# CARACTERIZAÇÃO POR EBSD DA MICROESTRUTURA DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR PROCESSADO POR TÊMPERA E PARTIÇÃO

Fabio Caixeta Nunes (PIBIC/Fundação Araucária/UEPG), Marcio Ferreira Hupalo (Orientador), e-mail: mfhupalo@uepg.br

Universidade Estadual de Ponta Grossa/Departamento de Engenharia de Materiais.

**Engenharia de Materiais e Metalúrgica, Metalurgia Física.**

**Palavras-chave:** Ferros fundidos nodulares, EBSD, Tratamento Térmico.

## Resumo

O presente trabalho teve como principal objetivo a caracterização da microestrutura de um ferro fundido nodular processado por têmpera e partição por meio da técnica de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD). A técnica permite a obtenção de informações a respeito da morfologia, frações volumétricas e orientação cristalográfica, sendo fundamental na interpretação e entendimento da transformação de fases obtida pela rota de processamento. Os tratamentos térmicos são de fundamental importância e de alto interesse tecnológico por proporcionarem consideráveis aumentos de propriedades, sendo a têmpera e partição uma rota alternativa à austêmpera para os ferros fundidos nodulares.

## Introdução

Diferentes setores da indústria incentivam o desenvolvimento de novos materiais ou o aprimoramento de materiais já existentes. É comum aliar propriedades com custo de produção. Neste contexto, os ferros fundidos nodulares são amplamente estudados como promissores [1].

Os tratamentos térmicos ocasionam em uma melhoria de propriedades mecânicas a partir do desenvolvimento microestrutural. O tratamento de austêmpera, gera uma microestrutura predominantemente formada por ferrita bainítica e por austenita enriquecida em carbono [2, 3, 4].

Os ferros fundidos nodulares austemperados são designados como ADI (Austempered Ductlie Iron). O desenvolvimento destes materiais estão relacionados a potencialidade de ser uma alternativa aos aços forjados por exemplo, uma vez que, em geral, possuem elevada fundibilidade, elevada resistência mecânica e são economicamente viáveis, além de apresentarem menor massa específica [1,5].

O tratamento de austêmpera inicia quando o material em estado bruto de fundição é austenitizado, com temperatura e tempo controlados. Em seguida, utiliza-se de um resfriamento rápido pelo campo bainítico, evitando a formação de perlita [5]. O tratamento térmico de têmpera e partição Q&P, do inglês *Quenching and Partitioning*, é um processo alternativo à austêmpera que busca a obtenção de uma combinação de propriedades mecânicas incomuns: alta resistência mecânica e alta ductilidade. A martensita e austenita são formadas, as quais são fases com propriedades mecânicas antagônicas [1,6].

O presente trabalho teve por objetivo investigar a microestrutura de uma liga de ferro fundido nodular processada por têmpera e partição, com destaque para a

técnica de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD), que permite identificar fases cristalinas e estudar aspectos de orientações cristalográficas.

## Materiais e Métodos

Para a realização do presente trabalho, utilizou-se duas amostras de ferro fundido nodular com dimensões de aproximadamente 10x15mm, máquina para corte, disco diamantado, fornos mufla e tubular, arames de aço, luvas térmicas, máscara para proteção, alicate, lixadeira d'água, lixas de SiC #220, #320, #400, #600, #800, #1200 e #1500, pasta diamantada 1 µm, suspensão de sílica coloidal 0,05 µm, pano para polimento, politriz Arotec modelo Aropol S, nital 2% (solução 98 mL etanol e 2% ácido nítrico), microscópio óptico Olympus modelo BX51, durômetro Laica, microscópio eletrônico de varredura de emissão de campo da marca TESCAN, modelo Lyra 3.

As amostras foram cortadas na máquina de corte, foram lixadas e polidas utilizando a pasta diamantada. Em seguida, por microscopia ótica, foi realizado um estudo da liga em seu estado bruto de fundição, determinando o grau de modularização, proporção de fases e número de nódulos por $mm^2$, utilizando as normas ASTM.

Em seguida, realizou-se o tratamento térmico de têmpera e partição, em que as amostras foram pré-aquecidas por 15 minutos em um forno tipo mufla, e austenitizadas a 900ºC por 2 horas, seguido da têmpera parcial a 170ºC por 2 minutos e posterior partição com temperaturas de 230ºC e 370ºC, durante 2 horas.

Foram então realizadas medidas de dureza Rockwell e microdureza Vickers, para verificação de propriedades mecânicas, após nova preparação metalográfica.

Na análise microestrutural via EBSD foram utilizadas diferentes rotas de polimento de polimento eletrolítico para a adequação das amostras, entretanto, nenhuma das soluções de eletrólitos utilizadas nos testes foram adequadas, sendo então realizado o polimento manual com sílica coloidal. Foi então realizada uma calibração e adequação das amostras para avaliação da qualidade dos padrões de difração obtidos e posterior varredura por EBSD.

## Resultados e Discussão

Os resultados de medidas de metalografia quantitativa foram um número de nódulos de 120 ± 21 nódulos/$mm^2$, sendo abaixo do recomendado pela literatura. Recomenda-se 150 nódulos/$mm^2$ como quantidade mínima para o tratamento de austêmpera. O grau de nodularização foi de 93 ± 0,5 %, sendo adequado para o tratamento. E proporção de fases resultou em 57,1% de ferrita e 42,9% de perlita, considerando a matriz normalizada para 100% e descontando as áreas preenchidas pelos nódulos de grafita [2,7].

Com relação aos valores de dureza obtidos, a média para a amostra temperada e particionada a 230ºC foi de 478 HV, enquanto que para a de 370ºC foi de 408 HV. Nas medidas de dureza Rockwell foram obtidas médias de 43 HRC e 37 HRC respectivamente. Isso pode ser justificado pelo fato da dureza ser intimamente influenciada pelos parâmetros de tratamento térmico. Morfologias mais refinadas, como é o caso da amostra particionada a 230ºC obtém maior dureza, ao passo que morfologias mais grosseiras, possuem uma menor dureza obtida em ambas as escalas.

A figura 1, a seguir, apresenta as fotomicrografias obtidas para cada amostra tratada termicamente.

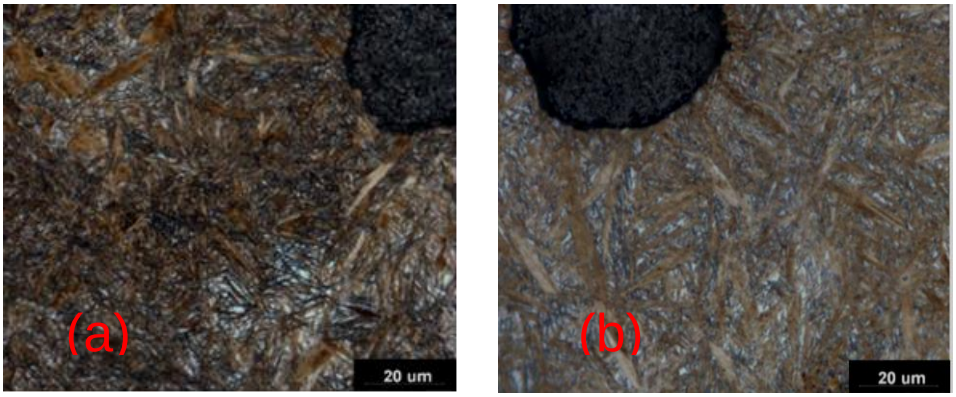



**Figura 1** – Microestrutura obtida após o tratamento térmico de têmpera e partição a 230ºC (a) e 370ºC (b) durante 120 minutos.

As microestruturas obtidas a partir do tratamento térmico permite a obtenção de uma combinação entre martensita e austenita, dando ao material um compilado de propriedades mecânicas de resistência a tração e alongamento [6]. Nota-se algumas regiões esbranquiçadas, que remetem provavelmente a formação de carbetos, inerentes da segregação de elementos de liga durante a solidificação, como ocorre por exemplo com o fósforo, que forma a esteadita, gerando um efeito fragilizante na liga [8].

Menores temperaturas de partição ocasionam em regiões com transformações heterogêneas entre as regiões intercelulares e próximas aos nódulos de grafita, por conta da segregação de elementos de liga na solidificação, ocasionando em variações na temperatura Ms em diferentes regiões do material, dificultando a partição de carbono, havendo maior taxa de nucleação [8]. Ao aumentar a temperatura de partição, tende-se a diminuir os nódulos de maneira drástica, pois maiores temperaturas de partição favorecem os mecanismos competitivos de partição de carbono da martensita para a austenita e de crescimento das ferritas bainíticas já nucleadas, assim, consome a austenita.

A figura 2 apresenta os resultados da análise microestrutural por EBSD.

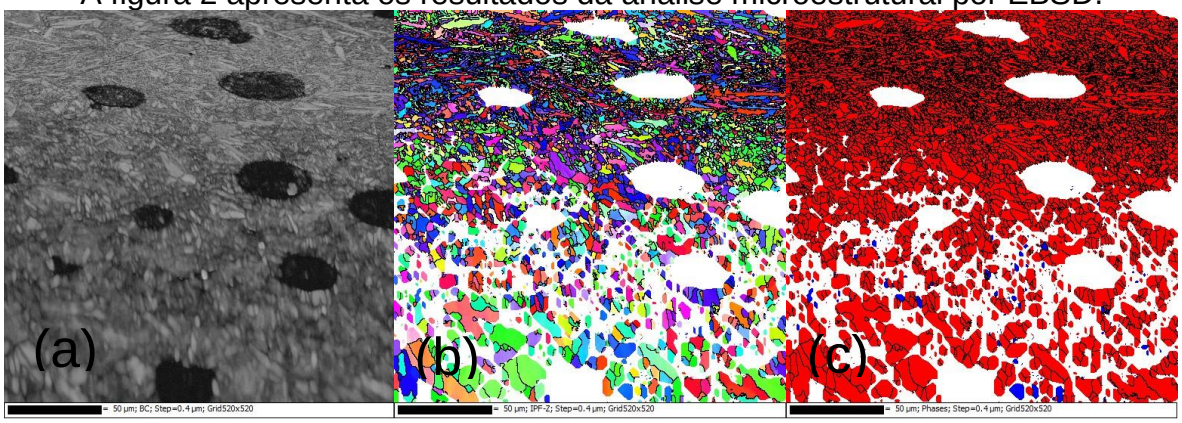



Figura 2 - Análise microestrutural via EBSD de uma amostra temperada e particionada a 370ºC.

Nota-se na figura 2(a) a qualidade dos padrões de análise. Quanto mais claros os tons de cinza, melhor a indexação do padrão de difração inerente da amostra. A figura 2(b) demonstra que os nódulos de grafita não são identificáveis na análise e formam “buracos”, portanto, as grafitas não são indexáveis. Outro aspecto a ser observado é com relação a região inferior da imagem, a qual demonstra áreas

sem indexação. De modo similar ocorre na figura 2(c), a qual apresenta em azul as regiões que foram identificadas como austenita retida. Pode-se justificar a não indexação por conta de uma eventual preparação metalográfica inadequada ou ainda, devido a tensões residuais provenientes da transformação martensítica.

## Conclusões

O material no estado bruto de fundição influencia diretamente no tratamento térmico, de modo que se devem realizar de maneira minuciosa os tratamentos de inoculação e nodularização, a fim de se obter um material apropriado para o tratamento, com relação ao grau de nodularização e ao número de nódulos por área.

A temperatura de partição influencia diretamente na presença de heterogeneidades da microestrutura, sendo que em temperatura mais elevada, há maior heterogeneidade. Estes fatores afetam as propriedades, como a dureza, a qual é fortemente influenciada pelos parâmetros de tratamento térmico.

A rota de preparação para o EBSD é de fundamental importância para indexação dos padrões de difração para identificar planos dos ferros fundidos nodulares, de modo que há uma influência direta nos resultados obtidos.

## Agradecimentos

Ao professor Dr. Márcio Ferreira Hupalo pela dedicação e didática. Á Fundação Araucária pela bolsa de Iniciação Científica.

## Referências

[1] PUTATUNDA, S. K. **Development of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) with simultaneous High Yield Strenght and Fracture Toughness by a Novel Two Step Austempering Process.** Materials Science and Engineering, v.315A, n.1 p.70-78, 2001.

[2] TORRALBA, J. M., NAVARRO, A., CAMPOS, M. **From the TRIP effect and Quenching and Partitioning steels concepts to the development of new high-performance, lean powder metallurgy steels.** Materials Science and Engineering A, v.573, p.253-256, 2013.

[3] HAYRYNEN, K.L.; BRANDENBERG, K.R. **Agricultural applications of austempered ductile iron.** World Conference on ADI. U.S.A, p. 135-140, 2002.

[4] SCHUTT, K. H. **Atualização de projetos e aplicações de componentes fundidos.** Revista Fundição e Serviços. N 236 p. 38-57, 2012.

[5] PUTATUNDA, S.K.; RAO, P. **Investigations on the fracture toughness of austempered ductile irons austenitized at different temperatures.** Materials Science and Engineering. V., n., p 136-149, 2002.

[6] SPEER, J.G., ASSUNÇÃO, F.C.R., MATLOCK, D.K., EDMONDS, D.V. **The "Quenching and Partitioning" Process: Background and Recent Progress.** Materials Research, v.8, n.4, p.417-422, 2005.

[7] GUESSER, W.L. **Propriedades Mecânicas dos ferros fundidos**, blucher, São Paulo, 2009.

[8] SILVA, A. J. S. T. da. et al. **Quenching and partitioning heat treatment in ductile cast irons.** Mat. Res.,[s.l.], v. 17, n. 5, p.1115-1123, 2014. FapUNIFESP (SciELO).