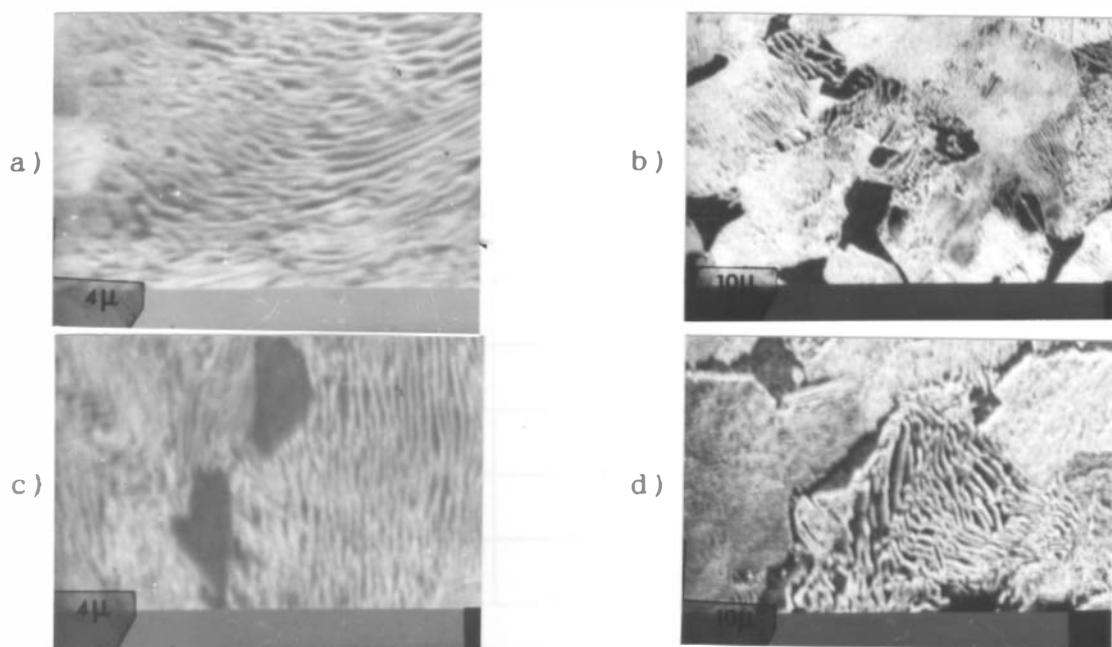


Fig. 44 - Fotos para espaçamento lamelar. (a - ACS, b - ACI, c - SCS e d - SCI). (a e c - 2750x, b e d 1100x)

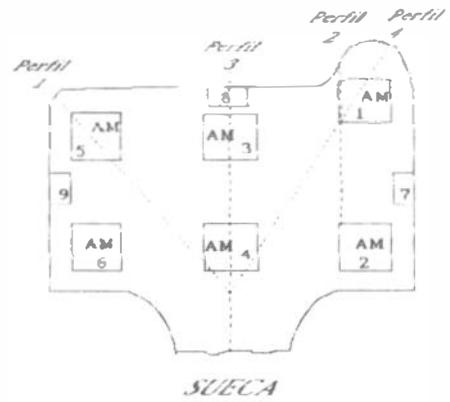
Os resultados de inclusões são mostrados nas tabelas VII e VIII, para o sentido transversal e circunferencial, respectivamente. Na secção transversal foram analisadas as seis amostras, fora as superficiais, e na secção circunferencial foram analisadas somente as amostras centrais, uma vez constatada a maior incidência de inclusões nestas regiões.

As inclusões tipo A são de sulfetos de manganês (MnS), e o número apresentado na tabela representa a quantidade existente no respectivo tamanho.

Tabela VII - Número e tamanho das inclusões segundo norma ASTM E 45 - 87 (sentido transversal).

Amostra	Tipo	Tamanho		
		Fino ($< 10\mu$)	Médio (10 a 30μ)	Grosso ($> 30\mu$)
SII	A	0	3	9
SES	A	0	2	2
SIS	A	17	31	10
SEI	A	0	4	6
SCS	A	1	1	8
SCI	A	2	24	13
AII	A	2	12	19
AES	A	3	16	27
ACI	A	8	53	29
AIS	A	8	25	27
AEI	A	11	15	32
ACS	A	3	20	26

Tabela VIII Número e tamanho de inclusões na direção circunferencial.

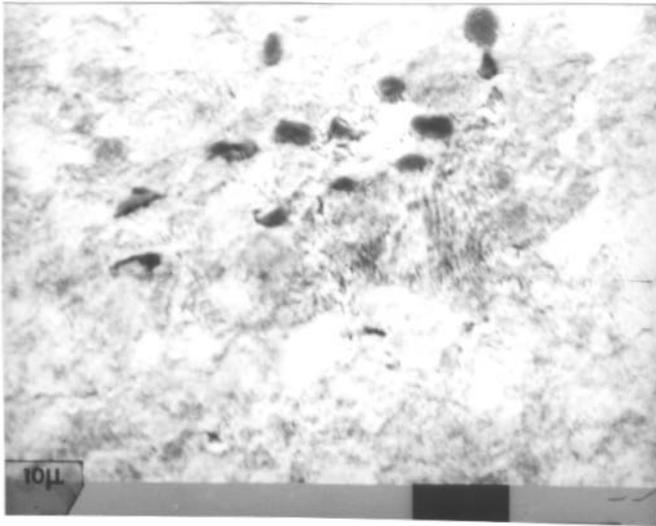
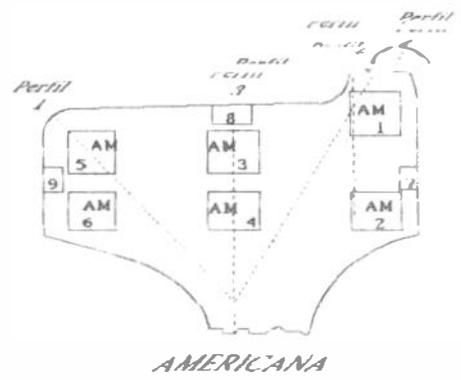


Amostra	Tipo	Tamanho		
		Fino (< 10 μ)	Médio (10 a 30 μ)	Grosso (> 30 μ)
ACS - 3	A	1	22	37
ACI - 4	A	4	49	51
SCS - 3	A	16	50	13
SCI - 4	A	23	77	58

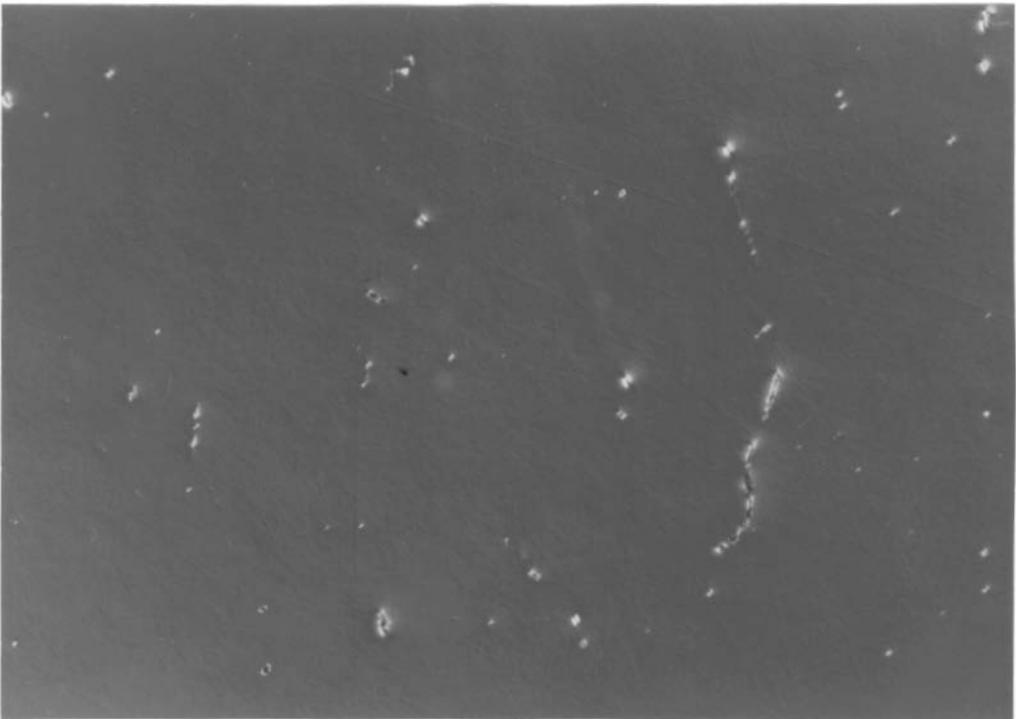
O número de inclusões contados no sentido transversal, em que foram analisadas todas as seis amostras, é maior na roda americana, onde foram contadas um total de 336 inclusões, contra 133 para a roda sueca. Além de contadas as inclusões foram medidas em seu comprimento e largura, e realizada uma relação entre a segunda e a primeira (larg./comp.), atribuindo um grau de globulização, sendo que quanto mais próxima de 1 for esta relação mais globulizada é a inclusão. Para a secção transversal esta relação foi de 0,33 para a americana e 0,39 para a sueca.

Na secção circunferencial foram analisadas somente as amostras centrais. Observou-se um maior número de inclusões na roda sueca, sendo de 237 contra 164 para a roda americana. No entanto, a relação (larg./comp.) foi de 0,43 para a roda sueca contra 0,30 para a americana.

O maior número de inclusões nesta região para a roda sueca é justificado pelo fato desta ser fundida, enquanto a outra é forjada. As fotos na figura 45 mostram as inclusões.



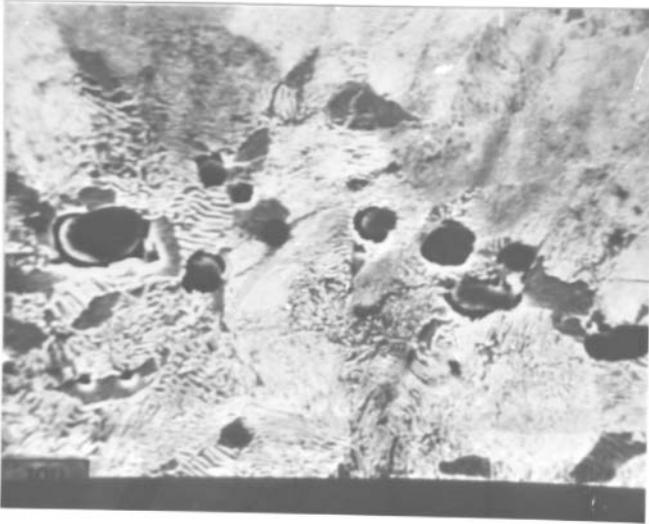
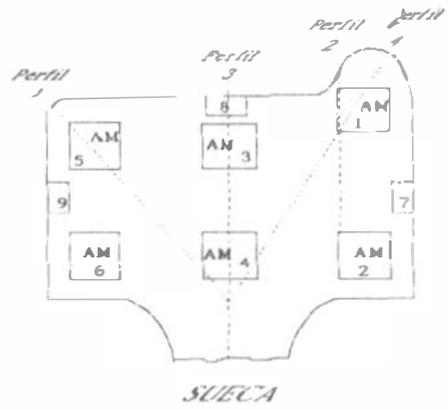
(a)



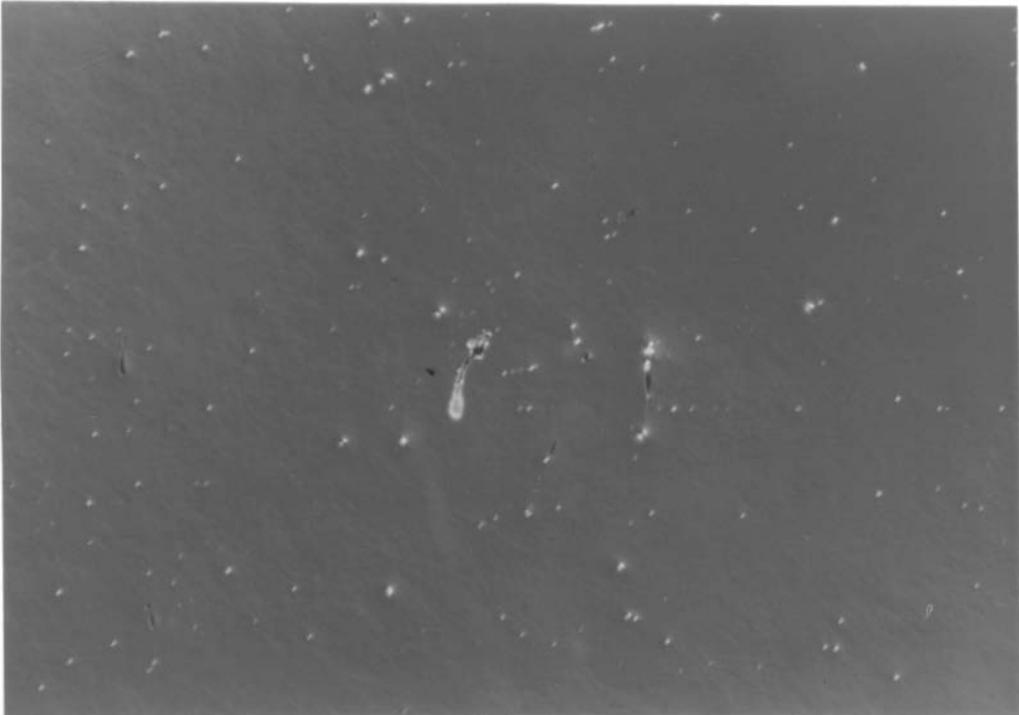
(b)

Fig. 45 - Inclusões na roda americana. Em (a) foto obtida em MEV (1100x) e em (b) observada sob luz polarizada (100x.)

A figura 46 mostra as inclusões da roda sueca, sendo em (a) vista em MEV (microscópio eletrônico de varredura) e em (b) sob luz polarizada.



(a)



(b)

Fig. 46 - Inclusões na roda sueca. Em (a) fotografado em MEV (1100x) e em (b) observado com luz polarizada (100x).

A figura 47 mostra o espectro de varredura obtida no MEV, realizada nas inclusões da roda americana, confirmando a presença de enxofre e manganês, ou seja. sulfeto de manganês.

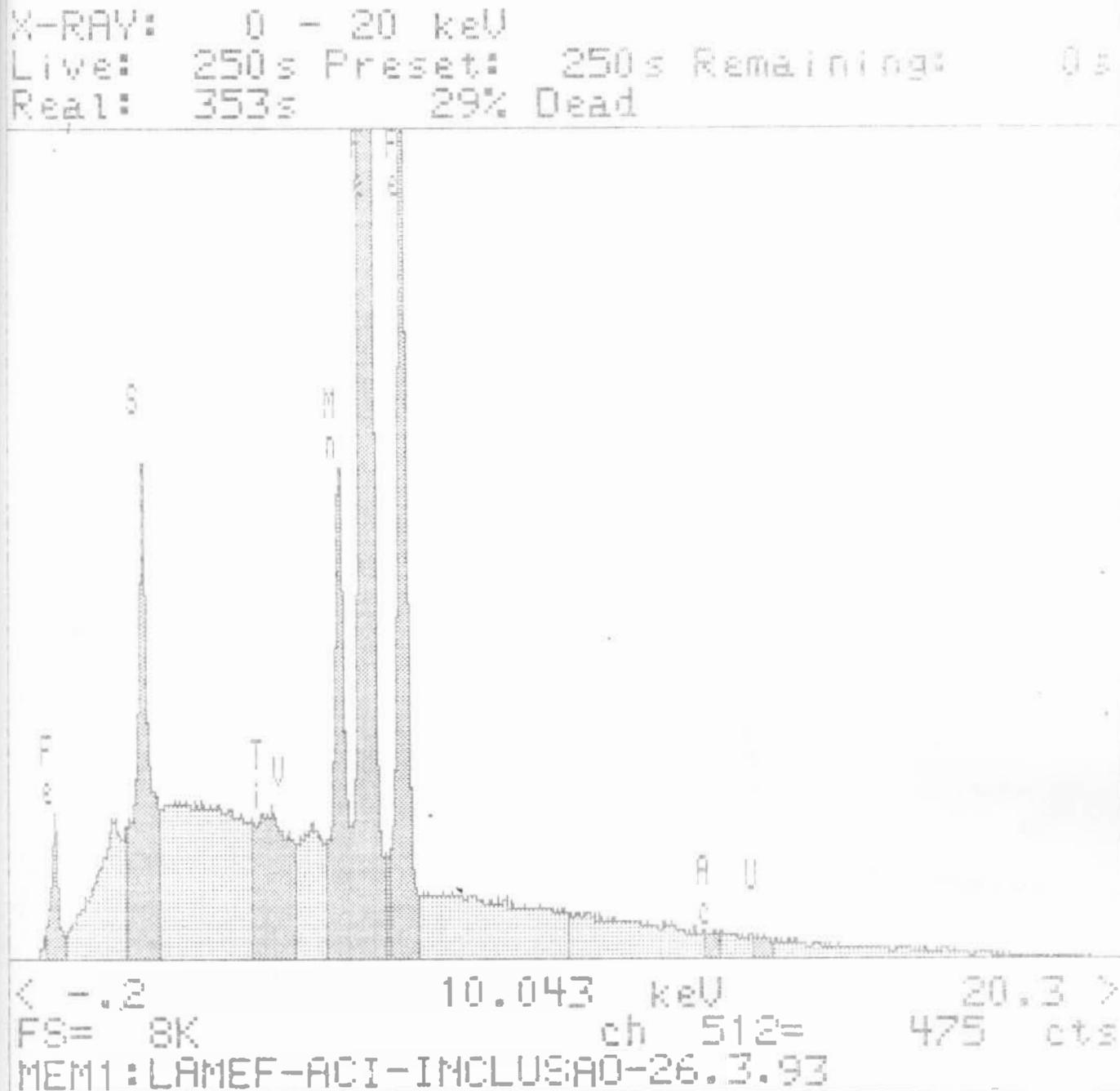


Fig. 47 - Resultado da microanálise em microsonda realizada sobre as inclusões da roda americana.

Na figura 48 é observado o espectro da microanálise nas inclusões da roda sueca.

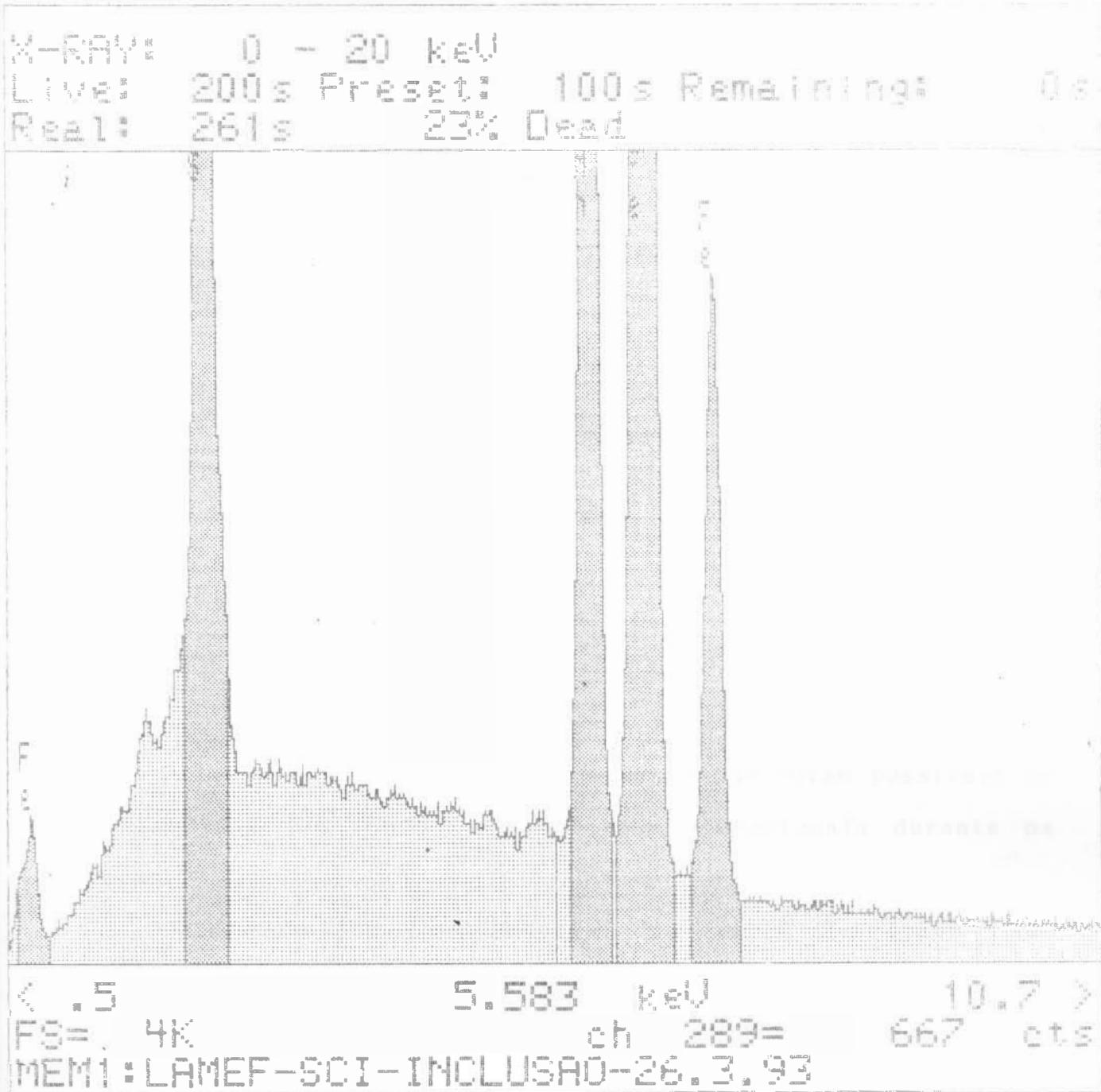


Fig. 48 - Resultado da microanálise em microsonda realizada nas inclusões da roda sueca.

4.5 - RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Os resultados dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova são apresentados na tabela IX.

Tabela IX - Resultados dos ensaios de tração.

Amostra	Base de med. (along.) (mm)	R _{traç.} (MPa)	Along. (%)	Red. Área (%)
Americ.	49,64	1096	10,7	30,7
Americ.	49,51	1095	13,9	30,3
Americ.	50,01	1090	12,9	29,5
Med. A.		1093,6	12,5	33,7
Sueca	50,27	1058	14,0	34,8
Sueca	50,14	1041	13,3	34,2
Med. S.		1043	13,7	34,5

Os valores de tensão de escoamento não foram possíveis de serem medidos, em função de problemas operacionais durante os ensaios.

Observa-se que os valores do limite de tração são condizentes com dados oferecidos na bibliografia.

Após ensaiados os corpos de prova, caracterizou-se as fraturas em microscopia eletrônica de varredura (MEV), confirmando predominância de fratura por clivagem para a roda americana e fratura mista, ou seja, presença de micro cavidades, na roda sueca.

A figura 49 mostra as fractografias dos corpos de prova de tração.

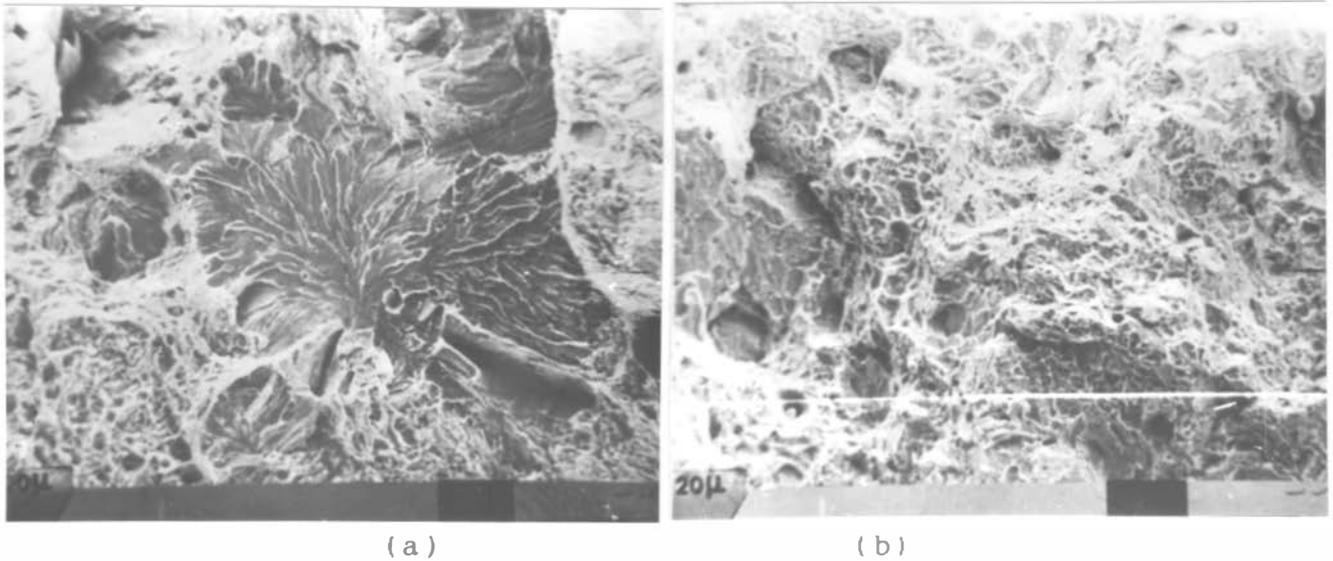


Fig. 49 - Caracterização da superfície de fratura dos corpos de prova de tração. Em (a) fratura da roda americana mostrando predominância de clivagem e em (b) a roda sueca caracterizando presença de micro cavidades.

4.6 - RESULTADOS DE TENSÕES RESIDUAIS

Com um mesmo seccionamento, conforme descrito no item 3.6, obteve-se dois resultados de tensões residuais, colando-se dois extensômetros lado a lado.

Como era de se esperar, as tensões residuais nas duas amostras foram bastante baixas, o que confirma um processo de fabricação com resfriamentos controlados.

Um aspecto importante a ser ressaltado reside no fato dos dois extensômetros de cada roda terem resultado em valores próximos de medida de deformação, consolidando a confiabilidade dos resultados.

A figura 50 mostra o comportamento das tensões em função da profundidade de corte, observando-se os baixos níveis de tensão nos dois extensômetros, para a roda americana.

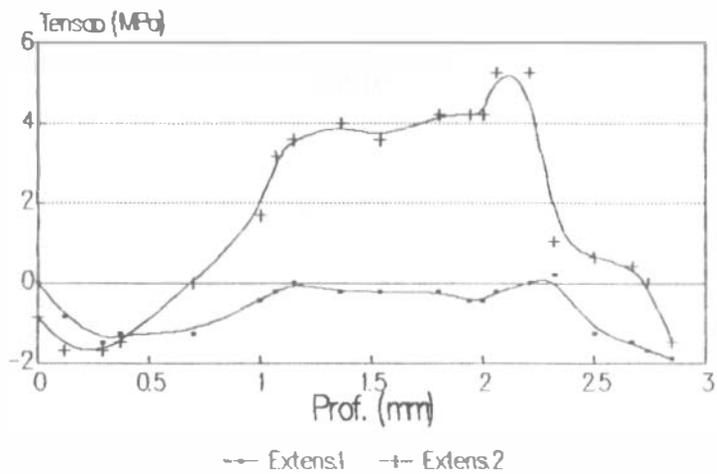


Fig. 50 - Evolução das tensões residuais em função da profundidade de corte.

A figura 51 mostra as tensões para a roda sueca, que também apresentou baixos valores.

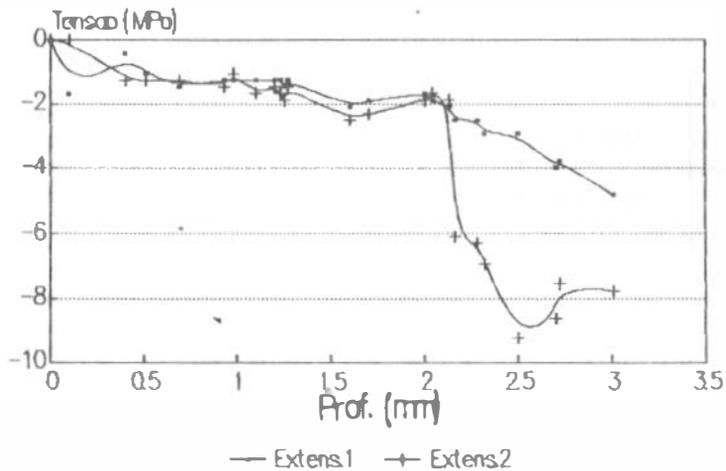


Fig. 51 - Evolução das tensões residuais em função da profundidade de corte.

Como tratam-se de rodas sem uso (novas), o baixo nível de tensões é coerente e benéfico para os referidos componentes.

4.7 - RESULTADOS DE TENACIDADE À FRATURA

Os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura (K_{IC}) são apresentados na tabela X onde:

- $K_{IC} = (P \cdot Y)/(B \cdot w^{1/2})$
- W = Altura do corpo de prova;
- B = Espessura do corpo de prova;
- a = Profundidade da trinca;
- Y = Função de a/W;
- P = Carga máxima.

Tabela X - Resultados de tenacidade à fratura.

Amostra	Carga (N)	W (mm)	B (mm)	a (mm)	f(a/W)=Y	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})
Americ.	10594,8	30,10	15,00	16,19	12,06	49,1
	10349,5	30,10	14,85	15,60	11,29	45,3
	10231,8	30,05	15,00	16,01	11,86	46,7
Sueca	10643,8	29,90	14,25	17,08	13,50	58,3
	14322,6	30,10	15,90	15,91	11,70	64,8
	8730,9	30,25	12,45	17,14	13,30	53,6

Observa-se que os valores de K_{IC} para a roda sueca foram superiores do que os obtidos para a roda americana.

A figura 52 mostra o gráfico do ensaio para a roda americana que resultou em um K_{IC} de 46,7 MPa.m^{1/2}.

A figura 53 caracteriza o gráfico para a roda sueca que resultou em K_{IC} de 64,8 MPa.m^{1/2}.

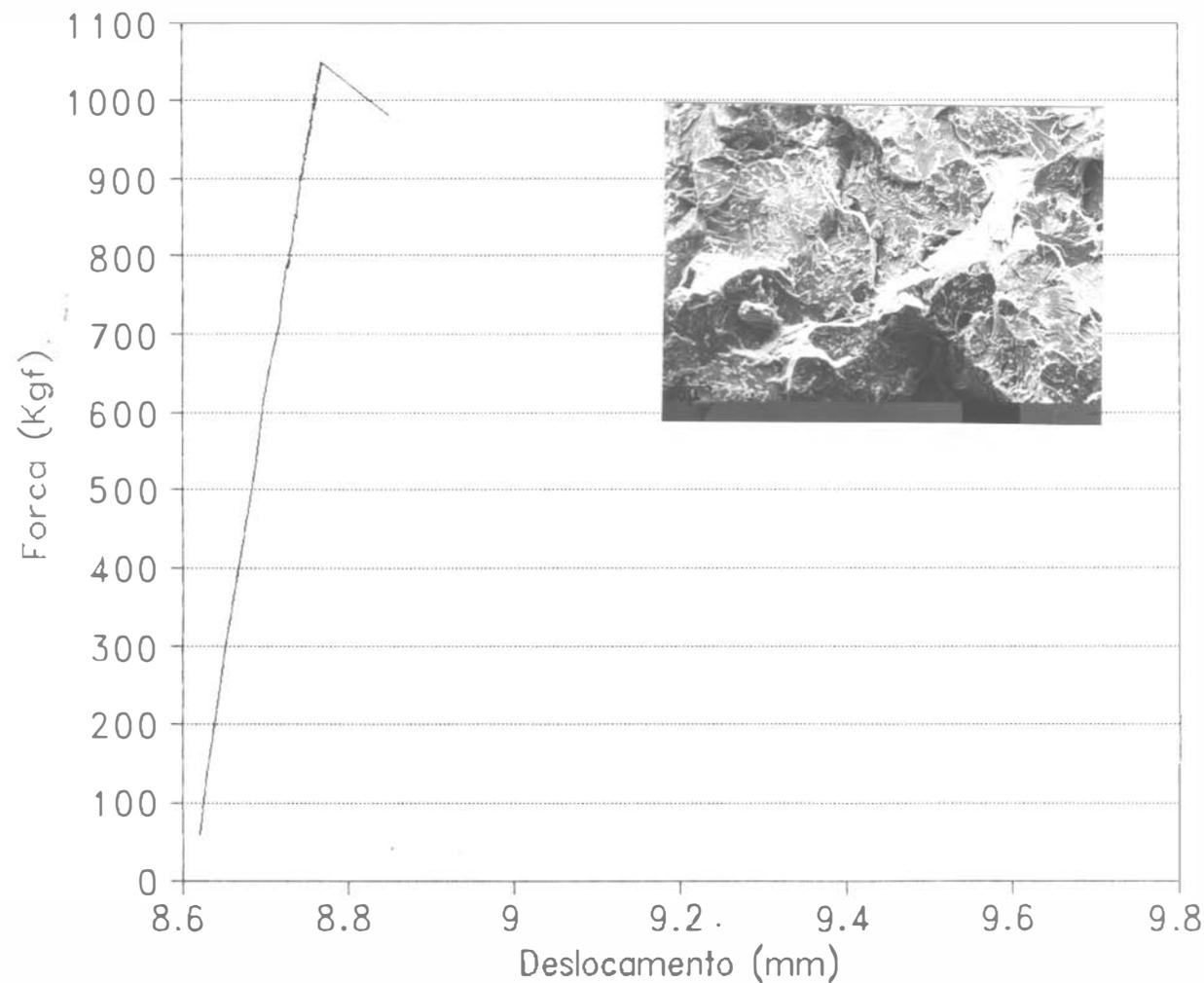


Fig. 52 - Registro da carga pela abertura da trinca medida com extensômetro no ensaio de K_{IC} da amostra da roda americana. No detalhe mostra-se a fractografia caracterizando micromecanismo de fratura por clivagem na região imediatamente a frente da trinca. Esta amostra resultou em K_{IC} de $46,7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

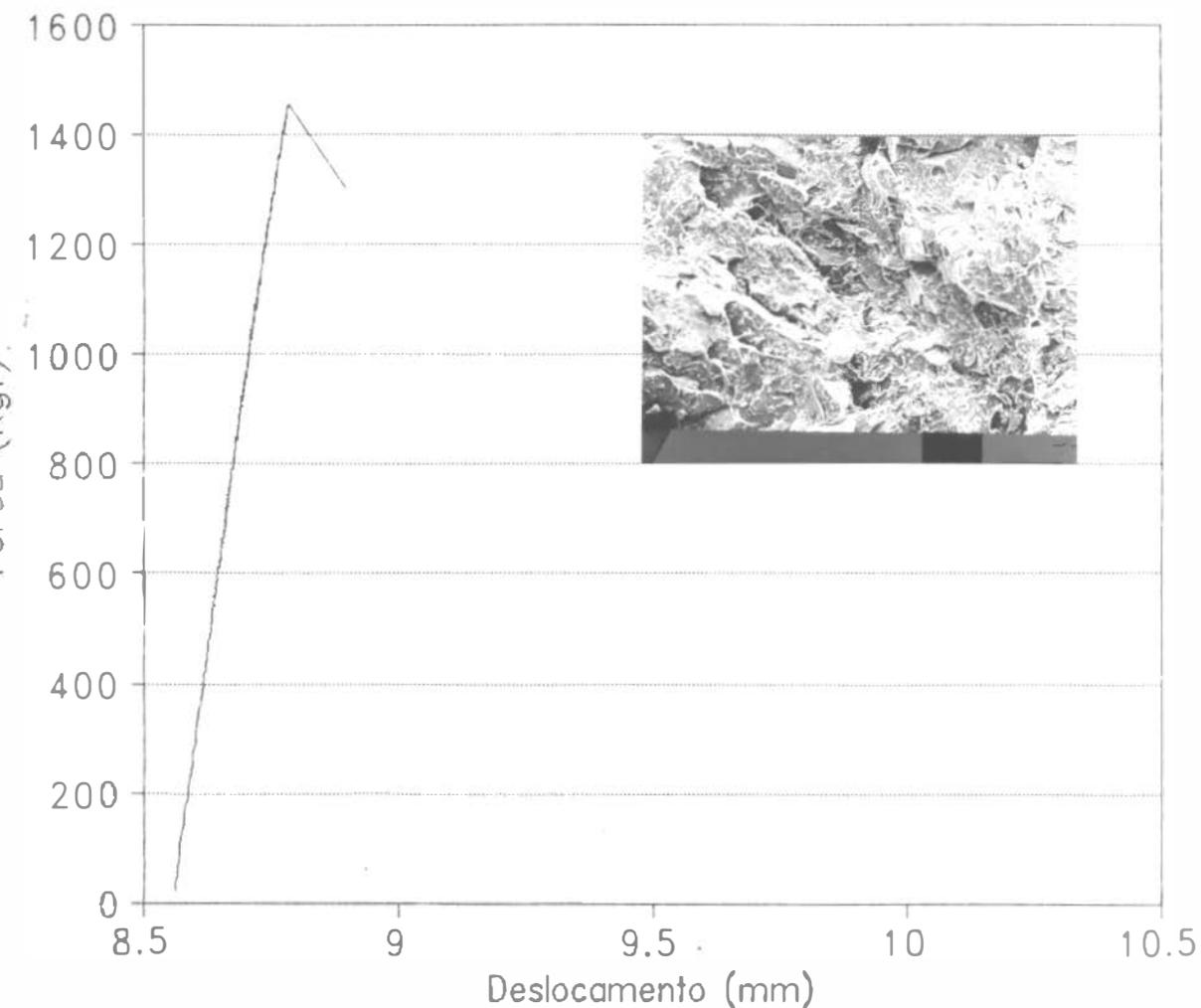


Fig. 53 - Registro da carga pela abertura da trinca medida com extensômetro no ensaio de K_{IC} da amostra da roda sueca. No detalhe mostra-se a fractografia caracterizando clivagem mais refinada em relação a amostra anterior, também na região a frente da trinca. Esta amostra resultou em K_{IC} de $64,8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados da análise química mostram concordância com os referentes à metalografia, pois o menor teor de carbono da roda sueca facilita a formação de rede de ferrita pró-eutetóide em contorno de grão, baixando, no entanto, um pouco a dureza do material. Porém, nota-se maiores teores de elementos de liga como Cr, Ni e Mo na roda sueca em relação a americana, o que compensa o menor endurecimento devido ao menor teor de carbono.

O surgimento de bainita superior na pista de rolamento da roda sueca também indica a influência desses elementos.

Quanto à macroestrutura, observa-se que a roda sueca é fundida, mostrando uma estrutura mais grosseira e dendritas maiores, enquanto a amostra americana apresenta características de estrutura forjada, caracterizada pela presença de estrutura alinhada na curvatura de ligação entre o aro e a alma (centro). A análise de inclusões realizada nas amostras centrais e no sentido circunferencial, mostram um maior número destas na roda sueca, sendo isso coerente com o processo de fundição, onde o líquido ao solidificar segrega as inclusões para o último metal líquido, ou seja, para o centro.

A homogeneidade e a queda lenta e gradual dos perfis de dureza, caracterizam em resfriamento controlado para ambas as amostras. Nota-se concordância com os resultados metalográficos, que apresentam microestrutura igualmente homogênea, com um leve aumento do espaçamento lamelar nas amostras centrais inferiores. Neste requisito (dureza) são bastante semelhantes, não sendo notado significativa diferença.

Os resultados metalográficos e da análise de inclusões, como já foi dito, apresentam coerência com a análise química,

com a macroestrutura e com os perfis de dureza. Ambas apresentam estrutura perlítica com fino espaçamento lamelar, porém a roda sueca, como já foi exposto, apresenta rede de ferrita em contorno de grão, menores quantidades de inclusões e mais globulizadas (larg./comp. - para a sueca maior que para americana). Isto caracteriza uma ligeira superioridade da roda sueca em termos de tenacidade à fratura, sendo importante ainda ressaltar a presença de bainita na pista de rolamento desta, que é uma estrutura que alia alta dureza, alta tenacidade e boa estabilidade térmica. O filme de fase dúctil (ferrita) em contorno de grão, dificulta a propagação da trinca, permitindo uma certa deformação plástica. As inclusões mais globulizadas, atuam no sentido de propiciar o mecanismo de fratura dúctil, ou seja, coalescência de microcavidades.

A roda americana apresentou menor espaçamento lamelar, o que é benéfico frente a tenacidade à fratura. No entanto, os outros fatores como rede de ferrita, menos inclusões e maior globulização destas são mais significativos.

Os resultados dos ensaios mecânicos das duas rodas revelaram alongamento levemente superior para a roda sueca, e limite de resistência superior para a roda americana. As fraturas do ensaio mostraram que a amostra sueca apresentou fratura predominantemente dúctil e presença de dimples, enquanto a concorrente americana apresentou fratura mista com grandes regiões apresentando fratura frágil (clivagem). Este resultado também concorda com os apresentados anteriormente.

Os resultados de tensões residuais apontaram para baixos níveis de tensões residuais para as duas amostras, o que é benéfico, porém na comparação entre as duas amostras percebe-se que a sueca possui tensões somente compressivas e de módulo um

pouco superior a americana, caracterizando certa superioridade da roda sueca. Os baixos valores de tensões residuais eram esperados pelo fato de se tratarem de rodas sem uso (novas). Este resultado servirá de subsídio para comparação com resultados de tensões realizados em rodas usadas, onde o nível de tensões residuais aumenta bastante devido a deformações plásticas ocorridas durante serviço.

Os resultados de tenacidade à fratura (K_{IC}), como era de se esperar com os resultados já apresentados, foram superiores na roda sueca. Esta conclusão é coerente frente aos outros já analisados. A amostra sueca apresentou características como rede de ferrita, menor número de inclusões, maior globulização destas e maior percentual de Ni que aumenta a tenacidade.

O diagrama de bloco apresentado na próxima página resume os ensaios realizados, sua correlação entre si (pelas setas) e os resultados obtidos, buscando de uma forma comparativa, analisá-los.

CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios realizados nas duas amostras de rodas ferroviárias, uma de origem americana e outra de origem sueca, propiciam as seguintes conclusões:

- Há coerência entre os resultados dos ensaios em relação as observações microestruturais, desde o que se refere a estrutura até inclusões presentes.

- Todos os resultados, exceto o espaçamento lamelar, são mais favoráveis para o aumento da tenacidade à fratura na roda sueca, tais como: Menor teor de carbono e presença de Ni,

presença de rede de ferrita pró-eutetóide, menor número de inclusões e mais globulizadas, ocorrência de fratura mista no ensaio de tração, mostrando micromecanismo de fratura dúctil presente.

- A roda sueca apresenta maior tenacidade à fratura (K_{IC}) em relação a roda americana, como era de se esperar em função dos resultados dos ensaios realizados.

- A roda sueca possui maiores teores de elementos de liga, que resultaram em presença de estrutura bainítica junto a pista de rolamento, o que é benéfico, uma vez que a bainita é uma estrutura que alia grande dureza com alta tenacidade e estabilidade térmica.

- As características metalúrgicas analisadas dão superioridade a roda sueca em relação a americana.

- As tensões acumuladas durante o processo de fabricação das duas rodas é bastante baixo, conforme observado pelos resultados de tensões residuais, no entanto ainda apontam para uma certa superioridade da roda sueca, que apresenta tensões somente compressivas e levemente superiores as da roda americana.

SUECA

- Rede de Ferrita
- Menos Inclusões
- Mais Globulizad.
- T.G. - 8
- > Esp. Lamelar
- Perita fina
- Presença de Bala.

METALOGRAFIA E INCLUSÕES

AMERIC.

- S/ Rede de Ferr.
- Mais Inclusões
- Menos Globuliz.
- T.G. - 8
- < Esp. Lamelar
- Perita fina
- Sem Bala.

AN. QUÍMICAS

MACRO ATAQUE

PERFIS DE DUR.

ENS. MECÂNICOS

TEN. À FRAT.

SUECA	AMERIC.
C - 0,644	C - 0,736
Mn - 0,682	Mn - 0,750
Si - 0,364	Si - 0,296
S - 0,031	S - 0,065
P - 0,014	P - 0,021
Cu - 0,164	Cu - 0,150
Cr - 0,181	Cr - 0,101
Ni - 0,106	Ni - 0,072
Mo - 0,039	Mo - 0,016
V - 0,043	V - 0,006
Sn - 0,011	Sn - 0,008
Al - 0,004	Al - 0,010
Ti - 0,002	Ti - 0,021
< % C.	> % C.
+ lga.	- lga.

SUECA	AMERIC.
- Est. de fundição;	- Est. de Forjado;
- Dendritas + grossas.	- Dendritas menores;
	- Est. atirada.

SUECA	AMERIC.
- Perf. Homogeneo;	- Perf. Homogeneo;
- Queda gradual;	- Queda gradual;
- Dur. Perf. 331HV;	- Dur. Perf. 366HV;
- Dur. Núcleo 281HV.	- Dur. Núcleo 242HV.

SUECA	AMERIC.
- L. Rop. (MPa) 1094	- L. Rop. (MPa) 1050
- AL (%) 12,5	- AL (%) 13,7
- Red. Área (%) 30,2	- Red. Área (%) 34,5
- Frat. dúctil (Dimples)	- Frat. + frágil (Clivagem)

SUECA	AMERIC.
- K _{1c} (MPa $m^{1/2}$) 64,8	- K _{1c} (MPa $m^{1/2}$) 49,1

BIBLIOGRAFIA

- 1- AAR - Association of American Railroads - Mechanical Revision - Procedures for A.A.R - Standard S 601-79. March 1, 1980.
- 2- BRINA, H.L - Estradas de Ferro 2- cap.8 - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. - Rio de Janeiro - R.S. - 1982.-
- 3- GARCIA, L. ; José Maria - Tratado de Exploration de Ferro Carriles - Cap. 2 - Madri 1947.
- 4- ROLAND, J.R. ; Bowles, C.Q. - Comparison of the Fracture Behavior of Conventional Class U Railway Wheels and an Experimental Alloy Wheel - American Society for Testing and Materials - 1992.
- 5- CATOT, B. ; Demilly F. - Contribution to Improved Steel Grades for Wheels for Heavy Freight Traffic - International Wheelset Congress. Sidney - Austrália - 27 September - 1 October 1992.
- 6- OLIVEIRA, E. Q. ; Romão, L.W.E. ; Tavares, R.I. - Desenvolvimento da Tecnologia de Tratamento Térmico por Indução de Trilhos na CSN - I Encontro de Tecnologia e Utilização dos Aços Nacionais - Outubro - 1992.
- 7- SAWLEY, K.J ; Beyon, J.A. ; Jones, E.G. - Bainita Steels for Railway Weels - British Railways Board Research Division.

8- MOYAR, G.L. ; Hawthorne, K.L. ; Belpert, S.M. ; Rejkumor, B.R. ; Stone, D.H. - Theoretical and Experimental Study of Wheel Spolling In Heavy Houl Hopper Cars - International Wheelset Comgress - Sydney Austrália - 27 September - 1 October 1992.

9- DIETER, G.E. - Metalurgia Mecânica - Cap. 12 e 15 - Editora Guanabara Dois S.A. - Segunda Edição - Rio de Janeiro - R.J. - 1981.

10- HOGER, O.J. - Residual Stress - Metals Engineering Design - ASME Handbook - Cap. 4 - 1953.

11- PROCTER, E. - Residual Stress and Their Effect - Cap. 7 - Measurement of Residual Stresses - The Welding Institute - 1981.

12- HILL, R.E.R. - Princípios de Metalurgia Física - Cap. 19 - Editora Guanabara Dois S.A. - Rio de Janeiro - R.J.- 1982.

13- STROHAECKER, T.R. - Mecânica da Fratura - Mecânica da Fratura Linear Elástica - 1991.