

# ANÁLISE DE PROPRIEDADES E MECÂNICA DA FRATURA DE RODAS FERROVIÁRIAS MICROLIGADAS FUNDIDAS E FORJADAS\*

Isaias Moreira de Freitas<sup>1</sup>  
Estéfano Aparecido Vieira<sup>2</sup>  
Domingos José Minicucci<sup>3</sup>

## Resumo

Componentes de alto custo como rodas ferroviárias estão em pleno desenvolvimento a fim de aumentar o desempenho em operação. Para isso, diversos materiais microligados têm sido testados para obter melhores propriedades mecânicas e metalúrgicas. Esses materiais estão fortemente sujeitos a fraturas devido às solicitações térmicas e mecânicas durante o trabalho. Muitas dessas fraturas frágeis são ocasionadas por propagação de trinca, impacto, fadiga ou alguma falha metalúrgica. Essas fraturas e riscos operacionais vêm aumentando gradativamente com as maiores cargas transportadas. Portanto, novos materiais e processos produtivos devem ser exaustivamente testados a fim de garantir alto desempenho e confiabilidade. O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades dos materiais atuais e de diferentes composições de aços microligados de rodas ferroviárias de vagões, fabricadas pelos processos de fundição e forjamento. As amostras foram submetidas a ensaios metalográficos, mecânicos e de tenacidade à fratura. Foram avaliadas rodas convencionais, microligadas ao vanádio e microligadas ao nióbio. Nas rodas forjada e fundida, foram observadas propriedades de tração e dureza similares, e superioridade para o microligado em relação ao aço convencional. As rodas forjadas apresentaram melhor resistência ao impacto e a tenacidade a fratura, destacando-se a microligada ao nióbio.

**Palavras-chave:** Rodas ferroviárias; Processos de fabricação; Aço microligado; Alto desempenho.

## ANALYSIS OF PROPERTIES AND FRACTURE MECHANICS OF RAILWAY WHEELS MICROALLOYED OF FORGING AND CASTING PROCESSES

### Abstract

High cost components such as railway wheels are being developed to increase the performance in operation. For this, various materials have been tested micro-alloyed for improved mechanical and metallurgical properties. These materials are strongly subject to fractures due to thermal and mechanical stress at work. Many of these fragile fractures are caused by fatigue or some metallurgical failure. These fractures and operational risks are increasing gradually with the largest cargo transported. Therefore, new materials and production processes must be thoroughly tested to ensure high performance and reliability of the components. The objective of this study is to evaluate the results of the properties of different compositions of microalloyed steel railway wheels of cars manufactured by different processes. The micro-alloy steels were developed and tested by manufacturers of casting and forging processes. The samples were subjected to mechanical testing and fracture mechanics. Were compared to conventional wheels microligadas the vanadium and niobium microligadas. In forged and cast wheels, tensile properties were observed and similar hardness, and superiority to the microalloyed compared to conventional steel. Forged wheels showed better impact resistance and fracture toughness, highlighting the microligada the niobium.

**Keywords:** Railway wheels; Manufacturing processes; Microalloyed steel; High performance.

<sup>1</sup> Engenheiro de Desenvolvimento na área de Material Rodante da Empresa VALE, em Vitória-ES, e Mestrando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Instituto Federal do Espírito Santo, em Vitória, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Doutor, Professor do Departamento de Metalurgia e Materiais Instituto Federal do Espírito Santo Vitória, ES, Brasil.

<sup>3</sup> Mestre, Gerente de Desenvolvimento da MWL Brasil, em Caçapava-SP, Brasil.

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas na integridade de componentes mecânicos é a possibilidade de ocorrência de uma fratura frágil inesperada e repentina, mesmo quando o componente é submetido a condições normais de operação. Componentes ferroviários como rodas e trilhos estão fortemente sujeitos a essas fraturas devido às solicitações térmicas e mecânicas. Muitas dessas fraturas frágeis são ocasionadas por fadiga e outras são associadas a algum tipo de falha metalúrgica ou devido alguma descontinuidade geométrica [1]. Essas fraturas vêm aumentando gradativamente com as maiores cargas transportadas.

Entre os anos de 2008 a 2013, ocorreram pelo menos 40 falhas em rodas ferroviárias de vagões durante a operação de trens de uma grande ferrovia no Brasil, gerando descarrilamentos e até tombamentos de trens. As investigações demonstraram falhas prematuras em rodas ferroviárias ocasionadas por trincas térmicas e mecânicas, inclusões ou vazios. Um exemplo de falha predominante é o *shattered rim*, um tipo de trinca que se desenvolve na região sub superficial paralela a superfície da pista de rolamento, podendo ser influenciado pelo tipo de material, grau de micro limpeza do aço, propriedades mecânicas e metalúrgicas, entre outros. Atualmente há uma migração das rodas convencionais para uma nova geração de rodas denominadas microligadas. O aço da roda possui micro adições, em geral menor que 0,15% em massa, de elementos de liga que melhoram significativamente as propriedades mecânicas, resistência ao desgaste e temperabilidade do material. Os elementos de liga mais comuns nos aços microligados são, dentre outros: vanádio, nióbio e titânio [2].

A micro adição de elementos de liga melhora as propriedades em fadiga dos aços. Esta superioridade se deve a efeitos micro estruturais como redução do tamanho de grão, o que conseqüentemente dificulta a propagação da trinca, e o aumento na fração de ferrita, que aumenta a tenacidade e ductilidade do material, aumentando assim a resistência à fadiga do mesmo. Este comportamento melhorado em aços modificados por micro-adição de elementos de liga foi observado nos trabalhos de Robles Hernández [3], Najafi, Rassizadehghani e Norouzi [4], Hajisafari, M. e Nategh, S. [5] e Oliveira [6]. Também foi verificada uma diminuição no tamanho de grão austenítico devido à micro adição de Nióbio e Molibdênio, o que segundo Das [7] aumenta a tenacidade à fratura do material já que quanto menor o tamanho de grão maior a dificuldade da trinca se propagar.

Sabe-se que além do material, o tipo de processo de fabricação também é importante. Cada tipo de processo de fabricação confere as rodas diferentes propriedades que irão influenciar em seu desempenho em operação. Esta pode variar conforme as condições da ferrovia, bem como da roda, em relação a sua resistência mecânica, ao desgaste e ao impacto. Chen [8] e Pyttel [9] concluíram em seus trabalhos que nos aços fundidos as trincas geralmente são originárias de defeitos internos provenientes do processo de fabricação e que funcionam como concentradores de tensão e conseqüentemente tem mais chance de nucleação de trincas de fadiga. As comparações entre rodas fundidas e forjadas são inevitáveis, dado o desempenho que cada uma apresenta, e uma vez que o custo para aquisição desse componente na ferrovia é altíssimo. A roda pode representar até 50% do custo de manutenção dos vagões.

Os componentes a serem tratados nessa pesquisa são rodas ferroviárias de vagões de cargas. O material utilizado atualmente para rodas é a convencional classe C. As rodas em desenvolvimento são rodas com micro adição de cromo e molibdênio,

vanádio e nióbio, sendo todos eles fabricados pelos diferentes processos de fundição ou forjamento.

A avaliação de uma roda ferroviária é feita em laboratório, passando principalmente pela caracterização do micro mecanismo de fratura e avaliação das propriedades mecânicas. As propriedades mecânicas básicas (limites de escoamento e resistência à tração), a tenacidade à fratura e as propriedades de fadiga são imprescindíveis para o projeto de rodas ferroviárias.

O objetivo deste trabalho é avaliar os resultados das propriedades de diferentes composições de aços microligados de rodas ferroviárias de vagões, fabricadas por diferentes processos. Os aços microligados foram desenvolvidos e testados por fabricantes dos processos de Fundição e de Forjamento. As amostras foram submetidas a ensaios mecânicos e de mecânica da fratura. Foram comparadas rodas convencionais, microligadas ao vanádio e microligadas ao nióbio.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A seleção das rodas ferroviárias foi feita no lote de produção dos fornecedores. Importante ressaltar que a escolha das rodas consistiu em rodas de mesmas características e aplicação conforme classificação da norma AAR. Para o processo de fundição a empresa Amsted Maxion forneceu as amostras, já a empresa MWL forneceu as rodas forjadas.

### 2.1. Materiais

Neste trabalho foram utilizadas 6 rodas ferroviárias de diferentes tipos de aço ao carbono e/ou microligado com diâmetro de 33 polegadas que atendem a norma AAR M-107/M-208, ficando a configuração das amostras da seguinte forma:

- roda fundida convencional classe C.
- roda fundida microligada ao vanádio.
- roda fundida microligada ao nióbio.
- roda forjada convencional classe C.
- roda forjada microligada ao vanádio.
- roda forjada microligada ao nióbio.

As rodas foram fabricadas em aço fundido e forjado com basicamente 0,7% de carbono, sendo que as rodas as microligadas contém micro adição de cromo, molibdênio, vanádio e nióbio. O resultado da composição química típica está na

Tabela 1, e estão de acordo com os limites estabelecidos pela norma AAR M-107/M-208.

Tabela 1 – Composição química típica de rodas ferroviárias (AAR M-107/M-208)

Elementos	Composição %			
	Classe L	Classe A	Classe B	Classe C
Carbono	0,47 máx.	0,47 - 0,57	0,57 - 0,67	0,67 - 0,77
Manganês	0,6 - 0,9	0,60 - 0,90	0,60 - 0,90	0,60 - 0,90
Fósforo	0,030 máx	0,030 máx	0,030 máx	0,030 máx
Enxofre	0,005 - 0,040	0,005 - 0,040	0,005 - 0,040	0,005 - 0,040
Silício	0,15 - 1,00	0,15 - 1,00	0,15 - 1,00	0,15 - 1,00
<b>Elementos residuais</b>				
Níquel	0,25 máx *	0,25 máx *	0,25 máx *	0,25 máx *
Cromo	0,25 máx *	0,25 máx *	0,25 máx *	0,25 máx *
Molibdênio	0,10 máx *	0,10 máx *	0,10 máx *	0,10 máx *
Vanádio	0,040 máx *	0,040 máx *	0,040 máx *	0,040 máx *
Cobre	0,35 máx	0,35 máx	0,35 máx	0,35 máx
Alumínio	0,060 máx	0,060 máx	0,060 máx	0,060 máx
Titânio	0,03 máx	0,03 máx	0,03 máx	0,03 máx
Nióbio	0,05 máx	0,05 máx	0,05 máx	0,05 máx

\* Se o fabricante escolher variar a partir dos limites acima referidos para níquel, cromo, molibdênio e vanádio, a seguinte fórmula foi satisfeita:

$$930 - [570 \times \% \text{ carbono}] - [80 \times \% \text{ manganês}] - 20 [x \% \text{ silício}] - [50 \times \% \text{ cromo}] - [30 \times \% \text{ níquel}] - [20 \times \text{molibdênio} + \text{vanádio}] > 390$$

Os corpos de prova foram retirados da região do aro da roda, por se tratar do local de maior solicitação mecânica e térmica.

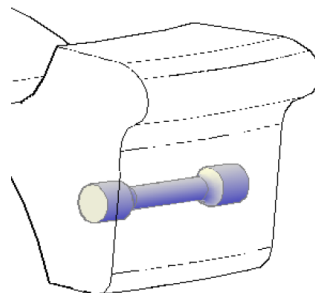


Figura 1 - Identificação das regiões na roda ferroviária

## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Procedimentos Experimentais

A análise das propriedades mecânicas e do micro mecanismo de fratura dos corpos-de-prova usinados de rodas ferroviárias fundidas e forjadas foi realizada conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2** – Ensaios e quantidade de corpos-de-prova (usinados de rodas ferroviárias fundidas e forjadas)

Descrição dos ensaios	Quantidades de amostras
Análise química	1
Análise metalográfica MO	3
Ensaio de dureza	2
Ensaio de tração	2
Ensaio de impacto Charpy	3
Ensaio de tenacidade à fratura	3
Microscopia eletrônica de varredura	2

### 2.2.2. Ensaio de composição química

Uma análise de cada material de aço feita pelo fabricante para determinar a porcentagem dos elementos especificados. Esta análise é feita em uma amostra de teste tirada durante o vazamento do aço. A composição química deve estar em conformidade com os requisitos especificados.

### 2.2.3. Ensaio Metalográficos

Os ensaios metalográficos foram realizados no IFES – Instituto federal do Espírito Santo. As fotos das microestruturas foram feitas no Laboratório da Engenharia de Materiais com um microscópio ótico (MO). As amostras foram lixadas, polidas e atacadas com Nital 3% por 10 segundos.

### 2.2.4. Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados conforme norma AAR. A figura 2 mostra os modelos de CP's usados nos ensaios mecânicos.



**Figura 2** – CP's usados nos ensaios mecânicos

### 2.2.5 Macro dureza

Os ensaios de dureza foram realizados seguindo a norma ASTM A-370 (ASTM, 2009). Para a macro dureza foi usada uma máquina de dureza Wilson 3000 kgf, esfera de Ø 10 mm, escala em Brinell. As amostras de dureza foram retiradas da própria roda.

### 2.2.6 Ensaio de tração

O ensaio foi feito em uma máquina de tração LOS modelo UHP com capacidade de 40 toneladas e corpos de prova com diâmetro de 10 mm.

### 2.2.7 Ensaio de impacto

Os ensaios de impacto foram realizados com corpos-de-prova do tipo Charpy com entalhe em “U” e usinados da seção plana paralela aos aros das rodas. O ensaio é realizado de acordo com as recomendações específicas das normas ASTM E - 23 e ASTM A 370 (ASTM E – 23, 2007; ASTM A 370-11, 2011).

### 2.2.8 Tenacidade à fratura

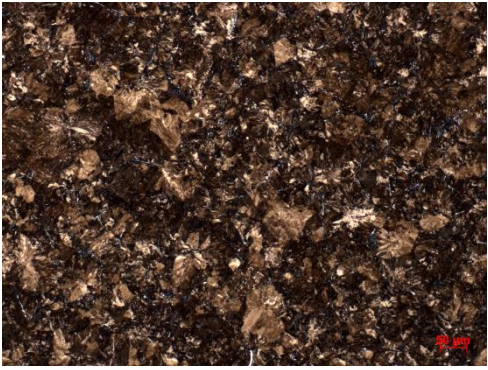
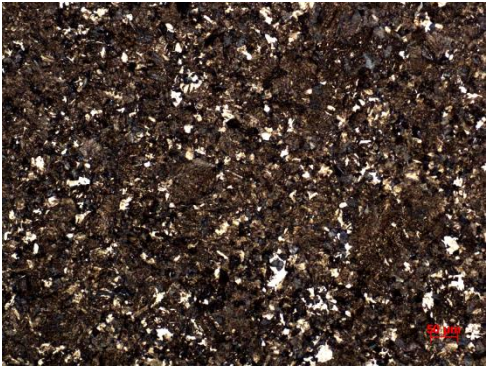
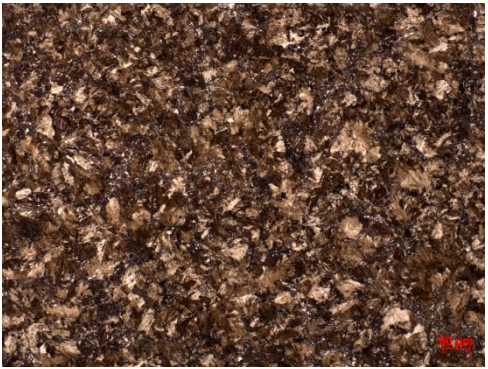
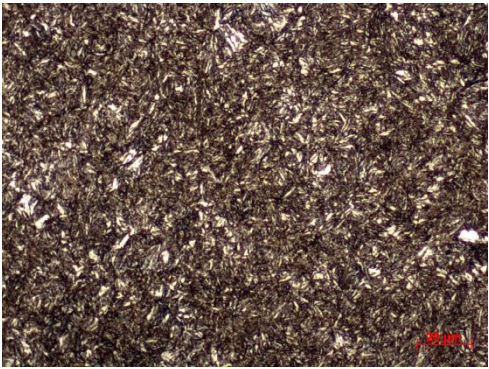
Nos ensaios de tenacidade à fratura, os corpos-de-prova foram usinados da seção longitudinal dos aros perpendicular à pista de rolamento das rodas. Nesse ensaio foram utilizados três corpos-de-prova por cada tipo de roda, previamente confeccionados com uma pré-trinca obtida por fadiga de acordo com as normas técnicas ASTM E 399. A máquina utilizada foi uma MTS do tipo servo-hidráulica com capacidade de carga de 10 toneladas.

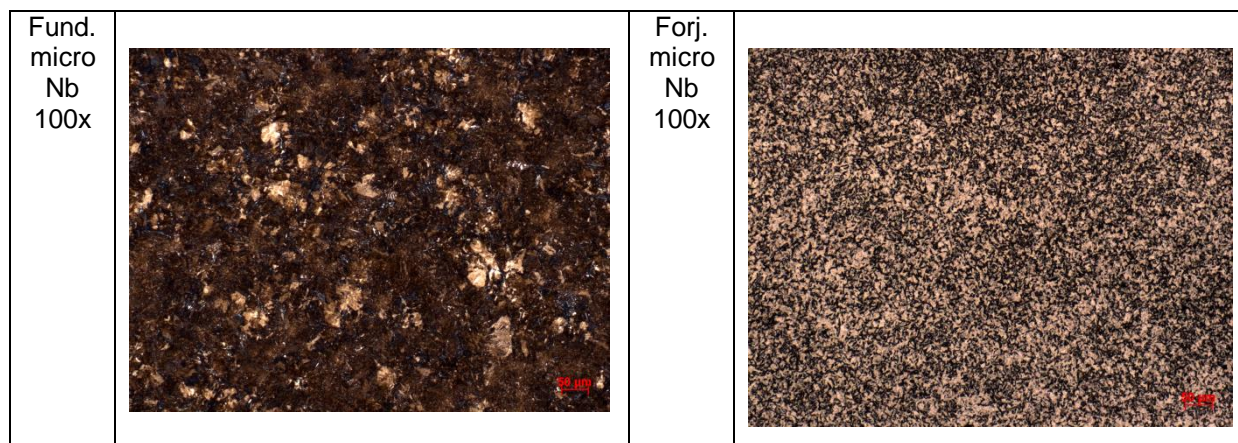
## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Resultados da Microestrutura no MO

Os resultados apresentados na tabela 3 foram retirados da cabeça dos CP's de tração.

Tabela 3 – Microestrutura típica das rodas

Fund. classe C 100x		Forj. classe C 100x	
Fund. micro V 100x		Forj. micro V 100x	



Para os resultados acima:

- As microestruturas apresentaram-se semelhantes entre rodas fundidas e forjadas, resultando em perlita fina e ferrita no contorno de grão.
- A microestruturas das rodas microligadas ficaram mais refinadas apresentando grão austenítico menor e com espaço interlamelar reduzido, contribuindo para a melhora das propriedades mecânicas.

### 3.2. Resultados de superfícies de fraturas de K1c no MEV

Os resultados apresentados nas figuras 3, 4 e 5 foram retirados das regiões cisalhadas de CP's ensaiados em K1c. As fractografias foram realizadas no Ifes – Instituto Federal do Espírito Santo. Os resultados apresentaram regiões de clivagem típicas de aço de alta resistência mecânica. Nos aços microligados esses planos cristalinos se destacam.

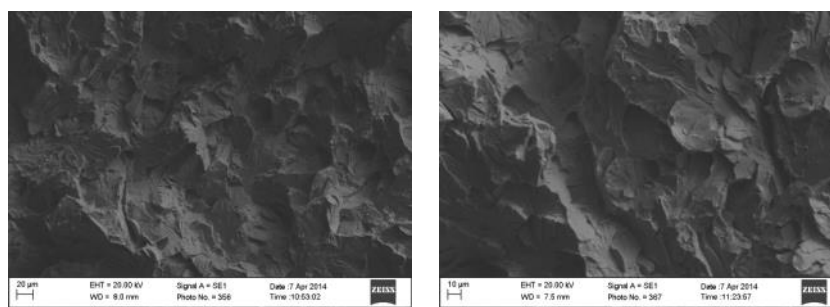


Figura 3: Aspecto das facetas de clivagem da roda forjada classe C

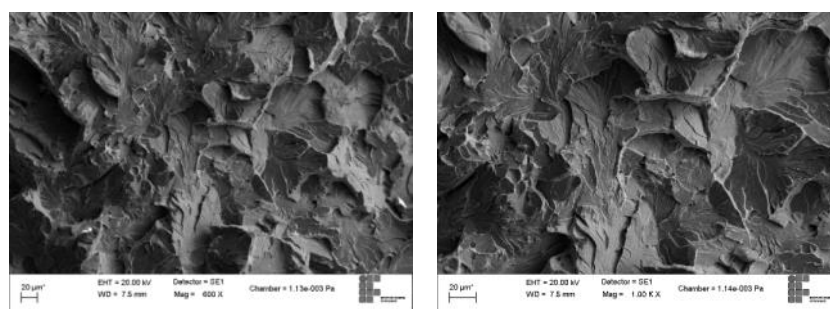


Figura 4: Aspecto das facetas de clivagem da roda fundida classe C



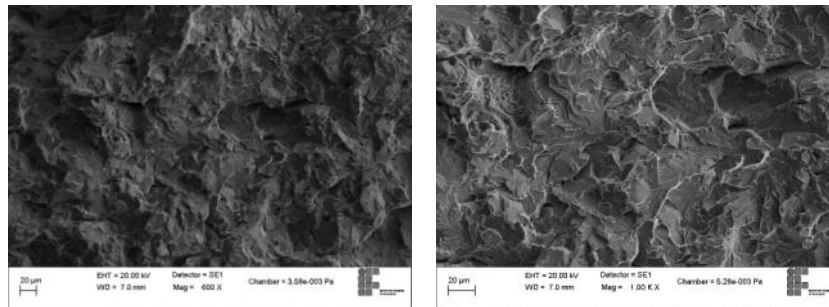


Figura 5: Aspecto das facetas de clivagem da roda forjada microligada ao vanádio

### 3.3. Resultados dos Ensaios Mecânicos e Tenacidade a Fratura

Na tabela 4 foram apresentados de forma resumida todos os resultados dos ensaios mecânicos e mecânica da fratura.

Tabela 4 - Resultados das amostras avaliadas

Amostras	LE (N/mm <sup>2</sup> )	LR (N/mm <sup>2</sup> )	CH (J)	AL (%)	RA (%)	Dureza (HB)	K1c (ksi $\sqrt{\text{in}}$ )
1º - forjada classe C	844,7	1222,1	10,0	11,2	30,0	351,0	43,3
2º - forjada micro V	882,5	1269,1	11,0	12,5	39,9	363,0	46,9
3º - forjada micro Nb	903,5	1161,7	15,2	15,2	40,7	402,0	70,0
4º - fundida classe C	757,7	1140,7	7,0	9,7	19,5	332,0	43,9
5º - fundida micro V	852,5	1174,2	7,7	8,0	10,3	387,0	40,7
6º - fundida micro Nb	849,6	1226,6	5,7	9,2	8,8	415,0	40,7

Abaixo na figura 6 podemos observar as curvas dos resultados.

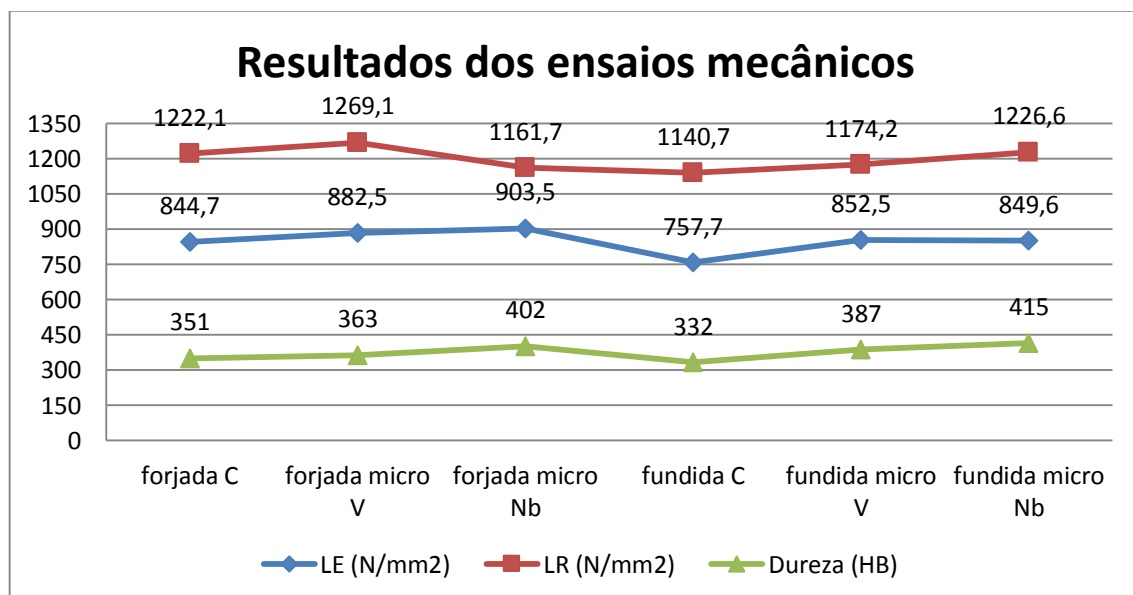


Figura 6 - Resultados de limite de escoamento, limite de resistência e dureza

- Rodas convencionais classe C: quando comparadas forjada e fundida, verificou-se que as rodas forjadas apresentam melhores propriedades de tração e dureza, característico do processo de forjamento.
- Rodas microligadas: Os resultados dos ensaios de tração possuem certa similaridade entre os materiais. A adição de micro liga aumenta o limite de

escoamento das rodas consideravelmente, sendo que na forjada o ganho chegou a 6%, e na fundida em 12%. Destaca-se o limite de escoamento que se mostrou maior para o microligado ao nióbio forjado, sem a redução de ductilidade no ensaio.

- Em relação às durezas do material, foram atingidos altos valores com a adição de micro liga. Isso se deve ao fato de formarem carbonetos altamente resistentes com pequenas adições. Para a fundida o vanádio teve resultados similares, porem na forjada o nióbio se mostrou melhor.

- O material fundido apresentou valores máximos de 7 J de energia absorvida. Quando se comparam ao forjado convencional e o forjado microligado, os mesmos apresentam-se acima de 12J, conforme esperado. A forjada microligada ao nióbio foi a única que apresentou energia absorvida acima de 15J, conforme a norma estabelece. Dessa forma, demonstra ótima resistência ao impacto.

Abaixo na figura 7 podemos observar as curvas dos resultados.

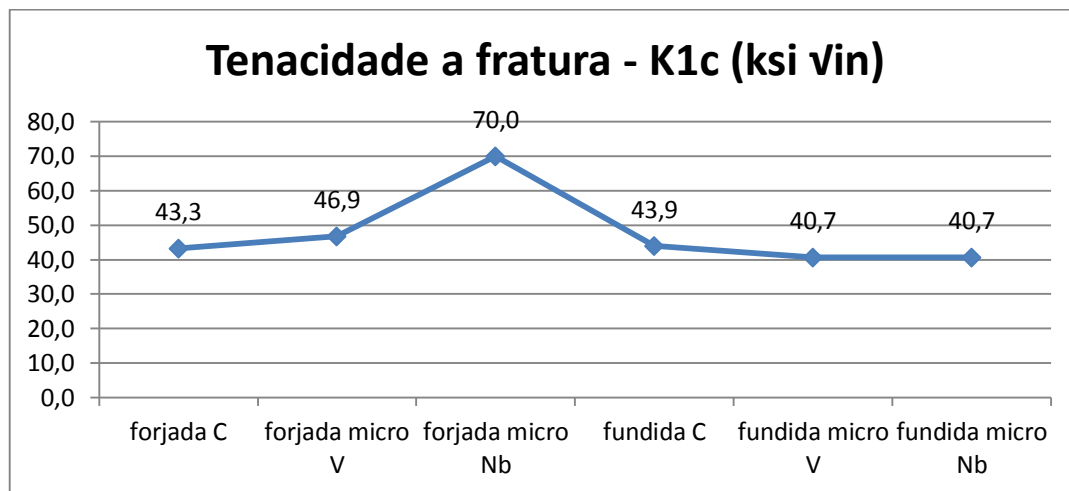


Figura 7 - Resultados de tenacidade a fratura

- Os valores de tenacidade à fratura obtida na roda fundida reduziram com a adição de micro ligas, porem na forjada, esse comportamento é diferente. Para as rodas microligadas esses valores de K1c aumentam significativamente. Destaca-se o resultado da roda ao nióbio com valor superior a 70 K1c (ksi √in). Ou seja, a resistência a propagação da trinca desse material é superior em aproximadamente 75%. Essa característica é favorecida para as rodas forjadas, pois para solubilização do nióbio é necessário altas temperaturas e conformação mecânica.

#### 4. CONCLUSÃO

A roda microligada se mostrou melhor que a convencional com as análises realizadas. Isto se deve à capacidade dos elementos de micro liga em melhorar as propriedades dos materiais. A microestrutura apresentada favorece para melhores propriedades mecânicas. Com as rodas microligadas é possível alcançar altos níveis de resistência mecânica e tenacidade podendo gerar ganhos significativos em operação. Destaca-se o microligado forjado, pois valores de tenacidade à fratura e limite de escoamento foram superiores as demais.

## REFERÊNCIAS

- 1 Ferreira, I. Propriedades Mecânicas dos Materiais e Mecanismos de Fratura- parte B. Campinas: FEM, UNICAMP, 2009.
- 2 Cummings 1, S.; Read, D. Analysis of wheel tread damage through the use of inspections and instrumented wheelsets. In: Proc. of International Wheelset Congress, n.16, 2010, Cidade do Cabo. 11p.
- 3 Robles Hernández, F. C.; Cummings, S.; Kalay, S.; Stone, D. Properties and microstructure of high performance wheels. *Wear*, v. 271, n. 1-2, p. 374–381, 2011.
- 4 Najafi, H.; Rassizadehghani, J.; Norouzi, S. Mechanical properties of as-cast microalloyed steels produced via investment casting. *Materials & Design*, v. 32, n. 2, p. 656–663, 2011.
- 5 Hajisafari, M.; Nategh, S.; Yoozbashizadeh, H.; Ekrami, A. Improvement in Mechanical Properties of Microalloyed Steel 30MSV6 by a Precipitation Hardening Process. *Journal of Iron and Steel Research, International*, v. 20, n. 5, p. 66–73, 2013.
- 6 Oliveira, L. G. ; Guimaraes, V. A. ; Pesci, P. G. S. . Comportamento em fadiga de aço microligado para rodas ferroviárias. In: CBECIMAT, 2012, Joinville. 20º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2012. v. 1. p. 8971-8978.
- 7 Das, S.K.; Sivaprasad, S.; Das, S.; Chatterjee, S.; Tarafder, S. The effect of variation of microstructure on fracture mechanics parameters of HSLA-100 steel. *Material Science & Engineering A*, v.431, issues 1-2, p.68-79, Sept. 2006.
- 8 Chen, B.; Zhao, Y.; Yang, B. Scale-induced effects on fatigue properties of a cast steel for bogie frames of China railway rolling wagons. *International Journal of Fatigue*, v. 35, n. 1, p. 45–55, 2012.
- 9 Pyttel, B.; Brunner, I.; Schwerdt, D.; Berger, C. Influence of defects on fatigue strength and failure mechanisms in the VHCF-region for quenched and tempered steel and nodular cast iron. *International Journal of Fatigue*, v. 41, n. 2012, p. 107–118, 2012.