ENG MAT CON
CONGRESSO ONLINE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
Edição 2021

UM BREVE RELATO SOBRE O MICROCONSTITUINTE BAINITA DOS AÇOS

III Congresso Online de Engenharia de Materiais. inscrições encerradas, 4ª edição, de 27/04/2021 a 30/04/2021
ISBN dos Anais: 978-65-89908-00-5

SILVA; Lucas Rafael Carneiro da [1], VILANTE; Thays Beatryce Pereira [2], SOBRINHO; Naiara de Oliveira [3], PINTO; Railson Machado [4], CARVALHO; Laysa Layara Pires de [5], FILHO; Edivaldo Feitosa Pereira [6]

RESUMO

RESUMO O termo “Bainita” deriva de E. C. Bain, que foi um metalurgista americano que estudou intensivamente a transformação isotérmica dos aços. O microconstituinte bainita por apresentar uma complexidade em seu processo de formação e uma variedade de tipos de bainita possíveis de serem produzidas, nos últimos anos, tem recebido bastante atenção e havido grande interesse para a sua utilização em virtude do seu potencial de aplicações, permitindo também ser usado como uma alternativa para melhorar a tenacidade do aço devido a sua resistência e dureza intermediária entre a fase ferrita e a martensita. Desta maneira, este breve relato apresentou os principais pontos da transformação bainítica e de sua morfologia visto a sua importância nas propriedades dos aços. **ABSTRACT** The term "Bainite" derives from E. C. Bain, who was an American metallurgist who studied intensively the isothermal transformation of steel. The bainite microconstituent for having a complexity in its formation process and a variety of types of bainite possible to be produced, in recent years, has received a lot of attention and there has been great interest for its use due to its potential for applications, also allowing be used as an alternative to improve the toughness of steel due to its intermediate strength and hardness between the ferrite and martensite phases. In this way, this brief report presented the main points of the bainitic transformation and its morphology considering its importance in the properties of the steels. **Keywords:** Steels. Bainite. Microconstituent. Phase Transformations. **1. INTRODUÇÃO** A etapa de planejamento de produção é de suma importância para o sistema de fabricação de grande quantidade de produtos, ou seja, é algo indispensável para a manufatura, pois é nessa etapa onde são selecionados os diversos tipos de materiais, de acordo com custos e, principalmente, com as necessidades técnicas exigidas. O material durante o seu uso pode apresentar variados tipos de comportamento, por isso, é conveniente e necessário que o responsável pela a elaboração dessa etapa possua o conhecimento prévio sobre as estruturas internas e das propriedades dos materiais, pois assim ele poderá prever tal comportamento, bem como, programar e controlar as suas propriedades e características. De posse desses conhecimentos, os engenheiros estarão capacitados a selecionar os materiais específicos para cada aplicação e, também, aptos para desenvolverem eficientes processos de produção[1]. É um fato que muitas das propriedades dos

[1] Universidade Federal do Piauí, lrcs.carneiro@gmail.com
[2] Universidade Federal do Piauí, thaysbeatryce@gmail.com
[3] Universidade Federal do Piauí, naiaraoliveira2011@gmail.com
[4] Universidade Federal do Piauí, railsonmachado29@hotmail.com
[5] Instituto Federal do Piauí, laysapires10@hotmail.com
[6] Universidade Federal do Piauí, edivaldofpf@gmail.com

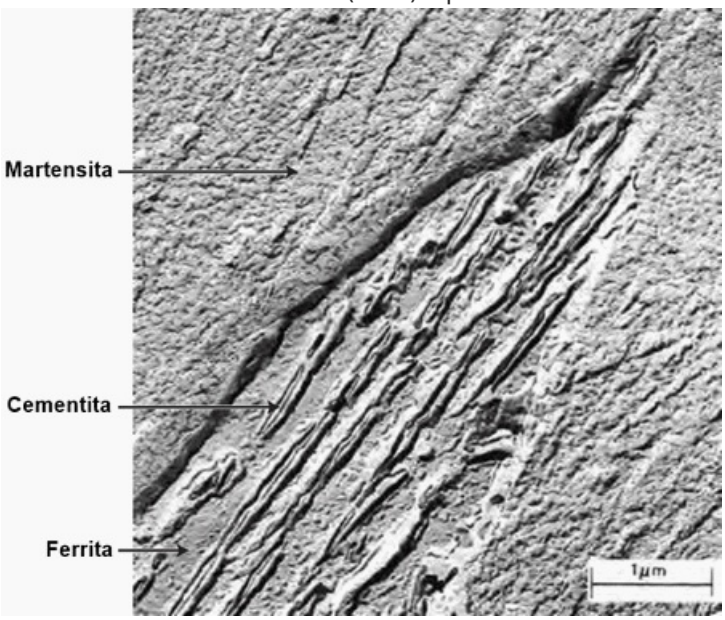
materiais são influenciadas pela a descrição do arranjo de seus átomos em diferentes níveis de detalhes, isto é, sua estrutura, mesmo que não haja alteração da constituição química desse material[2,3]. O fio de cobre puro é um exemplo de que mesmo não havendo mudança na sua composição química ao ser flexionado repetidamente; por ficar mais duro, mais frágil e mais resistente eletricamente, as mudanças que ocorrem em suas propriedades são devidas às modificações em sua estrutura interna e não da sua composição química. Observa-se nesse exemplo que não houve nenhuma mudança a nível macroscópico no material, porém, salienta-se que a sua estrutura sofreu modificações em escala microscópica, conhecida como microestrutura. Com o entendimento acerca de como o material admitiu tal alteração microscopicamente, é possível a criação de métodos que visam o controle de suas propriedades[3]. Essas microestruturas que afetam diretamente as propriedades mecânicas, da mesma maneira que, muitas outras propriedades de muitos materiais, são produzidas como resultado de transformações de fases. Essas transformações desempenham um papel extremamente importante no desenvolvimento da microestrutura para ligas ferro-carbono, assim como, de outras ligas, no qual, as propriedades mecânicas, já mencionadas, são afetadas significativamente por essas mudanças microestruturais. Na maior parte dos casos, durante a transformação de fases pelo menos uma nova fase é formada, a qual apresenta características físicas/químicas diferentes e/ou uma estrutura diferentes daquela da fase que a originou[4]. Um assunto que vêm sendo constantemente discutido no meio dos produtores de aço é sobre a necessidade de investimentos no desenvolvimento de novos materiais, que gerem um baixo custo de produção sem perder a qualidade e as propriedades mecânicas desejadas. Para que se tenha chances de competir em um mercado globalizado e altamente competitivo, as usinas siderúrgicas e a indústria de beneficiamento e de transformação necessitam de soluções cada vez mais extremas em relação aos custos de Produção *versus* Propriedades Mecânicas[5]. Propriedades como uma elevada dureza, limite de escoamento, resistência ao desgaste e limite de resistência geralmente estão associadas a peças temperadas e revenidas ou de estrutura martensítica, mas quando essas propriedades são aliadas a um maior alongamento, maior resistência ao impacto e maior resistência à fadiga, é permitido afirmar que as estruturas bainíticas vêm ganhando cada vez mais espaço no mercado, a ponto de substituir aplicações tradicionais, como em alguns tipos de molas e peças de máquinas agrícolas[6,7]. O microconstituinte bainita por exibir uma complexidade em seu processo de formação e uma variedade de tipos de bainita possíveis de serem produzidas, nos últimos anos, tem recebido bastante atenção e havido grande interesse para a sua utilização em virtude do seu potencial de aplicações[8], permitindo também ser usado como uma alternativa para melhorar a tenacidade do aço devido a sua resistência e dureza intermediária entre a fase ferrita e a martensita[9,10]. Nessa linha de raciocínio o objetivo deste trabalho é ressaltar os principais pontos da transformação bainítica, de sua morfologia e do crescimento desse microconstituinte.

2. TRANSFORMAÇÃO BAINÍTICA

O termo “Bainita” é uma homenagem a E. C. Bain, metalurgista americano que juntamente com E. S. Davenport descobriu em 1930 uma nova microestrutura dos aços, que consiste de agregados aciculares (que tem forma de agulha) e regiões escuras quando atacadas quimicamente[10,11]. Esse microconstituinte consiste nas fases Ferrita (α) e Cementita (Fe_3C), e envolve em seu mecanismo de formação a difusão e o cisalhamento. Formando-se como agulhas ou placas, a bainita depende para essas

[1] Universidade Federal do Piauí, lrcs.carneiro@gmail.com
[2] Universidade Federal do Piauí, thaysbeatryce@gmail.com
[3] Universidade Federal do Piauí, naiaraoliveira2011@gmail.com
[4] Universidade Federal do Piauí, railsonmachado29@hotmail.com
[5] Instituto Federal do Piauí, laysapires10@hotmail.com
[6] Universidade Federal do Piauí, edivaldofpf@gmail.com

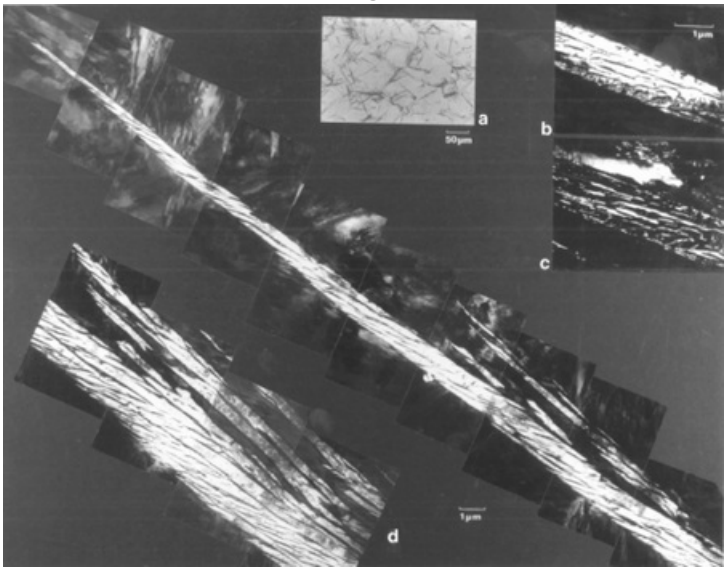
formações acontecerem da temperatura da transformação de cada formato; os detalhes microestruturais da bainita são tão finos que sua resolução só é possível empregando um microscópio eletrônico. Na Figura 1 é mostrado uma micrografia eletrônica de um grão de bainita[4]. **Figura 1.** Micrografia Eletrônica de Transmissão (MET) apresentando a estrutura da bainita.



Fonte: Adaptado de CALLISTER JR., 2012. Esse microconstituinte é um dos produtos da transformação austenítica, que ocorre entre as temperaturas de formação dos constituintes perlita e martensita. À vista disso, a taxa de resfriamento até a região de transformação não deve ser lenta o suficiente para que seja possível a formação de perlita e nem tão alta para formar martensita. Essa transformação é supostamente a menos compreendida da reação de decomposição da austenita. Isso tem levado os pesquisadores a contínuos e progressivos debates. Os mecanismos pela qual a bainita é formada da austenita são complicados e até hoje, ainda são objetos de muita controvérsia[10]. Como a bainita se forma em uma faixa de temperatura intermediária, essa apresenta uma microestrutura semelhante aos constituintes perlita e martensita. Similar à perlita, porque é uma mistura de ferrita e carbonetos, que dependem da difusão. No entanto, a sua microestrutura não se apresenta em forma de lamelas. É similar à martensita porque a ferrita da bainita se forma por cisalhamento, característico da martensita[13]. É importante enfatizar que a bainita é uma mistura de ferrita e carbonetos, e não uma fase. O carbono da transformação bainítica, que estava distribuído de forma homogênea na austenita, se concentra em locais de alto teor de carbono, isto é, as partículas de carboneto, gerando assim uma matriz isenta de carbono, a ferrita[14]. Como a reação bainítica envolve mudanças de composição, nessa reação acontece difusão de carbono[15]. MEHL (1939) observou em aços de médio teor de carbono duas morfologias diferentes de bainita, e as batizou de “Bainita Superior” e “Bainita Inferior”. Uma definição da bainita foi dada por REYNOLDS *et al.* (1991) afirmando que esse microconstituinte é um produto não lamelar, resultante da decomposição eutetóide. **3. MORFOLOGIA DA BAINITA** **3.1. Bainita Superior** A faixa de temperaturas para a formação da bainita superior é de 350 a 550 °C, considerando a composição química do aço em questão. A microestrutura desse tipo de bainita consiste de ripas finas de ferrita, cada uma com espessura da ordem de 0,2 μm e comprimento de 10 μm. Na Figura 2 é ilustrado a morfologia dos feixes de bainita. KUTSOV *et al.* (1999) atesta que essas ripas crescem de forma agrupada formando feixes, com aparência de pena. As ripas são paralelas e possuem

[1] Universidade Federal do Piauí, lrcs.carneiro@gmail.com
[2] Universidade Federal do Piauí, thaysbeatryce@gmail.com
[3] Universidade Federal do Piauí, naiaraoliveira2011@gmail.com
[4] Universidade Federal do Piauí, railsonmachado29@hotmail.com
[5] Instituto Federal do Piauí, laysapires10@hotmail.com
[6] Universidade Federal do Piauí, edivaldofpf@gmail.com

orientações cristalográficas idênticas e bem definidas em cada feixe. As ripas individuais dos feixes são intituladas “subunidades de bainita” (Figura 3) e, geralmente, são separadas por contornos com pequenos desvios da orientação cristalográfica ou por partículas de cementita. De forma independente, a ferrita e a cementita nucleiam, e a difusão do carbono na austenita é o que faz o controle do crescimento da bainita superior. Cooperativamente, a ferrita e a cementita crescem, ou seja, a ferrita expulsa o carbono que é absorvido pela cementita[10,17]. **Figura 2.** Micrografia da bainita superior: (a) micrografia óptica; (b, c) micrografia de transmissão em campo claro e escuro da austenita retida entre subunidades e (d) montagem do feixe de bainita vista por MET.

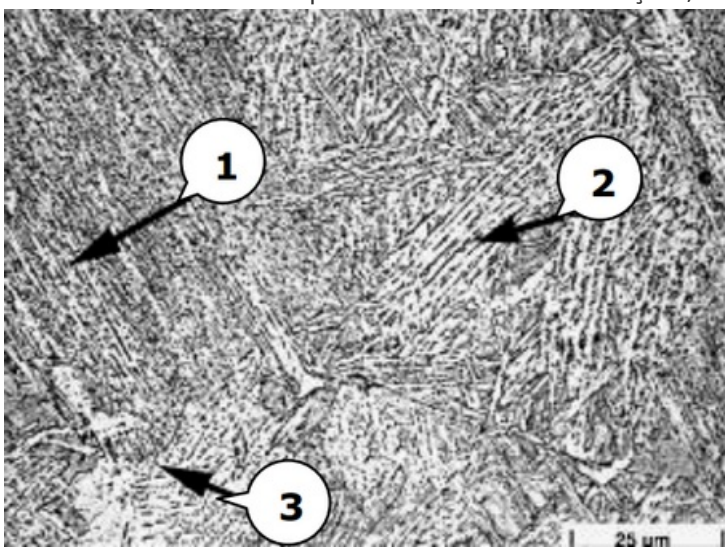


Fonte: BHADESHIA, 2001. **Figura 3.** Esboço da subunidade próximo à região da extremidade do feixe.

Fonte: BHADESHIA, 2001. **3.2. Bainita Inferior** A bainita inferior é produzida por uma transformação isotérmica que acontece numa faixa de temperaturas de 250–350 °C. Ela possui microestrutura e características cristalográficas correlatas à bainita superior, com aparência de placas[18]. A principal diferença é que na bainita inferior os precipitados da cementita (carbonetos) aparecem no interior das placas ou ripas de ferrita e entre elas, enquanto que na bainita superior encontram-se entre as ripas de ferrita e as ripas da bainita inferior são muito mais longas do que as da bainita superior. Na Figura 4 é apresentado a microestrutura da bainita inferior[10]. **Figura 4.** Microestrutura da bainita inferior.

[1] Universidade Federal do Piauí, lrcs.carneiro@gmail.com
[2] Universidade Federal do Piauí, thaysbeatryce@gmail.com
[3] Universidade Federal do Piauí, naiaraoliveira2011@gmail.com
[4] Universidade Federal do Piauí, railsonmachado29@hotmail.com
[5] Instituto Federal do Piauí, laysapires10@hotmail.com
[6] Universidade Federal do Piauí, edivaldofpf@gmail.com

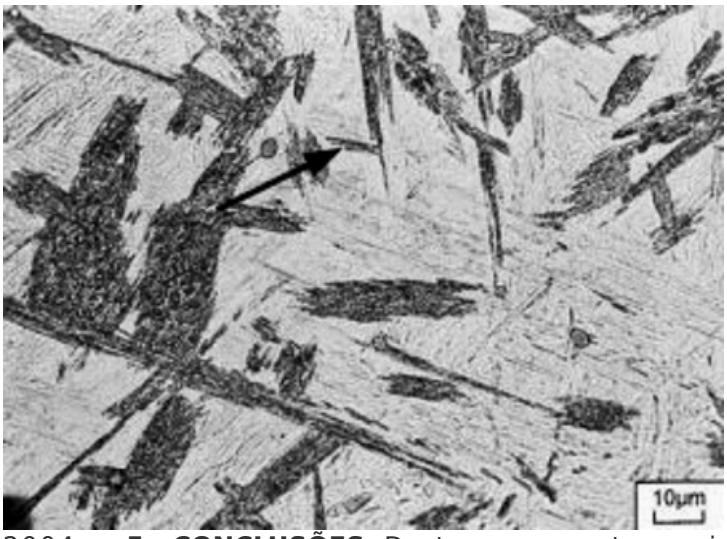
Fonte: BHADESHIA, 1999. A bainita inferior consiste de plaquetas finas organizadas na forma de feixes, com cada plaqueta parcialmente separada por carbonetos ou por um filme de austenita retida com alto teor de carbono. Esses carbonetos são extremamente finos, apenas com alguns nanômetros (nm) de espessura e 500 nm de comprimento[20]. **4. O CRESCIMENTO DA BAINITA** É uma característica frequente a nucleação das placas de bainita com base em feixes existentes. A bainita que cresce dos contornos de grão da austenita prévia é comumente observada na forma de entrelaçamento de feixes de placas muito finas com partículas de cementita alinhadas (Figura 5) que são chamadas de FS(A) - classificação do *International Institute of Welding* (IIW)[14,21]. **Figura 5.** Entrelaçamento de feixes de bainita superior e inferior em um aço 0,17%C e 1,0%Mn.



Fonte: THEWLIS, 2004. Na Figura 5 são observados três pontos em destaque que demonstram qual é o tipo de bainita presente no determinado ponto e de que maneira ela se encontra no entrelaçamento. O ponto 1 refere-se a bainita inferior com partículas de carbonetos entre as subunidades, o ponto 2 exibe a bainita superior com carboneto alinhado e o ponto 3 indica ferrita bainítica com carboneto não alinhado[21]. Na bainita superior, chamada de FS(UB) na classificação IIW, partículas de

[1] Universidade Federal do Piauí, lrcs.carneiro@gmail.com
[2] Universidade Federal do Piauí, thaysbeatryce@gmail.com
[3] Universidade Federal do Piauí, naiaraoliveira2011@gmail.com
[4] Universidade Federal do Piauí, railsonmachado29@hotmail.com
[5] Instituto Federal do Piauí, laysapires10@hotmail.com
[6] Universidade Federal do Piauí, edivaldofpf@gmail.com

carbonetos são observadas entre as placas, ao passo que na bainita inferior, chamada de FS(LB), os carbonetos estão tanto dentro como entre as placas e a estrutura tende a ter uma resposta mais escura ao ataque. O processo de crescimento dos feixes é mostrado na Figura 6. **Figura 6.** Crescimento de feixes de bainita (seta) e nucleação de ripas em um aço 0,38%C; 1,39%Mn; 0,039%S e 0,09%V (45 s à 400 °C).



Fonte: THEWLIS, 2004. **5. CONCLUSÕES** Dentre os aspectos mais importantes dos materiais está a sua microestrutura, que é o resultado da composição química e do processamento, que influencia as suas propriedades e desempenho. Essas microestruturas que afetam diretamente as propriedades mecânicas, da mesma maneira que muitas outras propriedades de muitos materiais, são produzidas como resultado de transformações de fases. A bainita pode ser classificada como bainita superior ou inferior. A diferença entre estas microestruturas está na forma como ocorre a precipitação dos carbonetos, em função da temperatura de transformação. Portanto, a bainita desempenha um papel importante e específico nos aços. **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** 1. INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS MATERIAIS. Disponível em: <www.fem.unicamp.br/~caram/capitulo1.pdf>. Acesso em: 01 de fev. de 2021. 2. SHACKELFORD, J. F. MATERIAIS PARA ENGENHARIA. *Ciência dos Materiais*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. p. 9. 3. ESTRUTURA E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS. Disponível em: <jorgeteofilo.files.wordpress.com/2011/08/epm-apostila-capitulo011.pdf>. Acesso em: 01 de fev. de 2021. 4. JR., W. D. C. TRANSFORMAÇÕES DE FASES. *Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada*. 4ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 5. SCURACCHIO, B. G.; JR., C. R. G.; ARIAS, R. B.; BELAN, G.; MARTINS, L. F. M.; Austêmpera de tiras de aço carbono em forno contínuo. 6. MARTINS, L. F. M.; BELAN, G.; Desenvolvimento de rolos de aço austemperado para a indústria automotiva. *Society of Automotive Engineers*, p. 1-5, 2006. 7. LAZZARINI, R.; BELAN, G.; MARTINS, L. F. M.; Desenvolvimento de rolos de aço austemperado para aplicação na indústria de embalagem. *61º Congresso Anual da ABM*, Rio de Janeiro, p. 1-9, 2006. 8. BRAMFITT, B. L.; SPEER, J. G.; A Perspective on the Morphology of Bainite. *Metallurgical Transactions A*, v. 21, p. 817-829, 1990. 9. MEHRABI, H.; MINTZ, B.; Influence of tempering on impact behaviour of quenched and tempered steels with low hardenability. *Materials Science and Technology*, v. 13, p. 997-1006, 1997. 10. ANAZAWA, R. M.; Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 300M com microestrutura multifásica. *Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica*. Área de conhecimento de Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de

[1] Universidade Federal do Piauí, lrcs.carneiro@gmail.com
[2] Universidade Federal do Piauí, thaysbeatryce@gmail.com
[3] Universidade Federal do Piauí, naiaraoliveira2011@gmail.com
[4] Universidade Federal do Piauí, railsonmachado29@hotmail.com
[5] Instituto Federal do Piauí, laysapires10@hotmail.com
[6] Universidade Federal do Piauí, edivaldofpf@gmail.com

Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2007. 11. DAVENPORT, E. S.; BAIN, E. C.; Transformation of Austenite at Constant Sub-critical Temperatures. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, v. 90, p. 117-154, 1930. 12. CALLISTER JR., W. D. PHASE DIAGRAMS. *Materials science and engineering: an introduction*. 7th ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2012. 13. JUNIOR, J. A. C.; Desenvolvimento do aço alto C-Si e Cr com matriz nanoestruturada de martensita e bainita. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. 14. LESSA, C. R. L.; Soldagem FHPP - Processo e Metalurgia nas Transformações das Fases de um aço C-Mn. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2011. 15. REED-HILL, R. E. *Physical Metallurgy Principles*. 3th ed. Boston, Mass, 1994. 16. MEHL, R. F.; Hardenability of alloy steels. ASM, Metals Park. OH, 1939. 17. REYNOLDS, W. T.; AARONSON, H. I.; SPANOS, G.; A summary of the present diffusionist views on bainite. *Materials Transaction*, v. 32, n. 8, p. 737-746, 1991. 18. KUTSOV, A.; TARAN, Y.; UZLOV, K.; KRIMMEL, A.; EVSYUKOV, M.; Formation of bainite in ductile iron. *Materials Science and Engineering: A*, v. 273-275, p. 480-484, 1999. 19. BHADESHIA, H. K. D. H. *Bainite in Steels*. 2th ed. Institute of Materials, Londres, 2001. 20. BHADESHIA, H. K. D. H.; The bainite transformation: unresolved issues. *Materials Science and Engineering: A*, v. 273-275, p. 58-66, 1999. 21. THEWLIS, G.; Classification and quantification of microstructures in steels. *Materials Science and Technology*, v. 20, p. 143-160, 2004.

PALAVRAS-CHAVE: Aços. Bainita. Microconstituinte. Transformações de Fases.

[1] Universidade Federal do Piauí, lrcs.carneiro@gmail.com
[2] Universidade Federal do Piauí, thaysbeatryce@gmail.com
[3] Universidade Federal do Piauí, naiaraoliveira2011@gmail.com
[4] Universidade Federal do Piauí, railsonmachado29@hotmail.com
[5] Instituto Federal do Piauí, laysapires10@hotmail.com
[6] Universidade Federal do Piauí, edivaldofpf@gmail.com