

INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO NA OBTENÇÃO DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO DUAL PHASE¹

*

Flávia Tereza dos Santos Fernandes Tolomelli¹

Andersan dos Santos Paula²

Heitor João Bosco Nogueira³

Juan Carlos Sacramento de Souza⁴

Resumo

Neste trabalho é investigada a influência de 4 taxas de resfriamento na obtenção da microestrutura e propriedades de um aço de alta resistência avançado, “AHSS” da classe “dual phase”. Os meios utilizados para obtenção destas taxas de resfriamento foram água, ar forçado, ar ambiente e óleo. A composição química da liga utilizada para elaboração do trabalho corresponde a um aço baixo carbono com adição de Mn, Si, Cr, Mo e Nb. Os experimentos foram realizados em escala piloto, em forno tipo mufla, a partir de amostras obtidas da produção em escala industrial. As microestruturas e propriedades obtidas são compatíveis com a de um aço dual phase da classe DP1000.

Palavras-chave: AHSS; DP 1000; Dual Phase

THE COOLING RATE EVALUATION ON MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF A DUAL PHASE STEEL

Abstract

Four kinds of cooling rates are investigated to obtain both mechanical properties and microstructure of an advanced high strength steel named dual phase steel. The steel chemical composition used in this paper it's related with microalloying addition of Mn, Si, Cr, Mo and Nb. The kinds of cooling rates used was water, oil, enviromental air and forced air. The experiments were made in pilot scale, in mufla furnace, from samples obtained of production plant. Both, chemical composition and microstructure, are compatible with a DP1000 steel.

Keywords: Palavras-chave em inglês, separadas por ponto e vírgula (;) e iniciadas com letra maiúscula. Recomenda-se que sejam evitadas as traduções literais.

¹ *Engenheira Metalurgista, MSc, Especialista em Desenvolvimento de Produtos da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil. Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais (PGCM), Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais (SE/4), Instituto Militar de Engenharia (IME). Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Eng. Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Professora Associada dos cursos de Graduação e PGCM, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

³ *Técnico em Eletrônica. Técnico de Desenvolvimento da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Volta Redonda, RJ, Brasil.*

⁴ *Técnico Metalurgista. Técnico de Desenvolvimento da CSN. Volta Redonda, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Com o aquecimento da economia e o setor automotivo em alta, crescem as demandas por aços de alta resistência avançados destinados às mais variadas aplicações, onde merecem destaque as peças que são destinadas às regiões dianteira e traseira dos veículos (regiões com necessidade de maior absorção de energia em eventos de colisão) bem como as peças que são destinadas às regiões do seu habitáculo, denominado célula de sobrevivência (região onde não se objetiva a ocorrência de tais deformações). Quando o assunto é aumento de segurança veicular, os aços da classe dual phase (com limite de resistência acima de 980 MPa), bem como os aços de estampagem a quente (PHS) e os aços martensíticos (MS) entram em cena, formando o trio dos aços de mais alta resistência mecânica utilizados na célula de sobrevivência dos veículos, cuja função é garantir sua integridade com preservação da vida dos ocupantes dos veículos, em eventuais eventos de colisão. Os aços “dual phase” (DP como são conhecidos), são aços que se caracterizam por apresentar uma matriz de fase ferrítica com a presença de uma fase dura, a martensita, na forma de ilhas dispersas que se formam durante o resfriamento rápido do aço a partir da temperatura de recozimento no campo intercrítico de coexistência entre as fases ferrita e austenita ($\alpha+\gamma$) ou a partir do seu estado austenítico [1]. Devido ao processo de produção, pequenas quantidades de perlita, bainita e austenita retida podem estar presentes na microestrutura após completo resfriamento. Segundo Gorni, [2], a microestrutura bifásica com seu arranjo particular de ilhas duras dispersas numa matriz macia, apresentam as seguintes características que lhe conferem boa conformabilidade: escoamento contínuo, isto é, ausência de patamar de escoamento, alto coeficiente de encruamento n , variando de 0,2 a 0,3, valores de limite de escoamento entre 400 e 600 MPa e elevados valores de limite de resistência a partir de 600 MPa. Para obtenção de elevadas propriedades de resistência nos aços dual phase, é necessária a adição de elementos de liga aos aços. Esses elementos de liga desempenham um papel fundamental por aumentarem a temperabilidade do aço, isto é, aumentarem sua resistência mecânica. Os elementos carbono, manganês, cromo e molibdênio são efetivos em aumentar a temperabilidade dos aços. A presença desses elementos retarda as transformações por difusão, o que significa que as curvas CCT se deslocam para a direita e isso reduz a taxa de resfriamento crítica para obtenção da martensita [3]. As temperaturas de encharque tratamento também são um fator determinante na obtenção da microestrutura bifásica, assim como os tempos de encharque e as taxas de aquecimento e resfriamento. Nesse contexto, diversas equações empíricas foram desenvolvidas com o objetivo de se determinar o início e o fim das transformações de fase. As fórmulas para os cálculos teóricos das temperaturas Ac_1 e Ac_3 que delimitam esse campo intercrítico, podem ser vistas nas equações empíricas 1 e 2.

$$Ac_3(^{\circ}C) = 937,3 - 224,5\%C - 17\%Mn + 34\%Si - 14\%Ni + 21,6Mo + 41,8V - 20\%Cu \quad [4] \text{ Eq.1}$$

$$Ac_1(^{\circ}C) = 739 - 22,8\%C - 6,8\%Mn + 18,2\%Si + 11,7\%Cr - 15\%Ni - 6,4\%Mo - 5\%V - 28\%Cu \quad [4] \text{ Eq.2}$$

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização desse trabalho foi utilizado um aço cuja composição química é mostrada na tabela 1. A liga foi obtida em escala industrial, em conversor LD, seguido de tratamento em forno panela, lingotamento, laminação a quente e a frio nas instalações industriais da Companhia Siderúrgica Nacional. O aço laminado a frio, industrialmente, foi processado em um laminador de tiras a frio de 5 cadeiras, partindo de uma espessura de 3,50 mm até 1,50 mm, o que resultou em um percentual de redução a frio de 57%.

Tabela 1 – Composição Química aço DUAL PHASE 1000 (%em peso)*

C	Mn	S	P	Si	Cr+Mo	Nb
0,12	>1,6	0,010	>0,020	>0,1	<0,5	>0,014

*Demais elementos da composição como residuais do processo de fabricação.

A partir de amostras da chapa laminada a frio, foram realizados tratamentos térmicos adotando-se quatro meios de resfriamento na execução desse trabalho: a) água a temperatura ambiente, b) ar forçado (por meio de ventiladores), c) ar ambiente e d) óleo a temperatura ambiente. O objetivo da utilização desses meios de resfriamento, foi levantar uma estimativa da faixa de taxa de resfriamento mais apropriada à obtenção de uma microestrutura constituída por ferrita e martensita, que é característica dos aços DUAL PHASE resultando de um limite de resistência típico dos aços DP1000, ou seja 1000 MPa. As taxas de resfriamento obtidas estão apresentadas no gráfico 1. Após o levantamento dessas taxas, foram escolhidas duas taxas de resfriamento para dar prosseguimento ao tratamento: ar ambiente e óleo. Com base nos cálculos das temperaturas intercríticas Ac1 (727°C) e Ac3 (834°C) por meio de equações empíricas [4], o procedimento consistiu no aquecimento de amostras individuais até 790°C, encharque por 3 min, seguida da retirada da amostra do forno de recozimento, contado um tempo de espera que variou de 2s até 104s, a partir do qual as amostras sofreram resfriamento em óleo. Após avaliação dos resultados obtidos com o emprego das taxas acima citadas obtidas através dos meios de resfriamento ar ambiente, óleo, ar forçado e água, adotou-se para a realização desse trabalho, o resfriamento inicial ao ar (correspondente aos tempos de espera de 2s a 104s) seguido de resfriamento em óleo. Para revelação das microestruturas foi utilizado ataque de nital 3% com 8s de imersão e posterior lavagem com álcool e secagem das amostras com secador e observação em microscópio ótico da marca Zeiss, modelo AXIOPHOT e microscópio eletrônico de varredura MEV tipo FEG. Para verificação das propriedades mecânicas, foi realizado ensaio de tração em máquina Instron de 25t. O ensaio foi realizado na base de medida 80mm com velocidade antes do limite de escoamento (T.0,2%) igual a 1,8mm/min e velocidade após limite de escoamento de 10 mm/min.

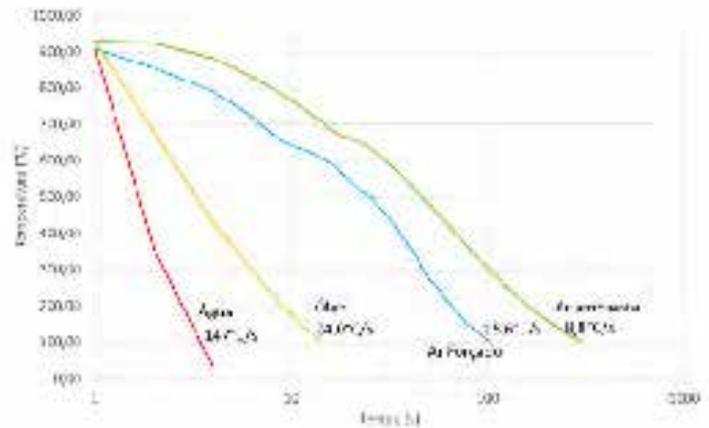


Gráfico 1 – Influência das taxas de resfriamento na obtenção de microestrutura de um aço DUAL PHASE

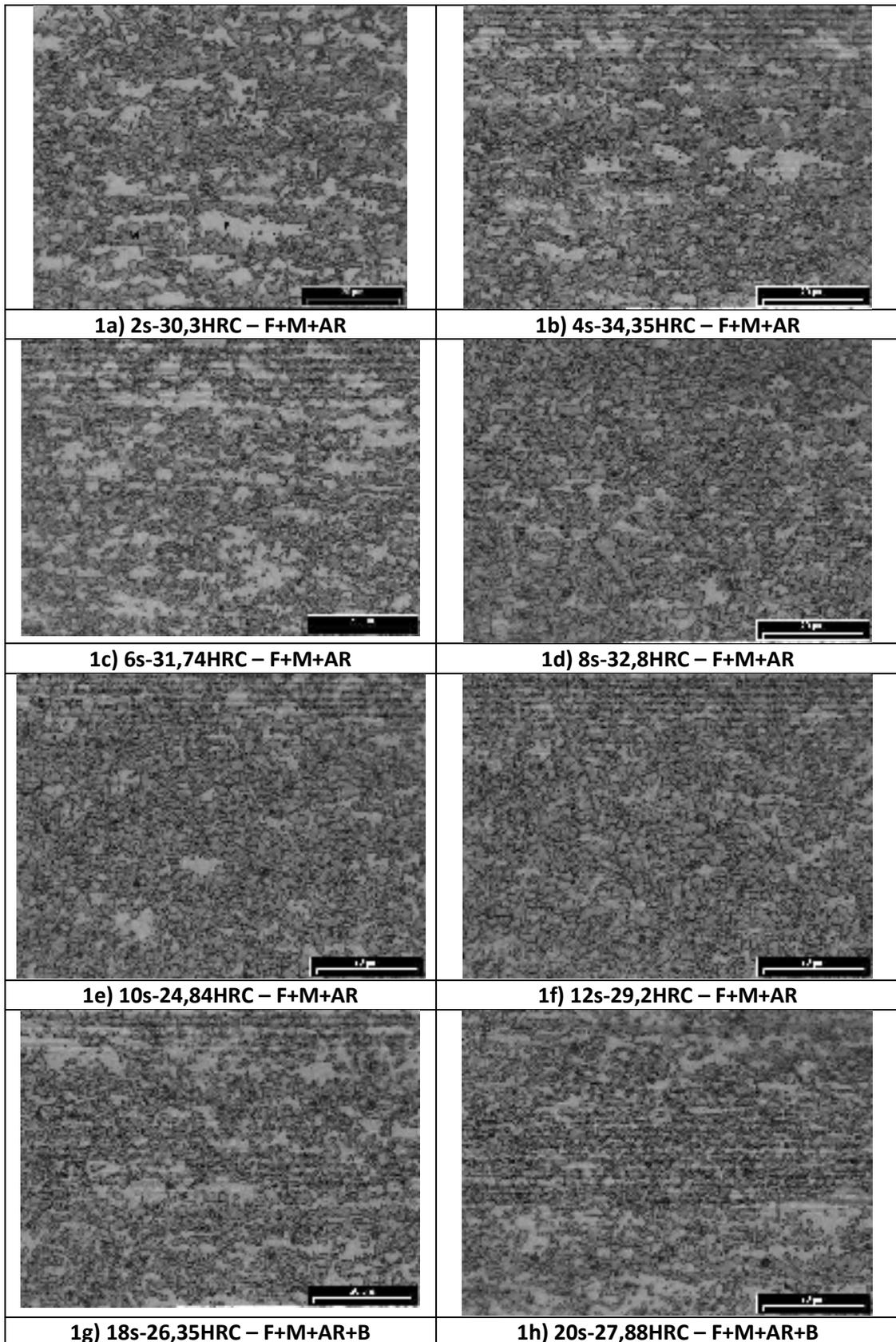
3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1- Tratamento Térmico e Microestruturas Obtidas

Um tratamento intercrítico na temperatura de 790°C, encharque de 3 min e posterior resfriamento ao ar (tempo de espera) em intervalos de tempo variando de 2s a 104s, seguido de resfriamento em óleo, foi realizado com o objetivo de se verificar através de análise metalográfica, as possíveis alterações ocorridas na microestrutura formada para essa condição de tratamento. O objetivo final da realização desses tratamentos foi a obtenção de uma microestrutura bifásica, conforme já citado anteriormente. Em função dos tempos de espera adotados as amostras foram divididas em 3 grupos para os quais seguem os comentários referentes às microestruturas obtidas.

3.1.1-Tratamento térmico – primeiro grupo de amostras

No primeiro grupo de amostras tratadas, houve variação do tempo de espera de **2s a 26s** após recozimento a 790°C por 3min, seguido de resfriamento rápido em óleo. Na figura 1, imagens de microscopia ótica 1a até 1j, podem ser evidenciadas as presenças das fases clara (ferrita) e da fase cinza (martensita), identificadas com as letras F e M respectivamente. Alguns raros pontinhos pretos observados nessas imagens, correspondem à formação de carbonetos. Nas imagens de MEV que se seguem a ferrita é a fase de fundo na cor escura, identificada pela letra F, a martensita (M) é a fase em mosaico de alto relevo e a fase branca brilhante é austenita retida (AR).



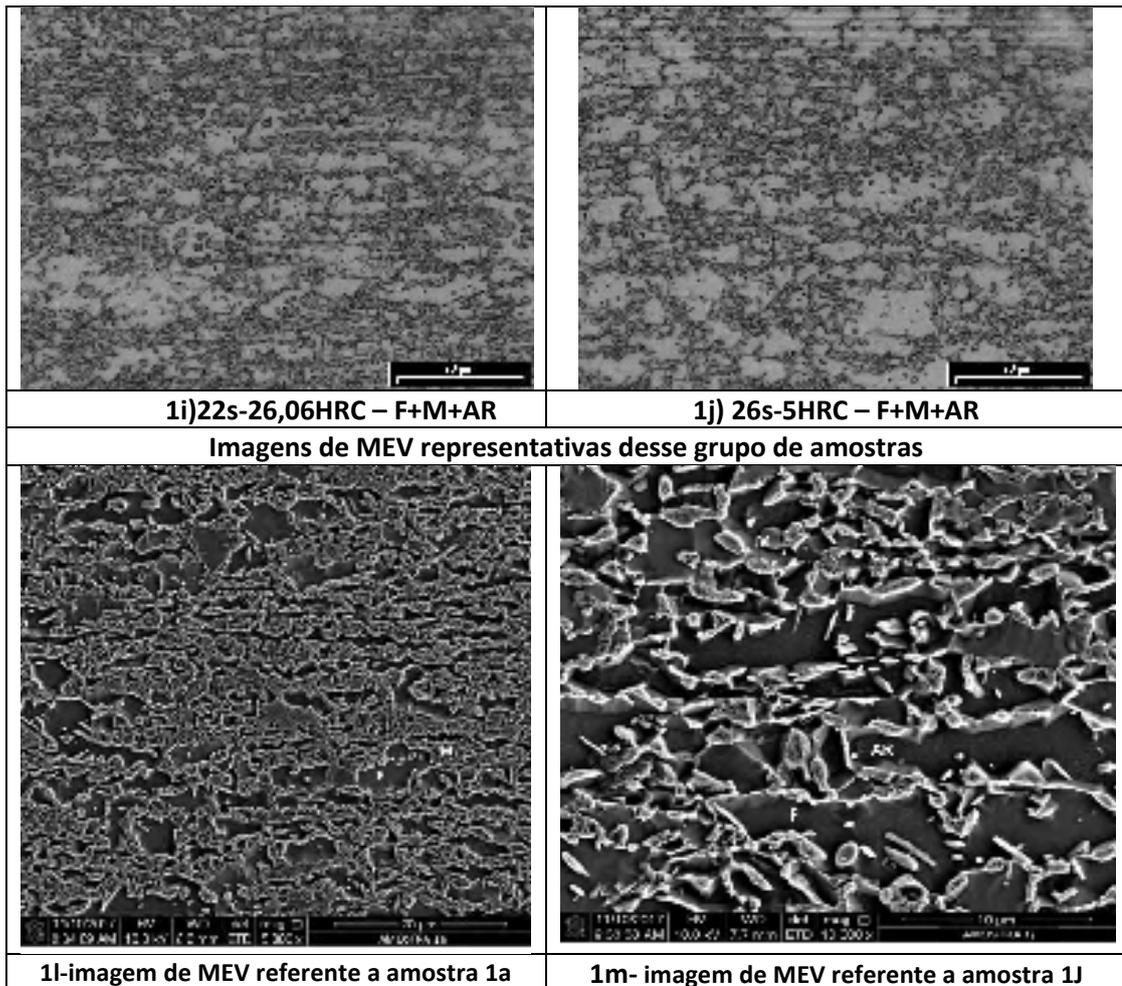


Figura 1 – Microestruturas obtidas após processo de aquecimento de aço DP a 790°C com 3 min de encharque seguido de tempo de espera variando entre 2s e 26s e resfriamento brusco em óleo após este tempo de espera.

A microestrutura inicial obtida, figura 1a), com resfriamento a partir da temperatura de 790°C, (após encharque de 3min, tempo de espera de 2 segundos (ao ar), seguida do resfriamento rápido em óleo), foi uma microestrutura formada por ferrita (F), martensita (M) e austenita retida (AR), para a qual a dureza obtida foi da ordem de 30,6 Rockwell C (HRC). Com o aumento do tempo de espera (4s até 26s), após retirada da amostra do forno, à 790°C, (figuras 1b até 1j), foi observada de maneira geral (apesar das flutuações), uma diminuição gradativa da dureza HRC, gráfico 2, o que é traduzida na microestrutura como um aumento da fração da fase ferrita (fase clara) e diminuição da quantidade relativa da fração da fase martensita (fase escura). Porém não houve alteração no tipo de fase observada, continuando-se com a presença de ferrita, martensita e austenita retida na microestrutura. De maneira geral, para esse primeiro grupo de amostras tratadas, com tempo de espera variando entre 2 a 26s, observou-se uma diminuição da fração de martensita com aumento da fração de ferrita o que foi acompanhado por uma diminuição no valor da dureza HRC. A variação da dureza HRC com o tempo pode ser ilustrado no gráfico 2.

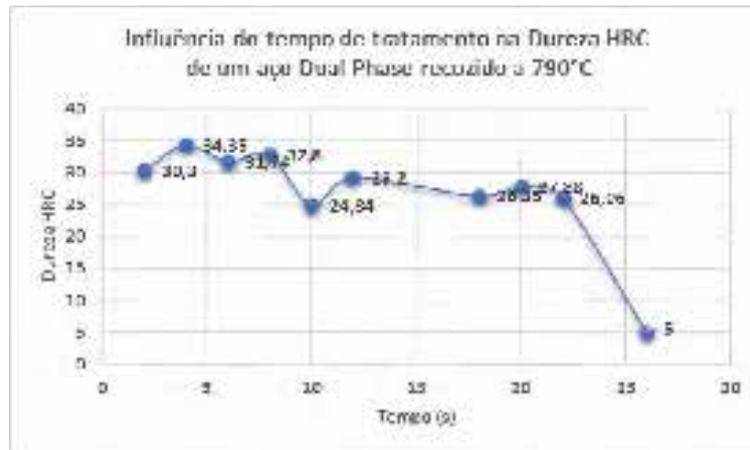
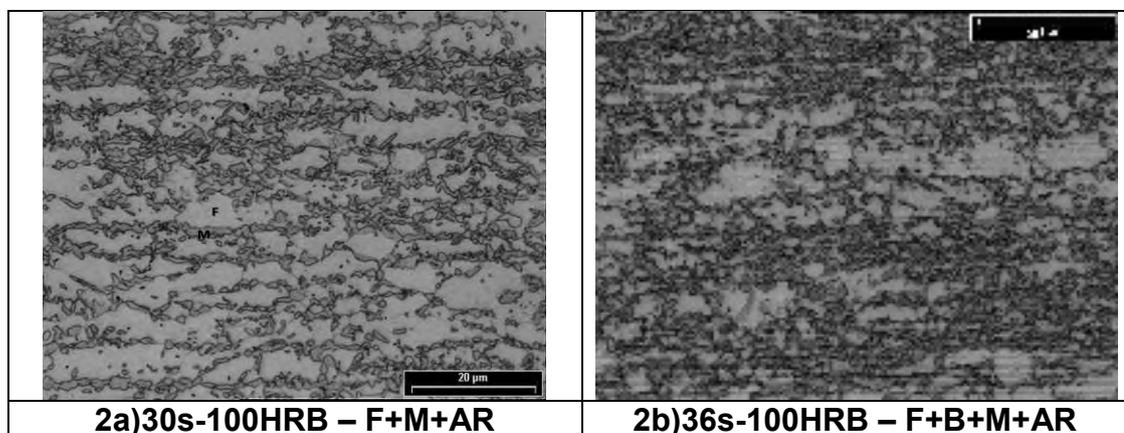


Gráfico 2 – Influência do tempo de tratamento na dureza de um aço dual phase tratado a 790°C com tempos de espera de 2 a 26s após retirada da amostra do forno, seguido de resfriamento rápido em óleo.

3.1.2-Tratamento térmico – segundo grupo de amostras

No segundo grupo de amostras tratadas, houve variação do tempo de espera de 30s a 58s após recozimento a 790°C por 3min, seguido de resfriamento rápido em óleo. Com a continuidade do tratamento, iniciado no item 3.1.1, aumentando o tempo de espera, para 30 a 58s, seguido de resfriamento rápido em óleo, foi novamente observado uma queda na dureza, a qual passou da escala HRC para a escala HRB, e como evidenciado nas figuras 2a até 2h, houve o aparecimento de uma nova fase na microestrutura, a bainita (B), fase mais preta, em quantidades discretas, além da presença de ferrita (F), martensita (M) e austenita retida (AR), já obtidas na primeira fase do tratamento. A figura 2 mostra a evolução da microestrutura obtida com o aumento do tempo de espera seguido de resfriamento rápido em óleo. A presença da bainita foi evidenciada mais notadamente nas figuras 2b, 2c, 2e e 2f. As imagens de MEV 2g e 2h são correspondentes às imagens de microscopia ótica 2e e 2f respectivamente. O gráfico 3 mostra a variação da dureza HRB com o tempo de espera seguido de resfriamento em óleo.



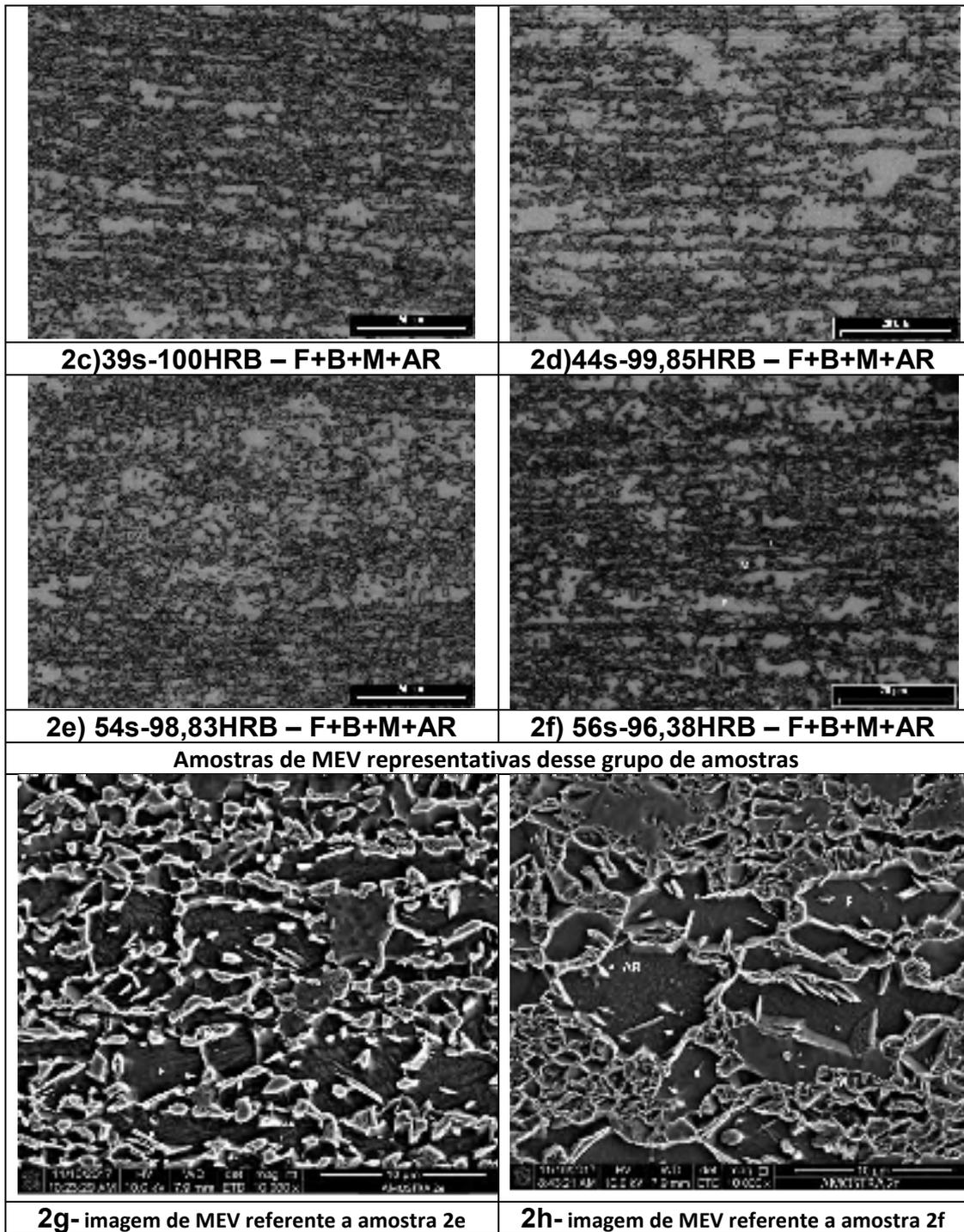


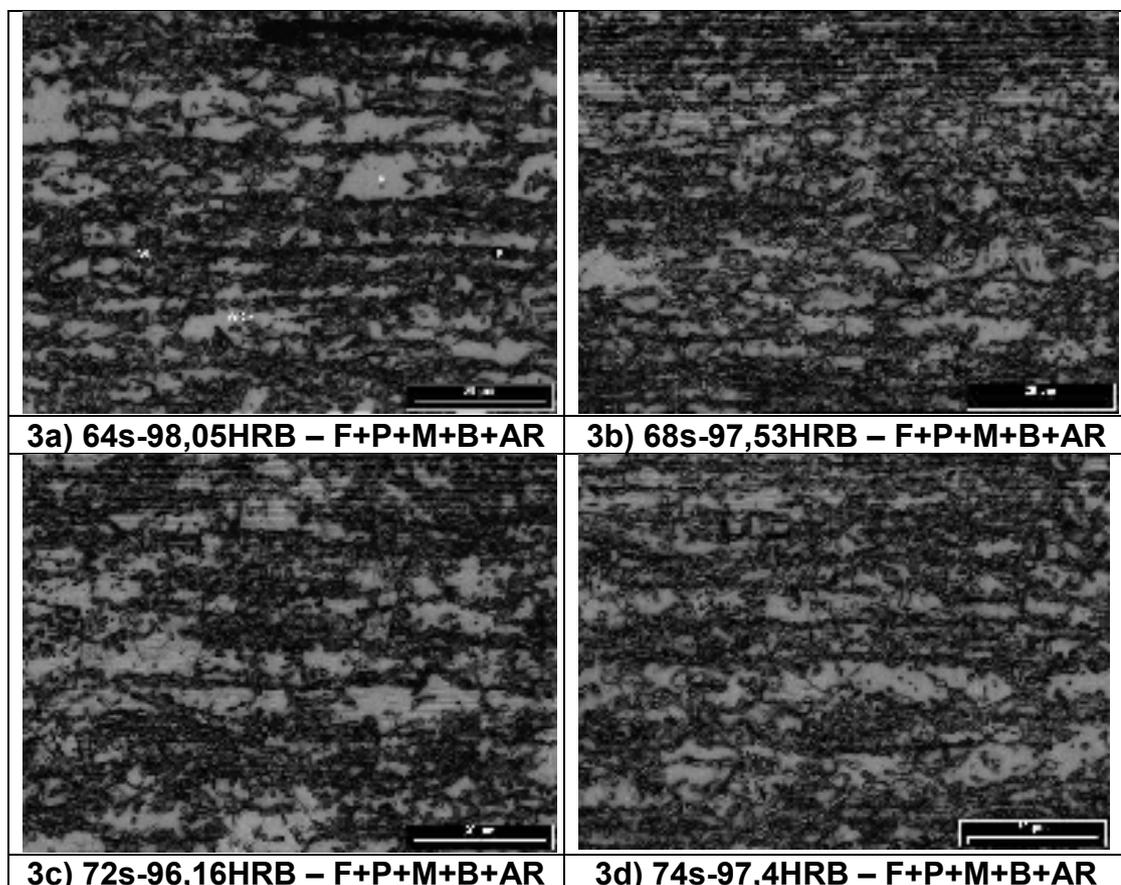
Figura 2 - Microestruturas obtidas após processo de recozimento do aço DP a 790°C seguido de tempo de espera variando entre 30s e 58s e resfriamento brusco em óleo após esse tempo de espera.



Gráfico 3 – Influência do tempo de tratamento na dureza de um aço dual phase tratado a 790°C com tempos de espera de 30 a 58s após retirada da amostra do forno, seguido de resfriamento rápido em óleo

3.1.3-Tratamento térmico – terceiro grupo de amostras

A terceira e última etapa do experimento consistiu em aumentar-se ainda mais o tempo de espera para 74 a 104s, a partir da temperatura de 790°C, seguida de resfriamento rápido em óleo para verificar o que aconteceria com a microestrutura. A expectativa era que aparecesse mais uma fase na microestrutura, a fase perlita, a qual se forma para longos tempos de tratamento em temperaturas acima de 560°C. Os resultados obtidos podem ser vistos na figura 3. As imagens de MEV 3i e 3j são correspondentes às imagens de microscopia ótica 3a e 3f respectivamente.



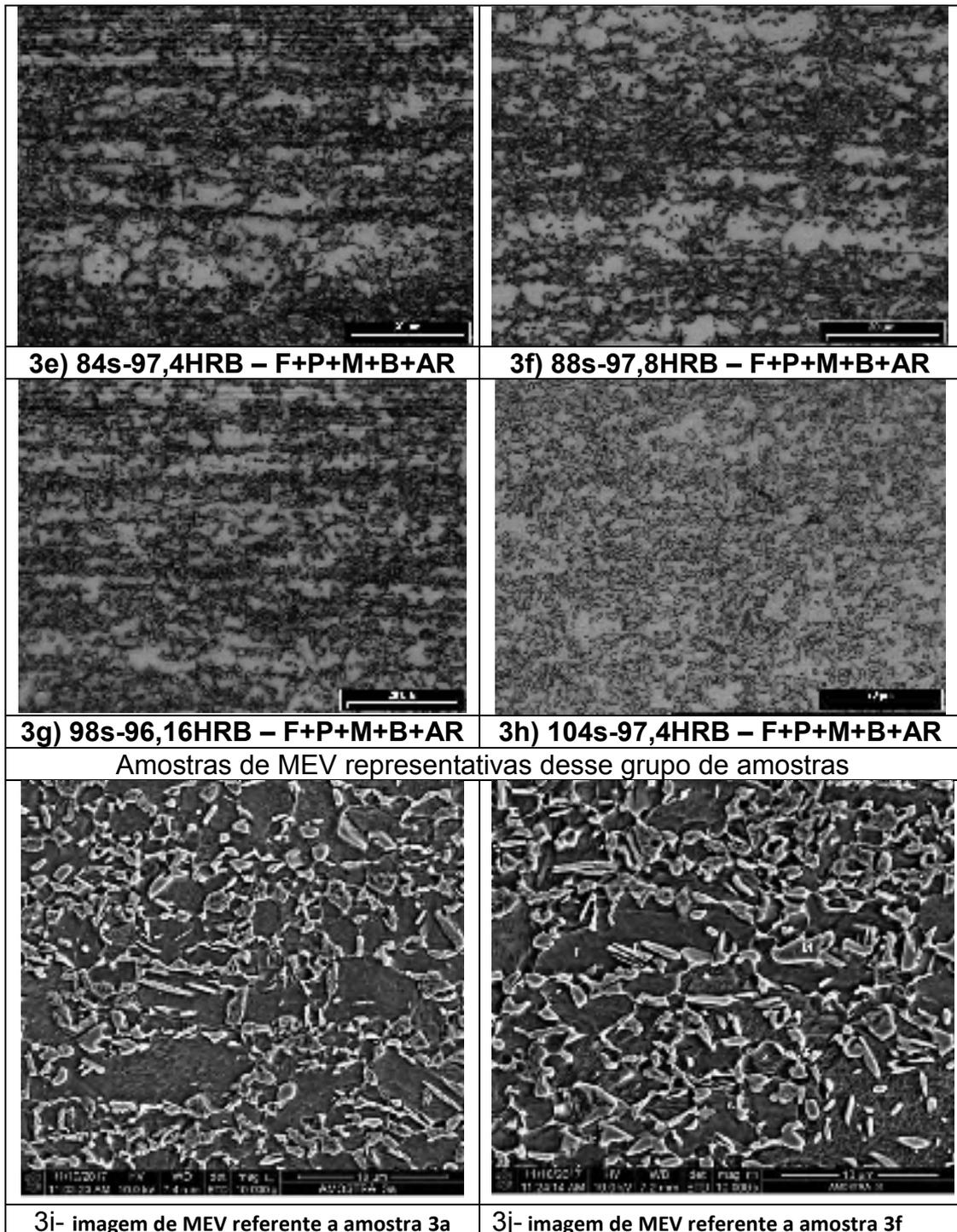


Figura 3 - Microestruturas obtidas após processo de recozimento do aço DP a 790°C seguido de tempo de espera variando entre 64s e 104s e resfriamento brusco em óleo após esse tempo de espera.

3.2- Curvas CCT versus microestruturas obtidas

Em função dos resultados de microestrutura obtidos, procurou-se na literatura um tipo de curva CCT que mais se aproximasse da situação encontrada nesse trabalho. A figura 4 mostra o tipo de curva mais próxima a essa situação. Pelos resultados obtidos em termos de microestrutura, acredita-se que a curva CCT do material em questão,

apresente um perfil muito semelhante ao da curva CCT de um aço baixo carbono microligado ao Nb com adições de Cr, Mo e Ni apresentado na figura 4a onde foi realizada uma adaptação na escala do tempo total de 10^6 s para $1,2 \times 10^2$ s, figura 4b. Nessa figura 4b, foram plotados os tempos de espera a partir da temperatura de 790°C seguido do resfriamento rápido em óleo, representados pelas linhas tracejadas e também a taxa de resfriamento média obtida, representada pelas linhas cheias em laranja. Isto é, no início do tratamento, para os baixos tempos de espera, a taxa de resfriamento global se aproximou mais da taxa de resfriamento do óleo que é de $\sim 22^\circ\text{C/s}$ ao passo que para os maiores tempos de espera, a taxa de resfriamento global obtida se aproximou mais da taxa de resfriamento ao ar. Dessa forma, para os tempos intermediários, adotou-se uma taxa de resfriamento média entre essas duas taxas de resfriamento ao óleo e ao ar em torno de 15°C/s . No primeiro grupo de amostras, tratadas com tempo de espera variando entre 2 a 26s, correspondentes às linhas tracejadas vermelhas, obteve-se uma taxa de resfriamento final correspondente a aproximadamente 20°C/s . No segundo grupo de amostras tratadas (linhas tracejadas verdes) correspondentes aos tempos de espera variando de 30 a 58s, obteve-se uma taxa de resfriamento final intermediária, correspondente a $\sim 15^\circ\text{C/s}$. E no terceiro grupo de amostras tratadas (linhas tracejadas azuis), correspondentes aos tempos de espera variando de 64 a 104s, a taxa de resfriamento final obtida foi de aproximadamente 8°C/s . Uma confirmação sobre o perfil real da curva CCT desse aço precisará ser realizado com ensaio em dilatômetro de têmpera com taxas de resfriamento variando de $0,5^\circ\text{C/s}$ até 100°C/s e a mesma já se encontra em andamento para confirmação desse resultado obtido de forma comparativa. O objetivo dessa comparação foi uma alternativa de explicar melhor o fenômeno observado na microestrutura com a variação do tempo de espera e com o resfriamento rápido que se seguiu em óleo.

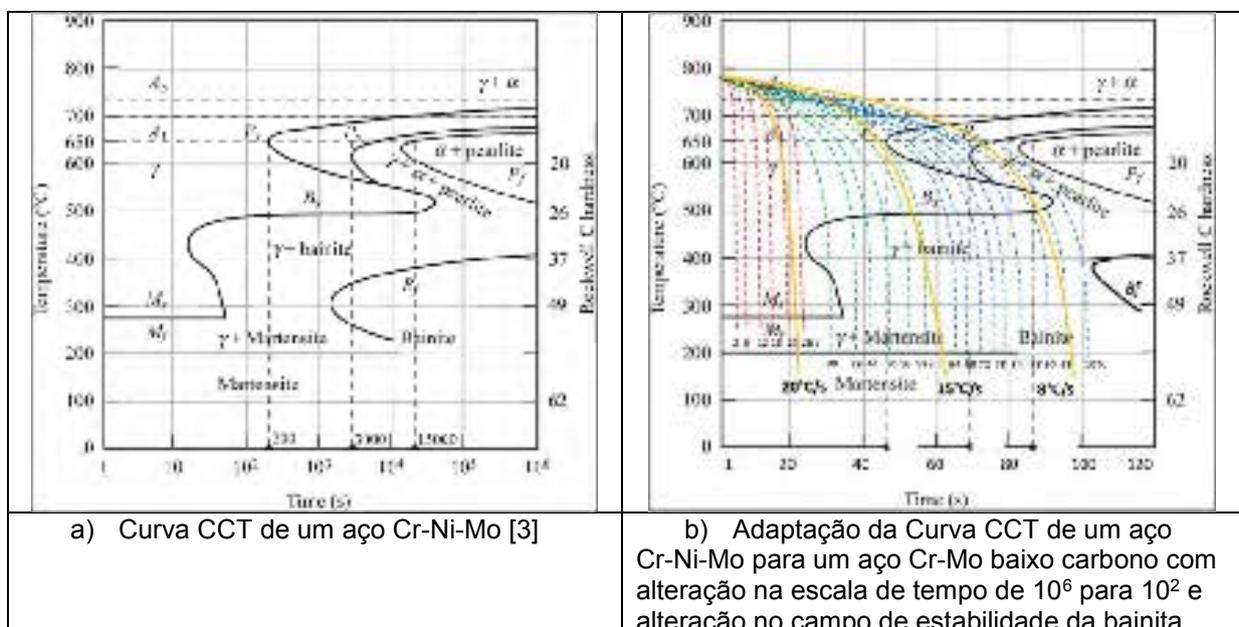


Figura 4 – Curva CCT de um aço com adição de Cr-Ni-Mo. Em a) curva CCT do aço original Cr-Ni-Mo. Em b) adaptação da curva original com alteração da escala de tempo e do campo de estabilidade de fase bainita

3.3 - Resultados de propriedades Mecânicas das amostras tratadas em escala piloto

Para as referidas condições de ensaio foram retiradas algumas amostras e foram realizados ensaios de tração cujos resultados obtidos são mostrados na tabela 2. Observa-se que houve uma diminuição do limite de resistência do aço à medida que o tempo de espera foi aumentado de 2s para 104s correspondentes às amostras 1a até 1h, 2a até 2f e 3a até 3f. Esse fato é justificado pela uma diminuição na dureza e uma diminuição na fração de martensita formada. Foi ainda verificado o surgimento das fases bainita e perlita na microestrutura as quais apresentam durezas menores comparativamente à dureza da martensita.

Tabela 2 - Resultados de propriedades mecânicas obtidos em escala piloto

Amostras	Espessura (mm)	$R_{m0,2\%}$ (MPa)	T.MÁX. (MPa)	Alongamento %	Valor n (3,5 a 6,5%)
1a	1,52	532	1072	10,4	0,17
1b	1,52	498	1080	11,8	0,14
1c	1,51	548	1061	11,8	-----
1d	1,57	545	1032	10,9	0,17
1e	1,56	484	1032	12,1	0,18
1f	1,53	508	1025	10,8	0,19
1g	1,53	525	1013	10,9	0,18
1h	1,53	518	1013	10,9	0,18
2a	1,52	436	937	10,9	-----
2c	1,51	459	831	10,6	-----
2d	1,51	331	797	15,3	0,25
2f	1,56	352	786	12,7	0,25
3a	1,53	364	764	12,1	-----
3c	1,53	342	740	20,1	0,25
3d	1,51	360	712	17,6	0,25
3f	1,49	338	681	13,1	-----

3.4 - Resultados de propriedades mecânicas e microestrutura das amostras processadas em escala industrial.

Após realização dos experimentos em escala piloto, foi realizado um teste em escala industrial em uma linha de galvanização contínua por imersão a quente com forno de recozimento do tipo vertical, cujos resultados de propriedades mecânicas são mostrados na tabela 3 e o resultado da microestrutura obtida é mostrado na figura 5. Nota-se que as propriedades obtidas no primeiro teste ficaram bem dimensionadas em relação aos limites de especificação e a microestrutura obtida ficou de acordo com o previsto no experimento piloto com a presença das fases ferrita, martensita e austenita retida. Na imagem à esquerda observa-se um pouco de bainita, fase mais escura na imagem.

Tabela 3 - Resultado de propriedade mecânica obtido em escala industrial

Especificação	LE(MPa)	LR(MPa)	Al50[%]	n _{CS13}
CR980T550Y DP	654	1021	13,3	0,11
Limites de Especificação	550-700	980 mín	8min	0,08 mín

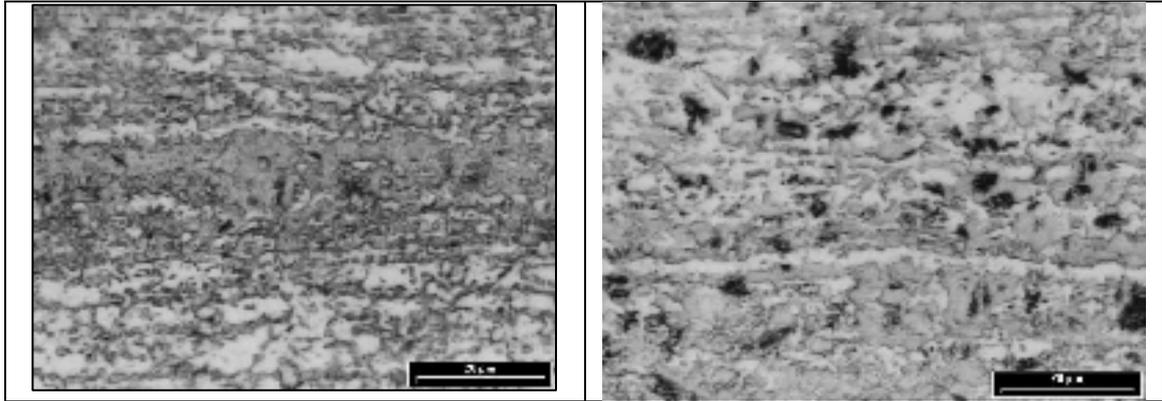


Figura 5 – Microestrutura de um aço DP 1000 obtida após processamento em escala industrial a partir de tratamento térmico a 790°C.

4 - CONCLUSÃO

Foi realizado, em escala piloto, um tratamento térmico à temperatura de 790°C, com encharque de 3min e tempos de espera variando entre 2s a 104s, seguido de resfriamento rápido em óleo. Como resultados desse tratamento, foi verificada a obtenção de uma microestrutura compatível com um aço dual phase para o primeiro grupo de amostras tratadas correspondentes aos tempos de espera variando de 2s a 26s após retirada da amostra do forno a 790°C seguido de resfriamento rápido em óleo com taxa de resfriamento média de 20°C/s. Para esse grupo de amostras tratadas, foi obtida a microestrutura constituída por ferrita, martensita e pequenas quantidades residuais de austenita retida, verificadas em ensaio de metalografia com ataque de nital 3% e análise em microscópio eletrônico de varredura MEV. Foi feita uma adaptação de uma curva CCT de um aço baixo carbono com adição de Cr-Ni e Mo visando explicar melhor os resultados obtidos após a realização desse tratamento. Em função dos resultados de microestrutura obtidos, acredita-se que o referido material apresente uma curva CCT muito semelhante a esse aço com algumas diferenças em termos dos tempos para o início e final das transformações das fases, bem como ao campo de estabilidade da fase bainita. Para confirmação dessa teoria será necessária a realização de uma curva CCT, em dilatômetro de têmpera, com taxas variando de 0,5 °C/s até 100°C/s. Os resultados de propriedades mecânicas e microestrutura, obtidos em escala industrial são de um aço dual phase da classe de resistência de 1000MPa, confirmando os resultados preliminares obtidos em escala piloto.

Agradecimentos

A autora agradece a todos os profissionais da CSN que direta ou indiretamente, participaram da execução desse trabalho e aos profissionais do IME que incentivaram a sua publicação.

REFERÊNCIAS

- 1- Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guideline, versão 4.0, março 2009. Disponível em: [www. Worldautosteel.org](http://www.Worlداutosteel.org).
- 2- Gorni A A. Corte e Conformação de Metais 6. Dez 2008.
- 3- Canale L. Temperabilidade. Disponível em <https://edisciplinas.usp.br>.
- 4- Trzaska J. at all. Modelling of CCT Diagrams for Engineering and Constructional Steel; Journal of Materials Technology, 2007; 192-193:504-510.
- 5- Han Qi Hang, KANG Young-lin e outros. Microestrutura e propriedades de aços laminado a frio microligado ao Mo da classe DP1000. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.
- 6- Neto ARF. Aços Avançados de Alta Resistência: avaliação da microestrutura e propriedades dos aços DP600 e DP780. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Campos de Guaratinguetá.
- 7- Oliveira R.C, Pereira, J.F.B; Cetlin P.R; Avaliação do Desenvolvimento do aço dual phase da classe 1000MPa com requisito de expansão de furo e processado em diferentes condições. 70º Congresso Anual da ABM Internacional.