

## OTIMIZAÇÃO DE MICROESTRUTURA EM AÇOS DELTA-TRIP ATRAVÉS DE ALUMÍNIO E NÍOBIO\*

*Eustáquio de Souza Baêta Júnior<sup>1</sup>  
Ramon Alves Botelho<sup>2</sup>  
Leonardo Sales Araújo<sup>3</sup>  
Luiz Paulo Mendonça Brandão<sup>4</sup>*

### Resumo

O aço delta-TRIP é um conceito recente, sendo desenvolvido nos últimos dez anos com o intuito de aliar boa resistência mecânica e ductilidade. Este aço é multifásico, contendo ferritas  $\delta$  e  $\alpha$ , austenita, bainita e/ou martensita. O efeito TRIP (Transformação Induzida por Plasticidade) é influenciado pela proporção entre essas fases, que por sua vez tem relação com a quantidade dos elementos de liga. Este trabalho busca uma composição química que permita adequada proporção entre as fases, otimizando as microestruturas através de métodos computacionais. Essas microestruturas são projetadas para conter na temperatura do eutetóide entre 10% e 50% de austenita, entre 10% e 70% de ferrita alfa e entre 20% e 80% de ferrita delta. O software ThermoCalc foi utilizado para prever as frações dos microconstituintes, gráficos da variação dos elementos de liga pelas faixas de interesse dos microconstituintes foram utilizados para mapear cada condição que leva a microestrutura desejada. Resultados indicam que o volume das fases projetado é encontrado para determinadas proporções entre os elementos de liga, maiores concentrações de Al e Nb combinados com C permitem a ocorrência ou não de carbonetos e outras fases em menores quantidades.

**Palavras-chave:** Microestrutura; Delta-TRIP; Fração volumétrica de fases.

### MICROSTRUCTURE OPTIMIZATION IN DELTA-TRIP STEELS THROUGH AL AND NB

#### Abstract

Delta-TRIP steel is a recent concept and has been developed over the last ten years with the aim of allying good mechanical strength and ductility. This steel is multiphase containing  $\delta$  and  $\alpha$  ferrites, austenite, bainite and / or martensite. The TRIP (Plasticity Induced Transformation) effect is influenced by the proportion between these phases, which in turn has a relation with the quantity of the alloying elements. This work seeks a chemical composition that allows adequate proportion between the phases, optimizing the microstructures through computational methods. These microstructures are designed to contain between 10% and 50% austenite, 10% to 70% alpha ferrite and 20% to 80% delta ferrite at the eutectoid temperature. The ThermoCalc software was used to predict the fractions of the microconstituents, graphs of the variation of the alloy elements by the interest bands of the microconstituents were used to map each condition that leads to the desired microstructure. Results indicate that the volume of the designed phases is found for certain proportions between the alloying elements, higher concentrations of Al and Nb combined with C allow the occurrence or not of carbides and other phases in smaller quantities..

**Keywords:** Microstructure, Delta-TRIP, Volumetric phase fraction.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalúrgico, Mestre, Doutorando, Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ e Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro de Materiais, Mestre, Doutorando, Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ e Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, Doutor, Professor, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ e Brasil

<sup>4</sup> Engenheiro Metalúrgico, Doutor, Professor, Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ e Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Pesquisas atuais da terceira geração de aços avançados de alta resistência (AHSS, do inglês Advanced High Strength Steel) visam aumentar simultaneamente resistência e ductilidade, nos aços TRIP esses estudos buscam trabalhar microestruturas formadas por ferrita, austenita retida, bainita e/ou martensita em proporções que permitam boa conformação com produto tenaz, para aplicações que utilizam a transformação da martensita como mecanismo de absorção de energia. Na indústria automobilística, aços TRIP podem substituir os aços Dual Phase em vários componentes de um automóvel, normalmente as necessidades de conformação são decisivos na escolha. (Keeler, et al., 2014)

Os aços  $\delta$ -TRIP tem seu desenvolvimento muito recente, foram inicialmente apresentados por Chatterjee (2006) e Yi (2010) tendo como principal característica elevado teor de alumínio, com consequente estabilização da ferrita  $\delta$  em temperatura ambiente Xiong e colaboradores (2016) mostram que a produção das primeiras bobinas industriais deste aço ocorreram com sucesso, atingindo 900MPa de resistência e 28% de alongamento.

O estudo de novas composições que otimizem as frações e propriedades das fases é imprescindível visto que há muito o que se conhecer e desenvolver nessas ligas. Esquemáticamente três rotas de tratamentos térmicos são usadas para a produção desse aço, apresentadas na FIG 1. (Jacques, et al., 2001) (Bhadeshia, 2001) (Yi, 2014)

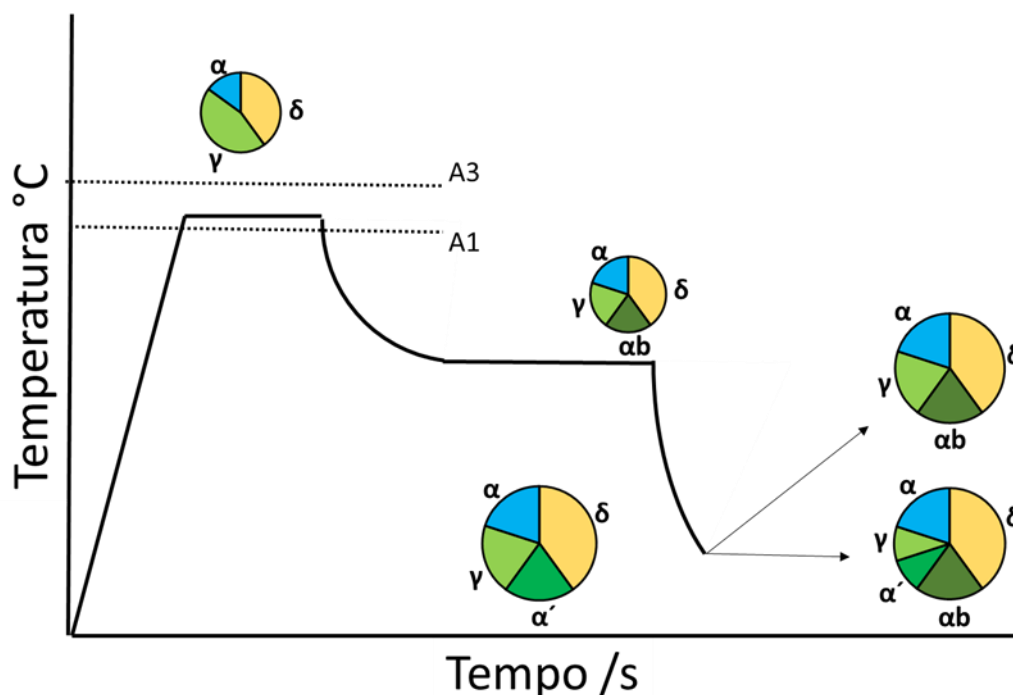


FIG 1: Esquema de tratamentos térmicos para produção de aços  $\delta$ -TRIP.  $\delta$ : ferrita delta,  $\alpha$ : ferrita alfa,  $\gamma$ : austenita,  $ab$ : bainita,  $\alpha'$ : martensita.

O recozimento dos  $\delta$ -TRIP deve ser realizado no intercrítico, que ocorre entre as linhas, A1 e A3 para hipoeutetóides e  $A_{cm}$  e A1 para hipereutetóides. Segundo Chiaverini (1986) é importante tratar o aço em temperaturas próximas de A1: nos hipoeutetóides forma-se ferrita alfa pró-eutetóide e para hipereutetóides o resfriamento lento evita a formação de cementita nos contornos de grão da

austenita. Sugimoto e colaboradores (1992) dizem que na temperatura do intercrítico, a quantidade de austenita retida torna-se máxima pois está mais enriquecida em carbono.

A diferença na quantidade de fases provenientes da austenita varia com as condições de processamento da liga, crescendo o tempo da transformação bainítica ocorre um aumento no teor de carbono da austenita, em consequência influencia também nas proporções possíveis de austenita retida que no início do enriquecimento de carbono aumenta a proporção permanecendo estável após 0,9%C enriquecido na austenita. A martensita tem sua quantidade reduzida a 0. (Jacques, 2004) A quantidade de partículas de segunda fase: Bainita, Martensita e Ferrita Alfa são de 2 a 4,5 vezes maiores que a quantidade de Austenita Retida (Sugimoto, et al., 1992)

Cada elemento presente na liga age de maneira diferente na estabilidade dos microconstituintes: carbono eleva a temperatura do intercrítico e aumenta a quantidade de austenita retida; alumínio apesar de seu caráter ferritizante inibe a precipitação de cementita, enriquecendo com carbono e consequentemente aumentando a quantidade de austenita retida; nióbio forma carbonetos que auxiliam no refino de grão, o consumo de carbono age como controlador da quantidade de austenita, sendo um elemento ferritizante; silício age de forma semelhante ao alumínio, porém em grandes quantidades modifica a tensão superficial do aço sendo deletério na galvanização; manganês forma carbonetos, aumenta a solubilidade do carbono na austenita e retarda a precipitação da perlita. (Souza, 1989) (Parish, 2000) (Chatterjee, 2006) (Kantoviscki, 2005)

O presente trabalho tem como objetivo encontrar composições químicas que permitam a produção de aços  $\delta$ -TRIP. A análise ocorre variando: carbono, alumínio e nióbio como forma de obter microestruturas com a presença de ferritas  $\delta$  e  $\alpha$ , além de austenita na temperatura do eutetóide. Estas microestruturas tem potencial para se tornarem  $\delta$ -TRIP depois de processadas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a determinação das frações molares de cada fase foi utilizado o Thermo-Calc Software TCFE6 Steels/Fe-alloy onde foram produzidos gráficos de fração de fase em volume na amostra versus temperatura, para uma melhor análise dos valores foram exportadas tabelas contendo as variadas quantidades de cada fase em todas as temperaturas.

A análise é realizada a cada 10°C, partindo de 2000°C até 500°C, o número de mols total da liga N=1 e a pressão em todos os cálculos é constante de 1.01325E5 Pa (1atm).

As fases presentes na liga foram analisadas através de gráficos relacionando frações de elementos de liga com as temperaturas. Com a composição de cada fase foi realizada a identificação das fases presentes: LIQUIDO; BCC\_A2 (ferrita total /  $\alpha$ + $\delta$ ), CEMENTITA, FASE DE LAVES, FCC\_A1#1 (austenita), FCC\_A1#2 (NbC), e M7C3.

Com o intuito de produzir curvas de contorno foram analisadas 495 composições químicas, as variações de: C que afeta fortemente as transformações de 0,00% à 1,50% em intervalos de 0,15%, abrangendo de aços IF até aços a frente do eutetóide com cementita pró-eutetóide; o Al sendo o principal elemento de liga varia de 0,00% a 8,00% em intervalos de 1,00%; Nb de 0,00% a 2,00% em intervalos de

0,50%, para o número de cálculos não ser proibitivos. Mn (0,75%) e Si (0,50%) determinados constantes em valores de aços comuns, Fe é o elemento dependente. Existem duas temperaturas importantes: a primeira é a temperatura do eutetóide que permite a nucleação da cementita nos aços hipoeutetóides e da ferrita nos hipereutetóides; a segunda é a temperatura com o mínimo de ferrita delta. Foi extraída de cada tabela a partir da primeira temperatura: quantidade de ferrita total ( $\delta + \alpha$ ) na coluna de BCC\_A2; de austenita/FCC\_A1#1 e da Fase de Laves/FASE DE LAVES e Carboneto de Níbio\FCC\_A1#2, demais carbonetos são formados por M7C3 e a partir da segunda temperatura a quantidade de ferrita  $\delta$ . Para determinar a quantidade de ferrita alfa foi subtraída a quantidade de delta da ferrita total. Desta forma os dados apresentados são Ferrita Alfa ( $\alpha$ ), Ferrita Delta ( $\delta$ ) e Austenita ( $\gamma$ ). Através dos dados de fração volumétrica das fases foram geradas 9 matrizes com % de Al constante e variações de Nb e C, além de 5 matrizes com Nb constante e variações de Al e C. Gráficos de curvas de contorno foram produzidos a partir das matrizes permitindo a identificação das faixas de interesse, neste caso, Ferrita Alfa ( $\alpha$ ) de 0,1 a 0,7, Ferrita Delta ( $\delta$ ) 0,2 a 0,8 e Austenita ( $\gamma$ ) 0,1 a 0,5.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A otimização dos elementos de liga é fundamental para que um aço seja multifásico tenha determinadas proporções fases, propiciando a microestrutura desejada. Os gráficos calculados de frações de fase por temperatura são basicamente de três tipos diferentes, de acordo com a proporção entre os elementos de liga: maior proporção de carbono e/ou baixa liga, onde a ferrita delta é totalmente consumida pela austenita; valores médios de carbono e elementos de liga que possibilitam a formação de certa quantidade de ferrita delta e austenita; baixo carbono e elevado teor de elementos de liga que não permitem formação de austenita.

Na FIG 2 é verificado que a ferrita delta formada próxima aos 1500°C é rapidamente consumida pela austenita: A) temperatura de mínimo de delta (1250°C); B) Volume mínimo de ferrita  $\delta$  (0,30) VPV. Conforme ocorre a diminuição da temperatura em equilíbrio é formada ferrita pró-eutetóide. C) No ponto antes da nucleação da cementita é determinada a temperatura do eutetóide. Nesta temperatura são coletadas as frações de D) austenita (0,28) E) ferrita total (0,71). Além das demais fazes nos casos em que ocorrem.

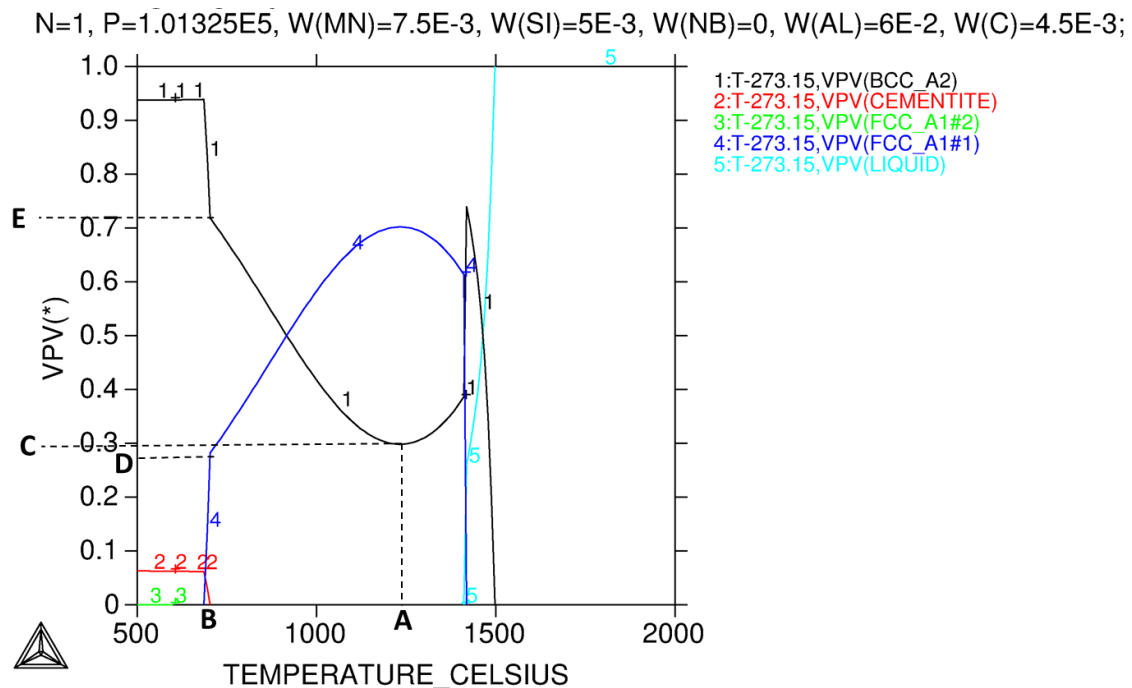


FIG 2: Três aços com proporções diferentes de elementos de liga. A) temperatura de mínimo de ferrita delta, B) temperatura do eutetóide, C) fração volumétrica de ferrita delta, D) fração volumétrica de austenita (E) fração volumétrica de ferrita total.

Os gráficos de contorno para as 5 matrizes com Nb fixo e 9 matrizes com Al fixo são apresentadas nas FIG 3 e FIG 4. Ferrita Alfa em ciano varia de 0,1 VPV à 0,7 VPV, Ferrita Delta em amarelo varia de 0,2 VPV à 0,8 VPV e Austenita em verde varia de 0,1 VPV a 0,5 VPV. As regiões de interesse estão em azul escuro, nelas é possível formar microestruturas que contemplem as faixas acima, compatíveis às dos aços TRIP modernos.



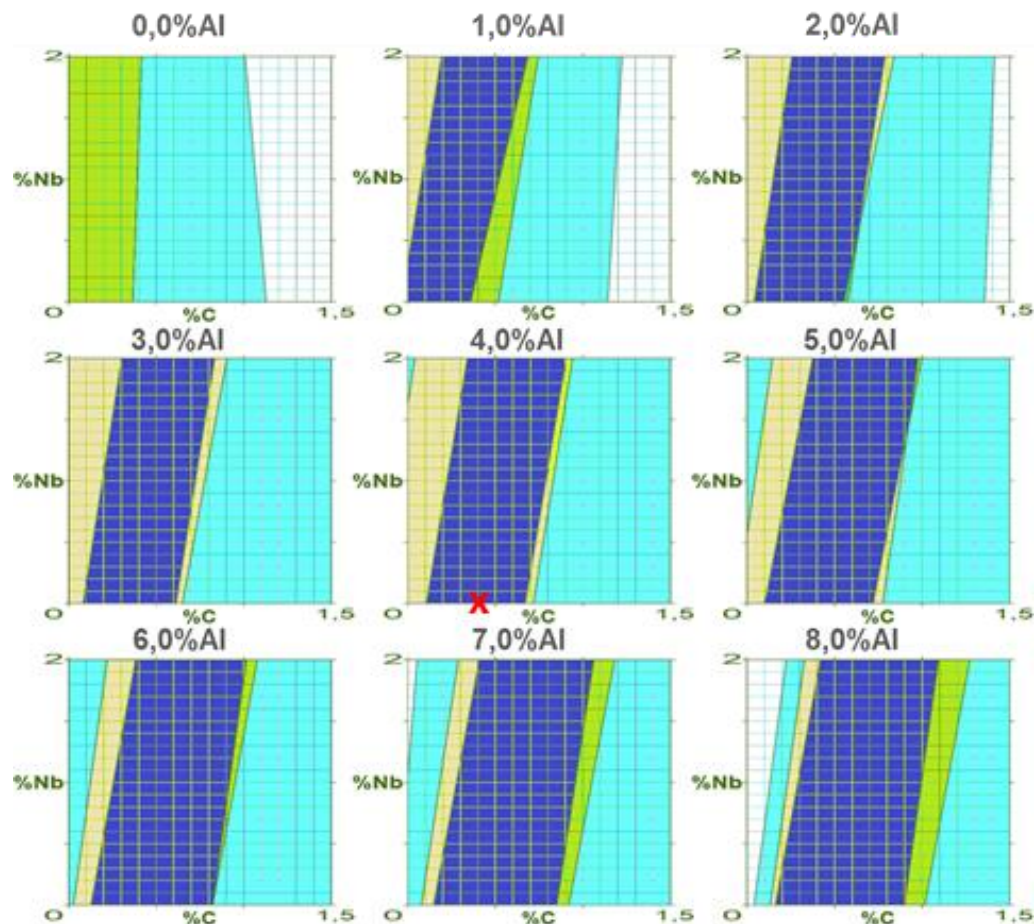


FIG 3: Fases de interesse para condições de alumínio constante. Ciano/Ferrita Alfa, Verde/Austenita, Amarelo/Ferrita Delta, Azul Escuro/Região de Interesse.

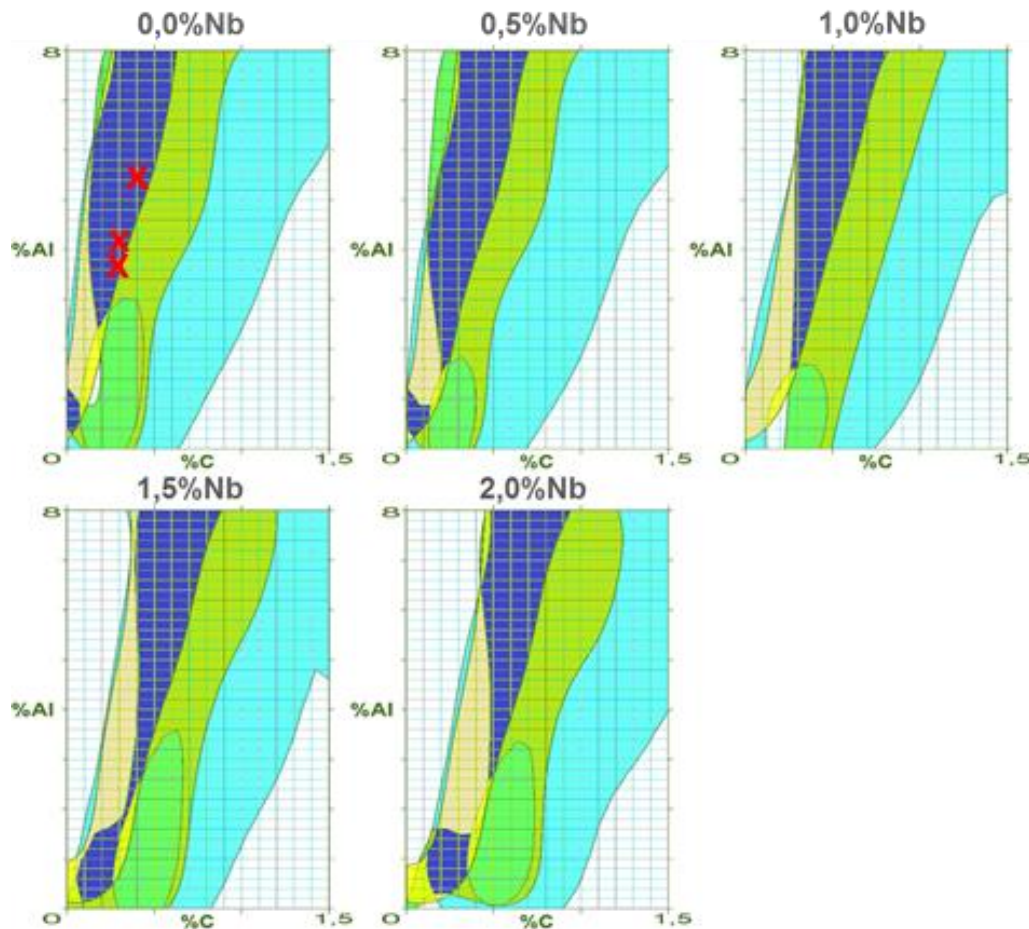


FIG 4: Fases de interesse para condições de nióbio constante. Ciano/Ferrita Alfa, Verde/Austenita, Amarelo/Ferrita Delta, Azul Escuro/Região de Interesse.

Dentro da faixa de interesse de cada microconstituente existe uma variação conforme a quantidade de cada elemento de liga, as menores proporções dos elementos possibilitam as maiores variações nas frações de fases, que pode ser verificado em baixas concentrações de Al e C, para Nb a mudança é mais suave. Quanto maior a quantidade de Al e Nb mais deslocadas no sentido de maior quantidade de carbono aparecem as microestruturas, permitindo também maior variação de C na liga.

O aumento do teor de carbono possibilita acréscimo da fase austenita, diminuindo a ferrita total. A quantidade de ferrita delta é inversamente proporcional a quantidade de carbono, fazendo com que a fração de ferrita alfa aumente com o acréscimo de carbono, passando por um máximo e volte a diminuir.

As composições marcadas em azul escuro permitem a confecção de aços multifásicos com proporções de fases variadas, a produção da microestrutura deve estar alinhada à rotas termomecânicas que combinem recozimento, deformação, austêmpera, tempera e revenimento. É possível produzir microestruturas ferrita delta entre 20% e 80% e ferrita alfa entre 10 e 70%, a austenita (entre 10% e 50%) poderá se transformar através do processamento em ferrita alfa, austenita retida, bainita e martensita. Os pontos marcados em vermelho são as composições já fundidas por Yi (2010) e Jung (2011) nas mesmas proporções indicadas nos cálculos, validando o método para estas ligas.

#### 4 CONCLUSÃO

Adição de Al amplia a faixa de coexistência simultânea de  $\delta$ ,  $\gamma$  e  $\alpha$ . Adições de Nb e Al nesses aços requerem maiores teores de C, que se adicionado propicia a formação de precipitados conforme o equilíbrio do carbono disponível para formação de  $\gamma$ ; Nb, apesar de ter caráter ferritizante mais forte que Al, forma NbC. Efetivamente só estabiliza ferrita após o Carbono entrar em equilíbrio entre NbC e  $\gamma$ . As composições marcadas em azul escuro permitem a confecção de aços multifásicos que contenham ferrita  $\delta$ . As ligas reportadas na literatura como aços  $\delta$ -TRIP estão na região de interesse.

## Agradecimentos

À CAPES e CNPQ pelo financiamento da pesquisa e ao Laboratório de Propriedades Mecânicas da COPPE/UFRJ pela disponibilização do software.

## REFERÊNCIAS

- 1 Andersson JO, Helander T, Höglund L, Shi PF, and Sundman B. Thermo-Calc and DICTRA, Computational tools for materials science. Calphad 2002, 26, 273-312.
- 2 Bhadeshia HKDH. Bainite in Steels. Londres IOM Communications, 2001.
- 3 Chatterjee S. Transformations in TRIP-assisted Steels: Microstructure and Properties. Cambridge: Darwin College, University of Cambridge, 2006.
- 4 Chiaverini V. Tecnologia mecânica. São Paulo: McGraw-Hill, 1896.
- 5 Jacques PJ, Girault E, Mertens A, Verlinden B, Humbeeck J, Delannay F. The Developments of Cold-rolled TRIP-assisted Multiphase Steels. Al-alloyed TRIP-assisted Multiphase Steels. ISIJ Internacional. 2001: Vol. 41. - pp. 1068-1074.
- 6 Jacques P.J. Transformation-induced plasticity for high strength formable steels. Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2004. - pp. 259-265.
- 7 Jung GS Spot Weldability of TRIP Steel with High Carbon, High Aluminium Content. Pohang: Pohang University of Science and Technology, 2011
- 8 Kantovicki AR, Caracterização Mecânica e Microestrutural de Aços de alta resistencia e baixa liga TRIP 800. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2005.
- 9 Keeler S, Kimchi M. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0: WorldAutoSteel, 2014.
- 10 Parish CM, Fundamental Study of Phase Transformation in Si-Al TRIP Steels: North Carolina State, 2000.
- 11 Souza AS, Composição Química dos Aços. São Paulo: Blucher, 1989.
- 12 Sugimoto K, Usui N, Kobayashi M, Hashimoto SI. Ductility and Strain-Induced Transformation in a High-Strength Transformation-Induced Plasticity-Aided Dual-Phase Steel. Metallurgical and Materials Transactions A, 1992, Vol. 23.
- 13 Thermo-Calc Software-S TCFE6 Steels/Fe-alloys database (accessed 29 Junho 2016)
- 14 Xiong XC. Sun L, Wang JF, Jin XY, Wang L, Xu BY, Chen P, Wan GD, Yi HL. Properties assessment of the first industrial coils of low-density duplex  $\delta$ -TRIP steel. Materials Science and Technology. Taylor e Francis, 2016.
- 15 Yi HL. Review on  $\delta$ -Transformation-Induced Plasticity (TRIP) Steels with Low Density: The Concept and Current Progress. JOM. 2014. Vol. 66.
- 16 Yi Hongliang  $\delta$ -TRIP Steel - Pohang : Pohang University of Science and Technology, 2010.