

ESTUDO DA TREFILABILIDADE DE FIOS DE AÇO BIFÁSICO DE EXTRA-BAIXO CARBONO⁽¹⁾

Almir Gonçalves Vieira⁽²⁾

Paulo Roberto Cetlin⁽³⁾

Carlos A. Bottrel Coutinho⁽⁴⁾

Sumário

Amostras de fio de aço 0,05%C-1,35%Mn-0,03%Si foram submetidas a recozimento intercrítico. Após o tempo de encharque foram temperadas em uma mistura de água, sal e gelo para produzir uma microestrutura bifásica constituída por ferrita e martensita. Algumas amostras bifásicas foram submetidas a vários passes de trefilação em laboratório, com redução por passe de aproximadamente 20%, chegando a uma redução total de 86%. Todas as amostras suportaram a redução imposta sem se romperem. Foram determinadas as propriedades mecânicas sob tração após o recozimento intercrítico e após todos os passes de trefilação, medindo-se os limites de escoamento e de resistência, os alongamentos uniforme e total e a estricção. Analisaram-se as superfícies de fratura após o rompimento sob tração, podendo-se constatar que exibem um caráter basicamente dúctil.

(1) Contribuição Técnica a ser apresentada no I Seminário de Trefilação de Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não-Ferrosos. São Paulo-SP, 18-19 novembro 1993.

(2) Físico, M.Sc., doutorando do D.E. Met. da EE-UFMG,

(3) Engenheiro Mecânico, Dr., Professor Titular do D.E. Met. da EE-UFMG,

(4) Engenheiro Mecânico, Ph.D., Professor Emérito do D.E. Met. da EE-UFMG.

1 - INTRODUÇÃO

A microestrutura dos aços bifásicos se caracteriza por ilhas de martensita isotropicamente dispersas em uma matriz ferrítica⁽⁰¹⁾. Chapas de aço bifásico C-Mn-Si apresentam excelentes propriedades mecânicas, tais como baixo limite de escoamento, boa ductilidade, baixa anisotropia planar, alta taxa de encruamento e alto limite de resistência à tração⁽⁰²⁾. A primeira geração destes aços era produzida a partir de chapas de aço com estrutura composta por ferrita e perlita submetidas a aquecimento intercrítico, seguido de têmpera para transformar a austenita em martensita⁽⁰¹⁾.

A alta taxa de encruamento e excelente conformabilidade tornam os aços bifásicos atraentes para a produção de fios de aço de alta resistência através do processo de passes múltiplos de trefilação. Entretanto, é necessário que a microestrutura do aço bifásico tenha uma excelente combinação de resistência mecânica e conformabilidade⁽⁰³⁾. Um fator que reduz a trefilabilidade e ductilidade é a formação de martensita com morfologia de placa, por isso o teor de carbono na martensita deve ser inferior a 0,4%⁽⁰⁴⁾. Atualmente, tem-se tentado aumentar a trefilabilidade destes aços através de processos termomecânicos, os quais levam à obtenção de uma microestrutura constituída por fibras de martensita com morfologia de ripas em uma matriz ferrítica de pequeno tamanho de grão⁽⁰³⁾. Para se obter esta microestrutura Thomas e Ahn⁽⁰⁴⁾ sugerem um tratamento térmico duplo denominado "têmpera intermediária". Trabalhos realizados recentemente demonstram que amostras submetidas à "têmpera intermediária" apresentam limite de resistência à tração superior e melhor trefilabilidade do que amostras temperadas diretamente do campo intercrítico. Testes de torção e dobramento após severa deformação por trefilação a frio comprovam as boas propriedades dos fios de aços bifásicos de alta resistência⁽⁰⁵⁻⁰⁶⁾.

Um estudo metalográfico de um aço bifásico comercial submetido a ensaio de tração mostra que ocorre deformação plástica da martensita somente após o início da estrição⁽⁰⁸⁾. Para pequenas quantidades de deformação a frio, apenas a matriz ferrítica sofre deformação plástica. Ocorre deformação da martensita somente quando a trefilação se torna severa⁽⁰⁸⁾. Neste caso de trefilação severa, as células de deslocamentos da martensita se tornam alongadas e finas, enquanto que as células de deslocamentos da ferrita apresentam forma poligonal⁽⁰⁵⁾.

Em uma microestrutura bifásica, existe um gradiente de densidade de deslocações ao longo do grão ferrítico, sendo maior na região próxima à martensita e menor no interior da ferrita⁽⁰⁸⁾. Quando se aumenta a fração volumétrica de martensita, aumenta a taxa de encruamento e o limite de resistência à tração. Uma redução no tamanho médio das partículas de martensita tem um fraco efeito sobre o limite de resistência, mas aumenta acentuadamente a taxa de encruamento e o alongamento uniforme. Assim, a ductilidade de um aço bifásico de um certo nível limite de resistência pode ser aumentada através do refinamento de sua microestrutura⁽⁰⁹⁾.

Este trabalho teve como objetivo estudar a trefilabilidade de fios de aço bifásico de baixo carbono, no qual o valor esperado para a concentração de carbono na martensita é inferior a 0,4%.

2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado neste trabalho foi um fio máquina com diâmetro de 5,5 mm, que, após ser desempenado manualmente, foi cortado em amostras de 150 mm de comprimento. Sua composição química está mostrada na Tabela I. As amostras foram submetidas a recozimento no campo bifásico ferrita/austenita. Após o tempo de encharque de 10 minutos, foram temperadas em uma mistura de água, sal e gelo, cuja temperatura era de aproximadamente 0°C, para produzir uma microestrutura composta por ferrita e martensita. A Tabela II mostra as temperaturas intercríticas selecionadas e as respectivas frações volumétricas de martensita obtidas. O valor da concentração de carbono na martensita (austenita) é uma extrapolação do diagrama Fe-C. A microestrutura FMP é constituída por uma mistura de ferrita, martensita e perlita. Para produzi-la retardou-se a tempera, permitindo que parte da austenita se transformasse em perlita.

O ataque químico utilizado para revelar a microestrutura das amostras bifásicas foi uma solução de ácido picrico, nital e tiosulfato de sódio⁽⁰⁷⁾. O ataque produz na ferrita uma cor azul e a martensita apresenta-se amarela clara ou branca. A amostra FMP foi atacada com uma solução de nital 2%. Para determinar as frações volumétricas de martensita utilizou-se da técnica de contagem de pontos, sendo contados para cada amostra cerca de 2000 pontos.

Amostras bifásicas e do material como recebido (ferrita/perlita) foram submetidas a vários passes de trefilação com redução convencional de área de 20% por passe. A redução total de área foi de 86%. Foram realizados testes de tração em uma máquina MTS modelo 880-14 em corpos de prova do material como recebido e das amostras bifásicas, antes e depois da trefilação, com o objetivo de observar as variações das propriedades mecânicas com a trefilação. Com o auxílio de um extensômetro acoplado ao registrador da MTS, pôde-se registrar a curva de fluxo para cada amostra. As superfícies de fratura foram analisadas através de microscopia eletrônica de varredura.

3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Propriedades Mecânicas após Tratamento Térmico

A Tabela III fornece as propriedades mecânicas após o recozimento intercrítico. Como a fração volumétrica de martensita encontrada para a temperatura intercrítica de 760°C é apenas ligeiramente maior do que a de 740°C (Tabela II), isto explica a pequena diferença nos valores das propriedades mecânicas entre as amostras FM-1 e FM-2. As Figuras 01 a 03 mostram fotomicrografias das estruturas encontradas após recozimento intercrítico. Para a amostra FM-1 o ataque utilizado produziu na martensita uma cor branco e a ferrita ficou em um tom cinza escuro. Estas variações das cores dos microconstituintes deve-se ao fato de a composição química do aço em estudo estar no limite da aplicabilidade do ataque seletivo. Já para a amostra FM-2 a ferrita apresenta-se azul.

O comportamento do alongamento uniforme (ϵ_u) é semelhante ao do alongamento total (ϵ_T). As amostras bifásicas, como já era esperado, apresentam ϵ_u e ϵ_T inferiores aos do material como recebido. Observando as amostras FM-1 e FM-2, nota-se um aumento do alongamento uniforme e alongamento total com o aumento da fração volumétrica de martensita. Os valores de ϵ_u e ϵ_T para as amostras FMP são inferiores aos de FM-2, devido à introdução de perlita na microestrutura.

Para as amostras FM-1 e FM-2, observa-se um decréscimo do limite de escoamento com o aumento da fração volumétrica de martensita. A transformação da austenita em martensita gera

uma grande quantidade de deslocções livres na matriz ferrítica próximo à martensita. Estas deslocções facilitam o processo de escorregamento⁽¹⁰⁾. Quanto se eleva a temperatura intercrítica, aumenta a quantidade de martensita e, conseqüentemente, a quantidade de deslocções e deformação na ferrita⁽⁰⁵⁾.

O limite de resistência à tração comporta-se de acordo com a fração volumétrica de martensita. As amostras FM-2 apresenta maior σ_t devido à maior quantidade de martensita. Ocorre um decréscimo de σ_t para as amostras FMP devido a substituição de parte de martensita por perlita. Pode-se notar que todas as condições de tratamento térmico produzem valores para o limite de resistência à tração bem superiores ao do material como recebido (MCR).

O comportamento da estrição é inverso ao do alongamento uniforme. Quando se aumenta a quantidade de martensita, aumenta o alongamento uniforme, mas diminui-se a estrição. A condição de tratamento térmico FMP apresenta maior estrição devido à presença de perlita.

3.2 - Propriedades Mecânicas após Trefilação

Foram propostos nove passes de trefilação, o que correspondia a uma redução total de área de 86%. Todas as amostras suportaram o processo de trefilação sem se romperem, podendo afirmar, assim, que possuem boa trefilabilidade.

A Tabela IV apresenta as propriedades mecânicas após trefilação. Como as amostras foram bastante deformadas, o alongamento total para amostras do material como recebido (MCR) foi da ordem de 2%, enquanto que para as demais amostras foi inferior a 1%. Assim, optou-se por medir o limite de escoamento a uma deformação de 0,001.

Como já era esperado, o limite de escoamento e o limite de resistência à tração aumentaram consideravelmente com a trefilação. Quanto maior a fração volumétrica de martensita, mais elevados são os valores de σ_c e σ_t . A estrição do MCR após trefilação apresenta um bom valor (50,9%), enquanto que a estrição de FM-1, FM-2 e FMP estão em um nível mais baixo (30%).

A Figura 04 mostra uma fotomicrografia da estrutura da amostra FM-1 trefilada. A cor branca corresponde às partículas de martensita, enquanto que a ferrita tornou-se marrom claro. Pode-se notar que nem todas as partículas de martensita estão alinhadas na direção de trefilação, demonstrando sua pouca deformabilidade. A Figura 05 é uma fotomicrografia por MEV da mesma amostra FM-1, cuja ampliação é de 1500 vezes. Observa-se a formação de cavidades nos extremos das partículas de martensita devido à decoesão da interface ferrita/martensita.

3.3 - Análise das Superfícies de Fratura

Os resultados do trabalho realizado por Ray⁽¹¹⁾ mostram a presença de vários mecanismos de fratura durante a deformação em ensaio de tração de aços bifásicos, que podem atuar simultaneamente ou não. Estes mecanismos foram identificados como decoesão na interface ferrita/martensita, fratura das partículas grosseiras de martensita, formação de cavidades ao redor de partículas de inclusões e formação de trincas na matriz ferrítica em decorrência de altas tensões localizadas.

As Figuras de 06 a 10 são de superfícies de fratura após ensaio de tração, obtidas por microscopia eletrônica de varredura. Como pode ser visto na Figura 06, o material como recebido (MCR) apresenta dimples característicos de fratura dúctil. O mesmo pode-se dizer das amostras FM-1 (Figura 07) e FM-2 (Figura 08). Para as amostras trefiladas (Figuras 09 e 10) pode-se notar uma maior presença de regiões relativamente lisas nas vizinhanças de alguns dimples, e que podem estar associados à decoesão ferrita/martensita durante a trefilação.

4 - CONCLUSÕES

As amostras bifásicos apresentam limites de escoamento e resistência à tração superiores aos do material como recebido (ferrita/perlita). Entretanto, devido à introdução da martensita na microestrutura, os alongamentos uniforme e total e estrição são inferiores aos da estrutura ferrita/perlita.

Observou-se que um ligeiro aumento da fração volumétrica de martensita causa um aumento do limite de resistência à tração e dos alongamentos uniforme e total, além de uma redução do limite de escoamento. A amostra FM-2 apresenta as propriedades mecânicas mais marcantes do aço bifásico. A amostra multiconstituída (FMP) apresenta propriedades mecânicas inferiores às da amostra FM-2, mas a introdução de perlita na microestrutura melhora a estrição.

As amostras bifásicas apresentam boa trefilabilidade e boas propriedades mecânicas após trefilação.

A análise das superfícies de fratura indicam a ocorrência de fratura dúctil através da formação e coalescimento de poros.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira pela doação do material utilizado neste trabalho e do conjunto de feiras. Um dos autores (A.G.Vieira) agradece à CAPES a bolsa de doutorado concedida.

TABELA I: Composição química do aço em estudo

C	Mn	Si	P	S	Ac ₁ (°C)*	Ac ₃ (°C)*
0,05	1,35	0,03	0,014	0,012	710	866

* temperaturas estimadas pela fórmula de Andrews.

TABELA II: Temperaturas intercríticas utilizadas e frações volumétricas de martensita obtidas.

AMOSTRA	Temp Intercritica (°C)	Vm (%)	C _c ^r (%) **
FM-1	740	9,0 ± 0,4	0,40
FM-2	760	11,8 ± 0,4	0,31
FMP	760	11,0 ± 0,7 *	0,31

Vm : fração volumétrica de martensita

* mistura de perlita e martensita.

** valor estimado pelo diagrama Fe-C.

TABELA III: Propriedades mecânicas após aquecimento intercrítico.

AMOSTRA	ϵ_u (%)	ϵ_T (%)	$\sigma_{e,0,2}$ (MPa)	σ_1 (MPa)	R. A. (%)
MCR	16,1 ± 2,1	23,9 ± 1,8	287 ± 7	451 ± 9	75,9 ± 1,3
FM-1	5,8 ± 0,3	8,5 ± 1,4	480 ± 10	736 ± 24	63,0 ± 3,7
FM-2	9,6 ± 0,5	11,9 ± 1,5	454 ± 9	770 ± 11	57,9 ± 2,1
FMP	8,3 ± 0,8	9,9 ± 0,6	460 ± 2	722 ± 15	65,8 ± 3,0

R. A. : redução de área na estrição.

TABELA IV: Propriedades Mecânicas após trefilação

AMOSTRA	ϵ_T (%)	$\sigma_{e,0,1}$ (MPa)	σ_1 (MPa)	R. A. (%)
MCR	2,4 ± 0,8	760 ± 4	800 ± 4	50,9 ± 4,3
FM-1	< 1,0	1094 ± 5	1137 ± 14	35,9 ± 3,0
FM-2	< 1,0	1148 ± 12	1173 ± 9	29,0 ± 3,1
FMP	< 1,0	1128 ± 7	1156 ± 7	32,2 ± 2,7

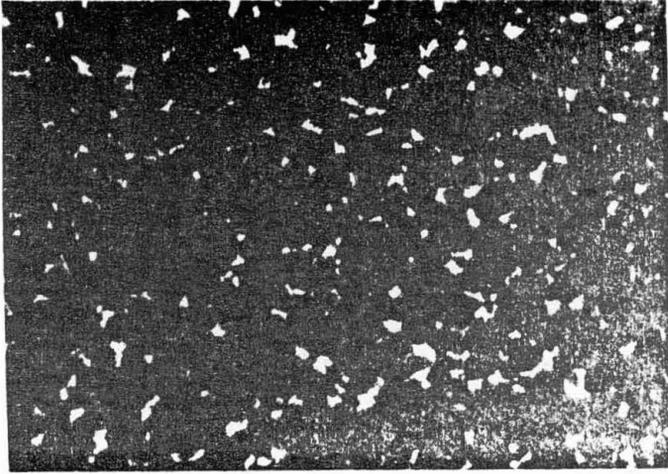


FIGURA 01: Fotomicrografia de uma amostra FM-1. Aumento: 200 vezes.

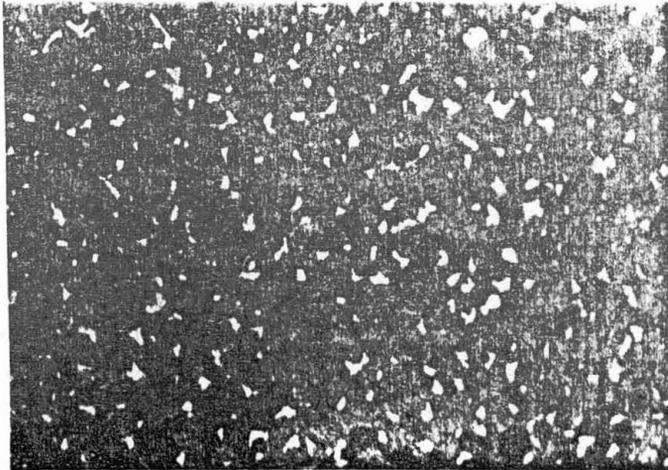


FIGURA 02: Fotomicrografia de uma amostra FM-2. Aumento: 200 vezes.

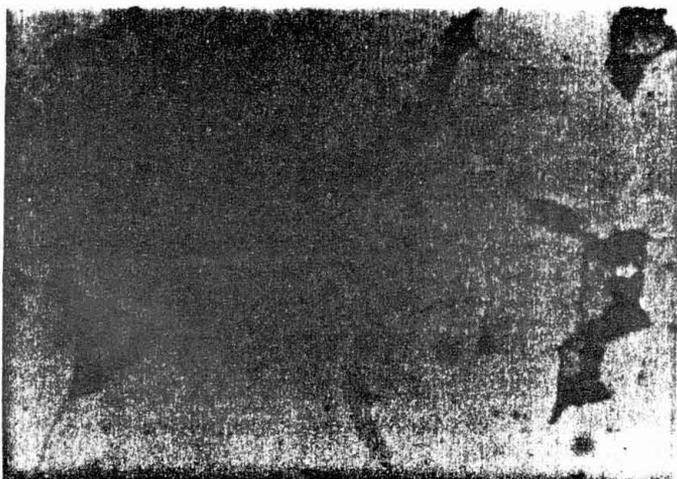


FIGURA 03: Fotomicrografia de uma amostra FMP. Aumento: 1250 vezes.

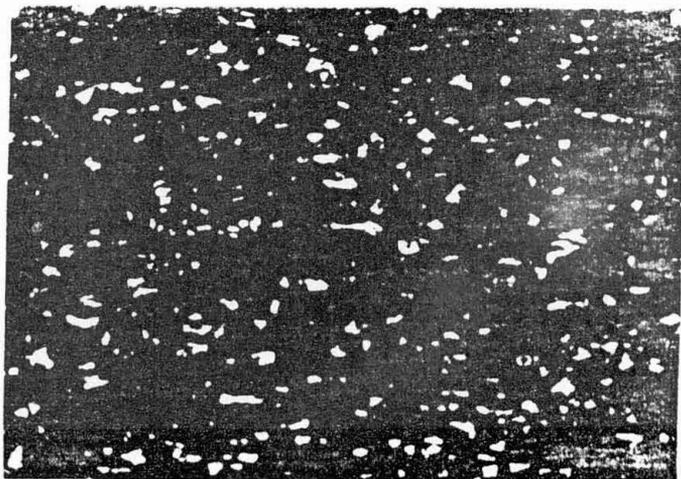


FIGURA 04: Fotomicrografia de uma amostra FM-I trefilada. Aumento: 200 vezes.

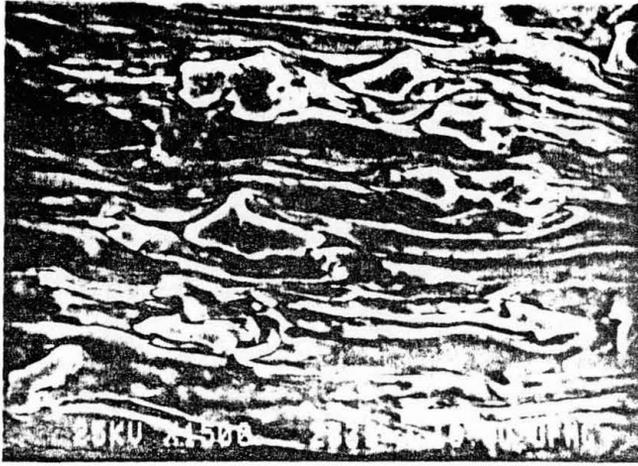


FIGURA 05: Fotomicrografia por MEV de uma amostra FM-1 trefilada. Aumento: 1500 vezes

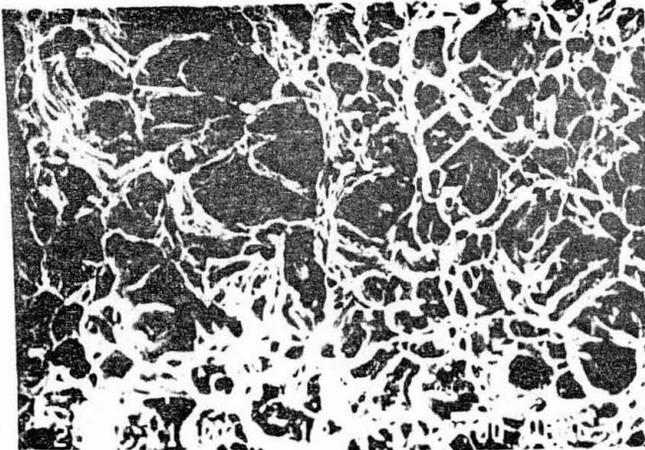


FIGURA 06: Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura de uma amostra MCR. Aumento: 1000 vezes

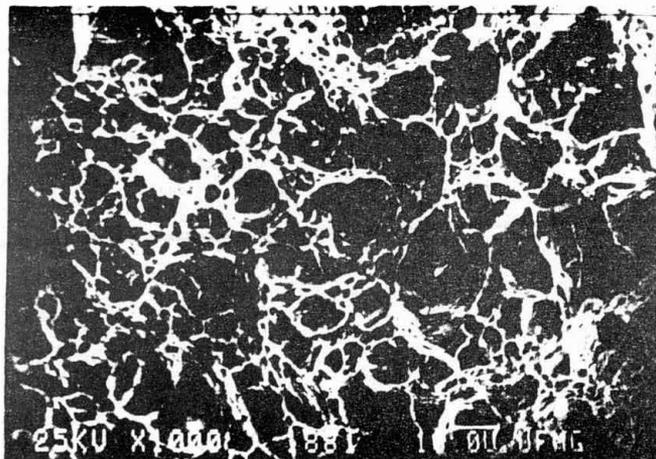


FIGURA 07: Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura de uma amostra FM-1
Aumento: 1000 vezes

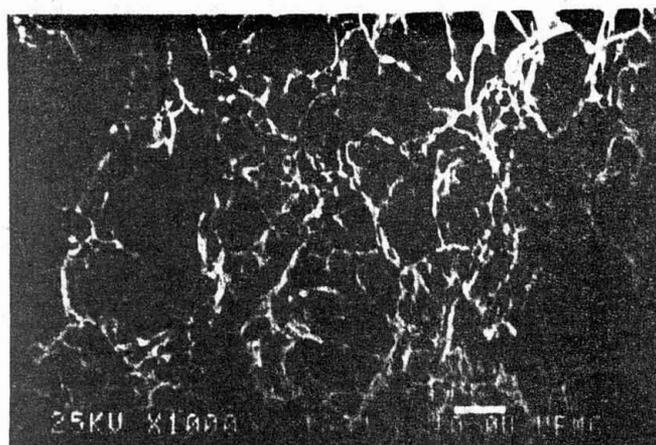


FIGURA 08: Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura de uma amostra FM-2
Aumento: 1000 vezes

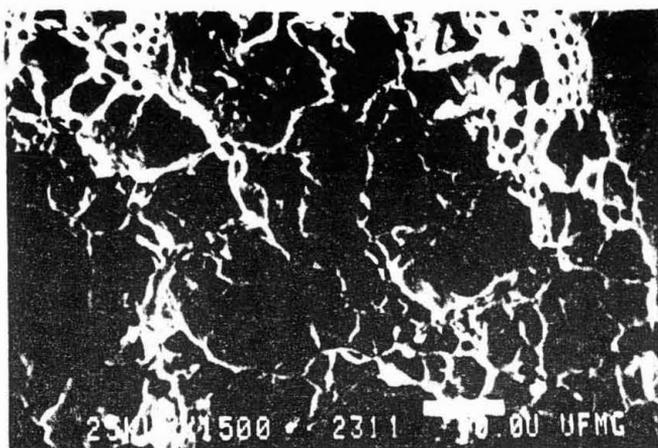


FIGURA 09: Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura de uma amostra FM-1 trefilada.
Aumento: 1500 vezes.

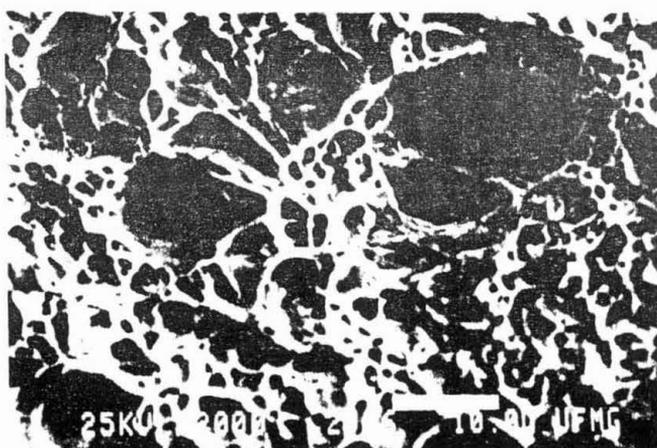


FIGURA 10: Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura de uma amostra FMP trefilada.
Aumento: 2000 vezes.

IV - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - TAKECHI, H.; MIZUI, M.; MATSUMARA, O. and SAKUMA, Y. High strength steel for automotive structural components. **Nippon Steel Corporation Report**, july 1986, nº 30, p. 51-97.
- 02 - FURUKAWA, Takashi. Dual-phase sheet steel for automotive applications. **Metal Progress**, december 1979, p. 36-39.
- 03 - NAKAGAWA, A.H. and THOMAS, G. Microstructure mechanical property relationships of dual-phase steel wire. **Metallurgical Transactions A**, vol. 16 A, 1985, p. 831-840.
- 04 - THOMAS, G. and AHN, J.H. Low carbon dual phase steel for high strength wires. Paper for Interwise 55th Anual Convention, november 3-8 1985, Atlanta, Georgia, USA.
- 05 - WANG, X.; YANG, L.; YANG, D. and LEI, T. Strengthening mechanism of cold drawing deformation of a steel 1020 dual-phase wire. **Wire Journal International**, jan. 1992, p. 53-57.
- 06- ZHANG, J.; TANG, Z.X.; SHEN J.W. and LEI, T.Q. Application of dual phase steel 10Ti in production of a high-strength steel wire. **Wire Journal International**, sept. 1991, p. 248-252.
- 07 - MATSUMARA, O.; BANDO, S. and SAKUMA, Y. An improved tint etching method for high strength steel sheets with mixed microstructures. **Trans. Iron Steel Inst. JPN.**, 1988, vol. 23, (7), p. 569-577.
- 08 - SZEWCZYK, A.F. and GURLAND, J. A study of the deformation and fracture of a dual-phase steel. **Metallurgical Transactions AB**, october 1982, vol. 13 A, p. 1821-1826.
- 09 - BALLIGER, N.K. and GLADMAN, T. Work hardening of dual-phase steels. **Metal Science**, march 1981, p. 95-108.
- 10 - RIZK, A. and BOURELL, D.L. Dislocation density contribution to strength of dual-phase steels. **Scripta Metallurgica**, vol. 16, nº 12, 1982, p. 1321-1324.
- 11 - RAY, R.H. Tensile fracture of dual-phase steel. **Scripta Metallurgica**, vol. 18, nº 11, 1984, p. 1205-1209.

**STUDY OF A DRAWABILITY OF EXTRA-LOW CARBON
DUAL-PHASE STEEL WIRES⁽¹⁾**

Almir Gonçalves Vieira⁽²⁾

Paulo Roberto Cetlin⁽³⁾

Carlos A. Bottrel Coutinho⁽⁴⁾

Abstract

Samples of a 0,05C-1,35Mn-0,03Si steel wire were subjected to an intercritical annealing. After soaking, they were quenched in a mixture of water, salt and ice to produce a dual-phase microstructure of ferrite and martensite. Some dual-phase samples were subjected to several drawing passes, with an area reduction by pass of 0,2, attaining a total area reduction of 0,86. All samples held up the total reduction without failure. The mechanical properties after intercritical annealing and after the drawing process were determined through the measurement of yield point, tensile strength, uniform elongation, total elongation and necking. The fracture surfaces of samples after heat treatment and after drawing were analysed. They show basically ductile fracture features.

(1) Contribuição Técnica a ser apresentada no I Seminário de Trefilação de Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não-Ferrosos. São Paulo-SP, 18-19 novembro 1993.

(2) Físico, M.Sc., doutorando do D.E.Met. da EE-UFMG;

(3) Engenheiro Mecânico, Dr., Professor Titular do D.E.Met. da EE-UFMG;

(4) Engenheiro Mecânico, Ph.D., Professor Emerito do D.E.Met. da EE-UFMG

