

# ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO MICROESTRUTURAL E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO SAE 1045 ESFEROIDIZADO

**Carlos Augusto Silva de Oliveira**

**Marcio Roberto da Rocha**

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Conformação Mecânica, Campus Universitário, Trindade, CEP: 88040-900, C. Postal: 476, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: [carlosa@emc.ufsc.br](mailto:carlosa@emc.ufsc.br) [marciorocha@pg.materiais.ufsc.br](mailto:marciorocha@pg.materiais.ufsc.br)

## Resumo

Estudou-se as correlações entre microestruturas e propriedades mecânicas de um aço de médio teor de carbono esferoidizado. O material inicial utilizado neste trabalho foi um aço SAE 1045 laminado a quente. Posteriormente, metade das amostras foram laminadas a frio, em laminador de laboratório, com uma redução de 21%. As amostras assim tratadas foram submetidas a dois ciclos térmicos de esferoidização distintos, um isotérmico, a 710°C por 18 horas e outro variável, entre 680 e 740°C por 22 horas. Os tratamentos resultaram em diferentes microestruturas de carbonetos esferoidizados. Os parâmetros microestruturais foram analisados por meio de microscopia ótica e eletrônica de varredura. Ensaios de tração e dureza foram realizados para a determinação do comportamento mecânico do material em questão, o qual posteriormente foi relacionado com os diferentes parâmetros microestruturais medidos. Os resultados de laboratório também foram comparados com os obtidos em peças esferoidizadas industrialmente.

**Palavras-chave:** esferoidização, aço médio carbono, tratamento térmico

## 1. INTRODUÇÃO

O tratamento térmico de esferoidização é empregado onde se deseja maior conformabilidade e usinabilidade, ou para desenvolver uma estrutura adequada para subseqüentes tratamentos de endurecimento. Além disso, a esferoidização não intencional da perlita pode ocorrer em aços que trabalham por longos períodos em temperaturas elevadas (Samuels, 1999). A esferoidização das lamelas de cementita da perlita ocorrem geralmente em temperaturas abaixo da temperatura crítica  $A_1$ , sendo governada basicamente por processos difusivos (Shkatov et al., 1989).

A deformação a frio anterior ao tratamento térmico de esferoidização, acelera o processo; devido a que novos locais de maior difusão são introduzidos no reticulado do material. Estes podem ser ocasionados pelo aumento da densidade de discordâncias, vazios, defeitos, entre outros (Coutinho et al., 1979). A distância entre as lamelas de perlita, também tem efeito sobre a cinética do processo, sendo que para menores espaçamentos interlamelares, ter-se-á uma aceleração do processo, quando comparada com perlitas mais grosseiras (Aihara & Kanbara, 1990).

A correlação das propriedades mecânicas com as respectivas microestruturas de aços esferoidizados tem importante papel na otimização e pré-seleção dos processos de esferoidização, bem como para a obtenção das propriedades desejadas (Syn et al., 1994). Desta forma, objetivou-se, através da variação das microestruturas prévias, estudar a correlação das propriedades mecânicas (dureza, limite de escoamento, limite de resistência, limite de fratura e alongamento) com parâmetros microestruturais de um aço SAE 1045 esferoidizado.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado foi um aço SAE 1045, laminado à quente, cuja composição química é mostrada na tabela 1. Foram preparadas amostras medindo 30x25x6,5mm, sem e com deformação (feita por laminação a frio com 21% de deformação).

As amostras, assim preparadas, foram submetidas aos seguintes tratamentos térmicos: um ciclo térmico variável de 22 horas, com temperaturas variando em torno de  $A_{C1}$  (de 670 a 740°C) e outro isotérmico a 710°C por 18 horas. Tais tratamentos foram realizados em fornos tipo mufla, sendo as peças colocadas com o forno ainda frio. As temperaturas foram monitoradas pela utilização de um termopar Cromel-Alumel, tendo-se uma variação de  $\pm 10^\circ\text{C}$  no interior do forno.

Após o tratamento de esferoidização as amostras foram lixadas e polidas de modo convencional para exame metalográfico. Utilizou-se como reagente, nital 2%. As microestruturas foram observadas por microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Utilizou-se as normas ASTM E562 para análise quantitativa das fases e ASTM E112 para a determinação do tamanho de grão ferrítico.

Os parâmetros avaliados no MEV foram: tamanho, fator de forma (grau de esferoidização) dos carbonetos nos contornos e interior dos grãos. Foi utilizado o *software* *Analisis* 2.1 para a análise das imagens.

Os ensaios de tração, foram realizados segundo a norma ASTM A370-77. Foram empregados, corpos de prova em tamanho “*subsize*”, com largura de 6,25 e espessura de 5,0mm. Os resultados obtidos são uma média de três ensaios. Foram avaliados o limite de escoamento ( $\sigma_y$ ), o limite de resistência ( $\sigma_r$ ), o limite de fratura ( $\sigma_f$ ) e alongamento (%Al).

Os ensaios de dureza foram realizados utilizando-se um durômetro Vickers (HV15), modelo VEB HPO250, sendo os resultados uma média de 5 medidas.

Para a identificação das amostras, o seguinte código foi utilizado: D para as amostras deformadas, S para as amostras sem deformação, I para ciclo térmico isotérmico e V para ciclo térmico variável. A letra A indica o material preparado em laboratório e a B, o material obtida de um processo industrial de esferoidização.

**Tabela 1.** Composição química do aço SAE 1045 utilizado (% em peso)

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Al
Norma SAE	0.42/0.50	0.60/0.90	-	0.030 máx.	0.035 máx.	-
A	0.467	0.707	0.217	0.018	0.011	0.050
B	0,472	0,815	0,232	0,025	0,010	0,048

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise quantitativa dos constituintes nas amostras como laminada, apresentaram uma proporção de 63% perlita e 37% de ferrita.

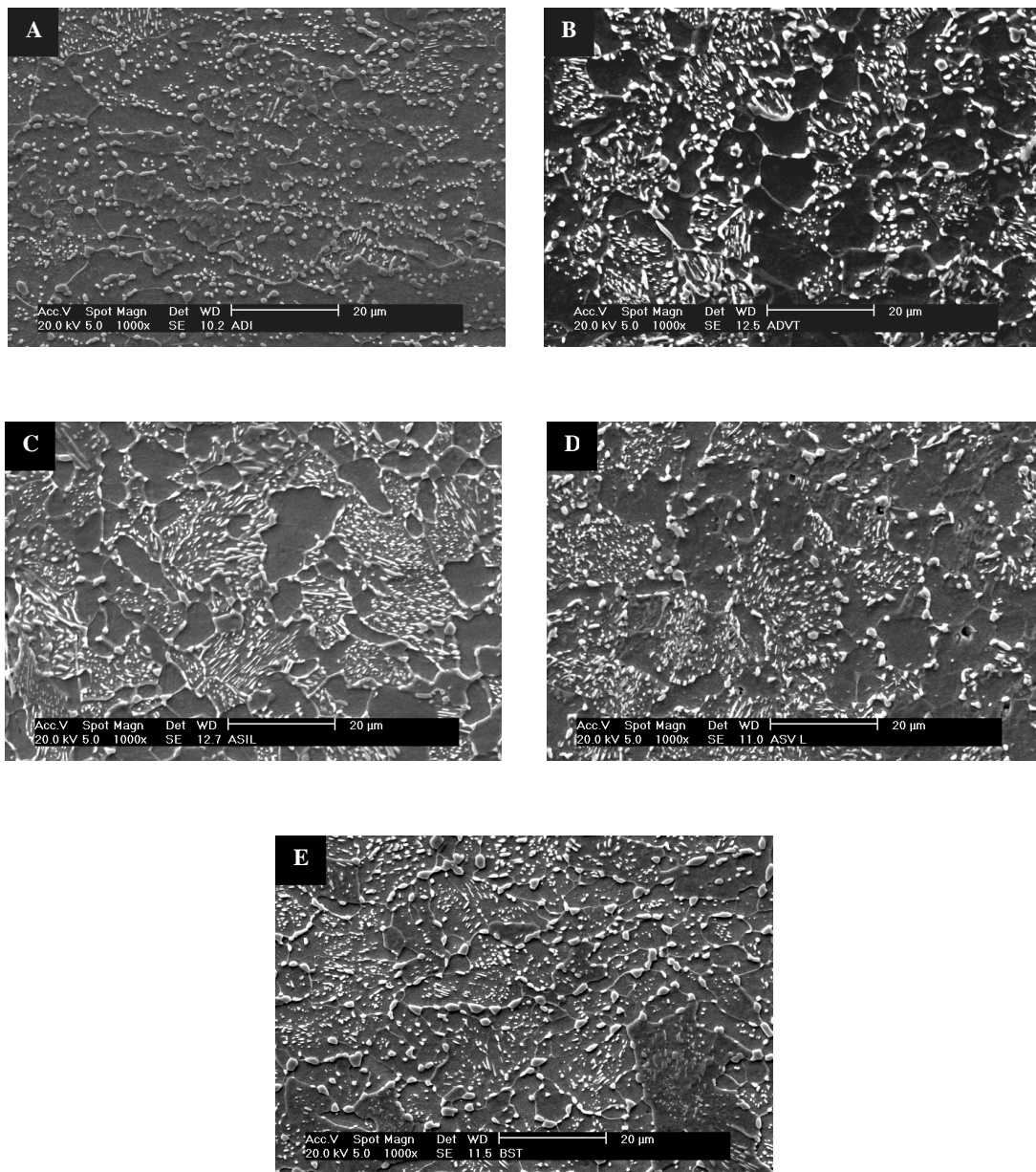
As microestruturas das amostras esferoidizadas consistiram de uma matriz ferrítica com carbonetos esferoidizados dispersos, tanto no interior, quanto nos contornos de grão.

As amostras ASI, ADV e ASV apresentaram esferoidização parcial, guardando traços das colônias de perlita anteriores ao tratamento térmico. Os carbonetos maiores (figura 1),

localizam-se principalmente nos contornos de grão. As amostras ADI e ASI não apresentaram variações significativas quanto aos tamanhos de grão ferríticos; quanto ao grau de esferoidização, ASI, ADV e ASV apresentaram-se muito próximos (tabela 2). Não foram observadas formação de filmes contínuos de carbonetos nos contornos de grãos.

As amostras deformadas e sem deformação, recozidas no ciclo variável apresentaram o mesmo grau de esferoidização da amostra sem deformação, recozida no ciclo térmico isotérmico (ASI). A amostra deformada e recozida isotermicamente apresentou-se mais esferoidizada que as anteriores (tabela 2).

O grau de esferoidização (GE) dos carbonetos não apresentou forte correlação com as propriedades mecânicas das amostras examinadas (tabela 2 e 3); entretanto, na tabela 4 é apresentada a tendência do GE dos resultados obtidos, por uma relação qualitativa com as propriedades mecânicas do material.



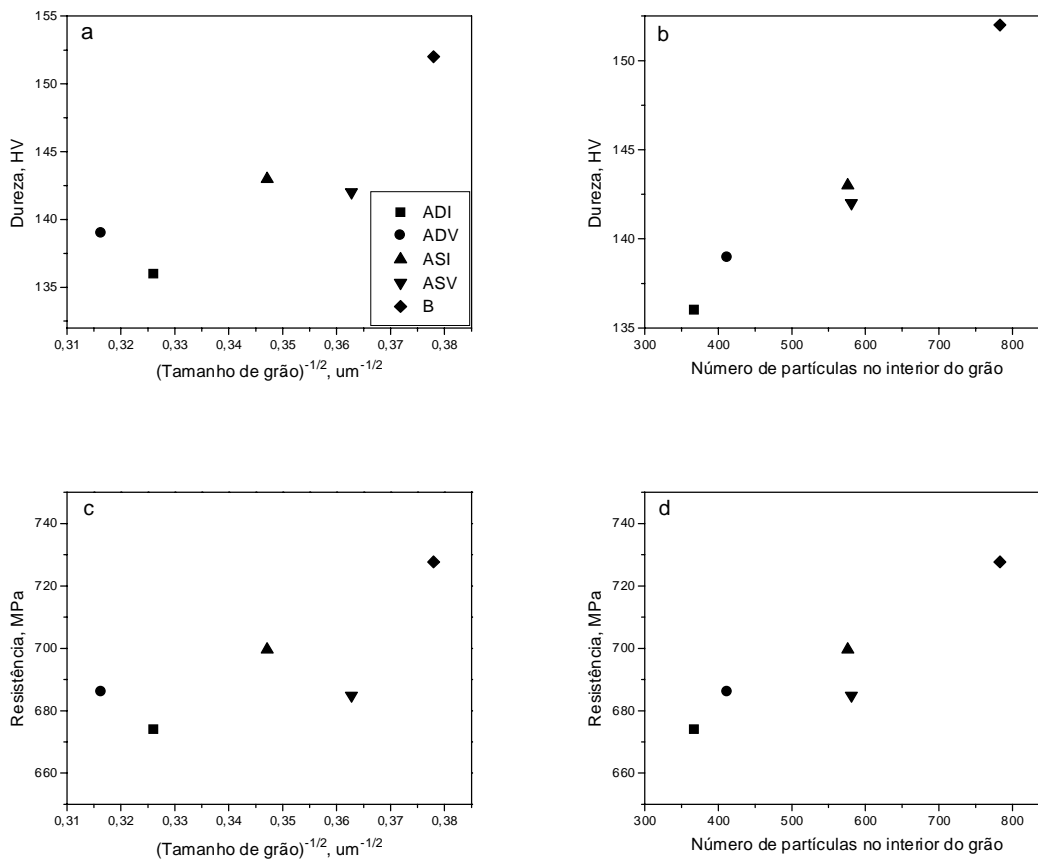
**Figura 1.** Micrografias de MEV das amostras após recozimento de esferoidização. a) amostra ADI; b) amostra ADV; c) amostra ASI; d) amostra ASV; e) amostra B. Ataque Nital 2%.

**Tabela 2.** Parâmetros microestruturais determinados para as diferentes amostras esferoidizados, obtidos por análises de MO e MEV

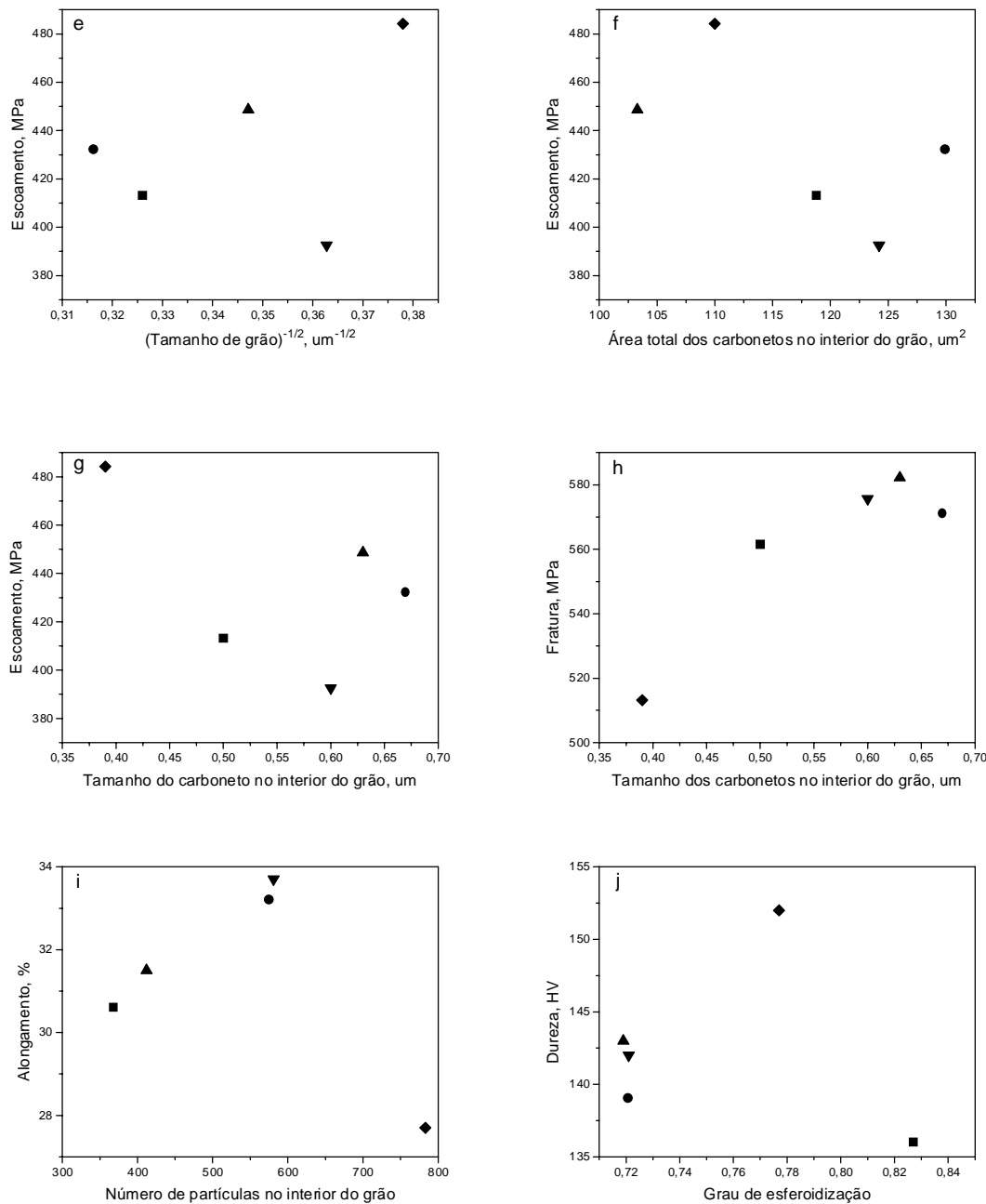
Amostras	Tamanho de Grão [μm]	Grau de Esferoidização no Interior	Tamanho do Carb. no Interior / Contorno [μm]	Nº de Partículas (1000μm <sup>2</sup> )	Área Carb. no Contorno[μm <sup>2</sup> ]
ADI	9,4	0,827	0,5 / 0,76	61	118,81
ASI	10,0	0,721	0,67 / 1,14	69	129,94
ADV	8,3	0,719	0,63 / 0,97	96	103,3
ASV	7,6	0,721	0,60 / 1,06	97	124,2
B	7,0	0,777	0,39/0,93	131	110

**Tabela 3.** Valores médios obtidos do ensaio de tração

Amostras	Alongamento (%)	Dureza (HV)	Tensão limite de escoamento $\sigma_y$ (MPa)	Tensão limite de resistência $\sigma_r$ (MPa)	Tensão limite de fratura $\sigma_f$ (MPa)
ADI	30,6	136	413,1	674,1	561,3
ASI	31,5	143	448,6	699,6	582,2
ADV	33,2	139	431,9	686,1	571,0
ASV	33,7	142	392,5	684,8	575,6
B	27,7	152	484,2	727,7	513,2



**Figura 2.** (a-j) - Relação entre as propriedades mecânicas e características microestruturais das amostras estudadas (continua)



**Figura 2.** (a-j) - Relação entre as propriedades mecânicas e características microestruturais das amostras estudadas

As figuras 2a e 2c, mostram que tanto a dureza quanto o limite de resistência tem uma tendência a aumentar com a diminuição do tamanho de grão ferrítico. Quanto maior o número de grãos presentes, maiores serão as barreiras proporcionadas pelos contornos de grão, para a movimentação de discordâncias (Dieter, 1981).

O número de partículas no interior do grão também apresentou forte influência sobre a dureza e limite de resistência; quanto maior o número de carbonetos no interior do grão,

maiores serão os pontos de bloqueio e ancoramento de discordâncias, implicando em maiores valores de dureza e resistência (figura 2b e 2d).

Nota-se na tabela 2 e figura 2 que os limites de resistência estão diretamente relacionados com o número de carbonetos distribuídos tanto no interior como nos contornos de grão. Quanto maior o número de partículas presentes no interior do grão, menor será o livre caminho médio para a movimentação das discordâncias, e desta maneira maior será a resistência apresentada pelo material durante a sua sollicitação (tabela 4) (Reed Hill, 1970).

Mesmo os carbonetos presentes nos contornos de grão, atuam no sentido de aumentar esta resistência, uma vez que, conforme pode ser verificado na figura 1, apresentam-se basicamente esferoidizados e não como um filme fino entre grãos, o que provocaria a fragilização da microestrutura e queda de sua resistência mecânica (Chiaverini, 1982).

Observa-se na figura 2e, que o aço SAE 1045 esferoidizado segue um comportamento do tipo da relação de Hall-Petch ( $\sigma_y = \sigma_0 + k.d^{-1/2}$ ), quando o limite de escoamento é relacionado com o inverso da raiz quadrada do tamanho de grão ferrítico, com exceção da amostra ASV que não seguiu tal comportamento. O tamanho e número de carbonetos presentes na matriz também guardam uma boa relação com o limite de escoamento (figuras 2f e 2g).

O alongamento mostrou boa correlação com o número de partículas no interior do grão, sendo que, quanto maior os valores de resistência do material, mais difícil tornar-se o aparecimento e formação das zonas de estrição, permitindo uma maior deformação do material (pois há uma menor taxa de redução de área transversal durante a deformação) (Dieter, 1981). Os valores encontrados de alongamento se situaram em faixas muito próximas, não podendo ser obtidas boas correlações com os diferentes parâmetros medidos. Com a diminuição do tamanho de grão ferrítico, e com a redução da área de partículas no interior do grão, maiores valores para o alongamento são conseguidos.

Segundo Lesuer et al. (1995), o comportamento de um material esferoidizado pode ser visto como o resultado da combinação entre as propriedades mecânicas e morfologia das duas fases presentes no material, equivalente a um composto de ferrita/cementita. Percebe-se, a partir dos resultados obtidos, a inter-dependência entre a forma e distribuição das partículas de carboneto com a matriz ferrítica (figura 2). Conforme citado na literatura (Syn, 1994), o comportamento mecânico de materiais esferoidizados deve ser descrito por equações que levem em conta não somente o tamanho de grão, mas também os fatores citados acima (número e tamanho de carbonetos, distância entre carbonetos, entre outros).

A amostra B apresentou o maior valor de limite de fratura, relacionando-se com menores valores de tamanho dos carbonetos no interior e contornos de grão.

Conforme mostra a figura 2h, a medida em que há um aumento no tamanho dos carbonetos no interior dos grãos, há um aumento no limite de fratura do material, embora um tamanho máximo de carboneto deva existir para maiores valores de limite de fratura.

Quanto maior o número de carbonetos presentes na matriz ferrítica, menor será o limite de fratura do material. Isto porque menor será a distância a ser percorrida por uma trinca, (uma vez que os mecanismos de fratura geralmente envolvem a nucleação e propagação de vazios/trincas), dentro da matriz dúctil (ferrita), resultando em menores valores de limite de fratura (Lesuer et al., 1995, Reed Hill, 1970).

Isto é evidenciado na amostra B, com maior limite de fratura, a qual apresenta uma maior quantidade de partículas no interior do grão, como também menor relação do tamanho dos carbonetos no interior e contornos de grão.

**Tabela 4.** Comparação qualitativa entre os diferentes parâmetros medidos e sua correlação com as propriedades mecânicas

Características Mecânicas	Tamanho de Grão ferrítico	Grau de Esferoidização	Tamanho Carboneto interior grão	Tamanho Carboneto contorno grão	Nº partículas Interior Grão
↑ Limite de escoamento	↓	↓	↑	↑	↑
↑ Limite de resistência	↓	↓	↑	↑	↑
↑ Tensão de fratura	↓	●	↑	↑	↑
↑ Alongamento	↓	↓	↑	↑	↑
↑ - aumenta; ↓ - diminui; ● correlação não verificada					

#### 4. CONCLUSÕES

A avaliação e correlação dos parâmetros microestruturais de um aço de médio carbono esferoidizado e suas propriedades foram realizadas, apresentando boas correlações entre microestruturas esferoidizadas e propriedades mecânicas.

Foi verificado que com o aumento do número de partículas, tanto no interior, quanto nos contornos de grão, maiores valores de limite de resistência, escoamento, fratura e alongamento são conseguidos.

Contudo, a amostra deformada e submetida ao ciclo térmico isotérmico, resultou no maior grau de esferoidização, quando comparada com as demais amostras.

O aço SAE 1045 esferoidizado apresentou um comportamento do tipo da equação de Hall-Petch, apresentando uma dependência do limite de escoamento com o tamanho de grão.

O grau de esferoidização não apresentou boa correlação com as propriedades mecânicas das amostras testadas, devido possivelmente ao reduzido número de amostras, as quais apresentaram resultados muito próximos.

Devido a uma certa homogeneidade nos resultados obtidos, novos estudos se fazem necessários de modo a delinear com maior clareza e ampliar as correlações entre microestruturas e propriedades mecânicas dos aços de médio teor de carbono esferoidizados.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Aihara, K., Kanbara, S., 1990, "Influence of Prior Structure upon Spheroidization Rate and Cold Forgeability of Annealed Wire; The Sumimoto Search", n. 42, p. 1-8.
- Chiaverini, V., "Aços e Ferros Fundidos", 5ªed., ABM, São Paulo, SP, Brasil, p. 81-84.
- Coutinho, C.A.B., Neto, P.P.S., Geber, L.P., 1979, "Aceleração do Processo de Esferoidização do Aço Perlítico por Deformação a Frio", Metalurgia – ABM; vol. 35; n.260.
- Dieter, G.E., 1981, "Metalurgia Mecânica", Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Brasil.
- Lesuer, D.R., Syn, C.K., Sherby, O.D., 1995, "Fracture Behavior of Spheroidized Hypereutectoid Steels", Acta Metall. Mater. 43, (10), p. 3827-3835.
- Metals Handbook, vol. 2- Heat Treating, Cleaning and Finishing, 8ª edição, American Society for Metals, Metals Park, USA;
- Samuels, L.E., 1999, "Light Microscopy of Carbon Steels", 1ªed., ASM International, USA, August.

- Shkatov, V.V., Chernyshev, A. P., Lizunov, V.I., 1990, "Kinetics of Pearlite Spheroidization in Carbon Steel", *Physics of Metals And Metallography (USSR)* 70, (4), p. 116-121.
- Syn, C. K., Lesuer, D.R., Sherby, O.D., 1994, *Metallurgical and Materials Transactions*, 25A, 1481.
- Reed-Hill, R.E., 1970, "Physical Metallurgy Principles", Van Nostrand Company Ltd, N.Y., U.S.A., 630 p.