



Daniel Massari de Souza Coelho

**Efeito da Temperatura de Austenitização
no Processo de Têmpera e Partição**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Fernando Cosme Rizzo Assunção

Rio de Janeiro

Abril de 2008



DANIEL MASSARI DE SOUZA COELHO

**Efeito da Temperatura de Austenitização no
Processo de Têmpera e Partição**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Fernando Cosme Rizzo Assunção

Orientador

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

Prof. André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva

Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Roberto Ribeiro de Avillez

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

Dra. Ana Rosa Fonseca de Aguiar Martins

Instituto Tecnológico da PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico
Científico da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de Abril de 2008.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Daniel Massari de Souza Coelho

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica e em Engenharia de Produção Metalúrgica pela PUC-Rio em dezembro de 2005.

Ficha Catalográfica

Coelho, Daniel Massari de Souza

Efeito da temperatura de austenitização no processo de têmpera e partição / Daniel Massari de Souza Coelho; orientador: Fernando Cosme Rizzo Assunção. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia, 2008.

100 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Ciência dos Materiais e Metalurgia – Teses. 2. Têmpera e partição. 3. Aço. 4. Partição de carbono. 5. Transformação de fase. 6. Austenita retida. 7. Tratamento térmico. I. Assunção, Fernando Cosme Rizzo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. III. Título.

CDD: 669

Agradecimentos

- Ao meu orientador, Fernando Cosme Rizzo Assunção, pela orientação, paciência e dedicação.
- À Ana Rosa Martins pela grande ajuda em todas as partes desta dissertação
- À Giselle Caloi e Evelyn Nigri pela companhia durante o mestrado.
- Ao José Mário Vilela do CETEC pela ajuda na nanoindentação.
- Ao Heitor Guimarães pela ajuda na metalografia.
- Ao Bojan Marinkovic e Ronaldo Pedro da Silva pela ajuda na difração de raios-X.

Resumo

Coelho, Daniel Massari de Souza; Assunção, Fernando Cosme Rizzo. **Efeito da temperatura de austenitização no processo de têmpera e partição**. Rio de Janeiro, 2008. 100 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O processo de Têmpera e Partição (T&P) possibilita a produção de aços com frações controladas de austenita retida, a partir do enriquecimento da austenita pela partição de carbono da martensita sem a precipitação de carbonetos. A austenita retida proporciona o efeito TRIP (plasticidade induzida por transformação), que confere ao material uma deformação uniforme e uma melhor absorção de energia durante o impacto. Os aços produzidos por este processo atendem principalmente às necessidades da indústria automobilística, que busca aços com melhores propriedades para a diminuição de peso e aumento da segurança dos automóveis. Nesta dissertação, ligas de aço com diferentes composições e tamanhos de grão foram produzidos pelo processo de Têmpera e Partição e a fração de austenita retida foi medida por difração de raios-X. As ligas também foram caracterizadas por nanoindentação, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. As amostras estudadas foram produzidas com uma austenitização completa a 930°C, realizada para promover um aumento no tamanho de grão, e os resultados foram comparados com amostras estudadas anteriormente com temperatura de austenitização de 890°C. Os resultados obtidos indicaram um aumento da fração de austenita retida com o aumento do grão austenítico original. Estes resultados foram interpretados com base no modelo teórico desenvolvido para o processo T&P.

Palavras-chave

Têmpera e partição; Aço; Partição de carbono; Transformação de fase; Austenita retida; Tratamento térmico

Abstract

Coelho, Daniel Massari de Souza; Assunção, Fernando Cosme Rizzo. **Effect of the austenitization temperature on the quenching and partitioning process**. Rio de Janeiro, 2008. 100 p. MSc. Dissertation – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Quenching and Partitioning (Q&P) process allows the production of steels with controlled fractions of retained austenite from the enrichment of the austenite by carbon partitioning from the martensite without carbide precipitation. The retained austenite is responsible for the TRIP effect (transformation induced plasticity), which enhances the material behavior providing a uniform strain and a better energy absorption during impact. Steels produced by this process match the requirements of the automotive industry, which looks for weight reduction and safety improvements in cars. In the present dissertation, steels with different compositions and grain sizes were produced by the Quenching and Partition process and their retained austenite fraction was measured by x-ray diffraction. The steels were also characterized by nanoindentation, optical microscopy and scanning electron microscopy. The specimens studied were produced by a complete austenitization at 930°C, to promote an increase in the austenitic grain size, and the results were compared with previously studied specimens produced by a complete austenitization at 890°C. The experimental results indicate an increase of austenite fraction with an increase in grain size of the original austenite. These results were analyzed based on the theoretical model develop for the Q&P process.

Keywords

Quenching and partitioning; Steel; Carbon partitioning; Phase transformation; Retained austenite; Heat treatment

Sumário

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Introdução | 18 |
| 2 | Revisão Bibliográfica | 19 |
| 2.1 | A Evolução do Aço na Indústria Automobilística | 19 |
| 2.2 | Plasticidade Induzida Por Transformação (Efeito TRIP) | 21 |
| 2.3 | Estabilidade da Martensita | 23 |
| 2.4 | Têmpera e Partição | 25 |
| 2.5 | Nanoindentação | 35 |
| 3 | Procedimento Experimental | 40 |
| 3.2 | Microscopia Ótica | 42 |
| 3.3 | Microscopia Eletrônica de Varredura | 43 |
| 3.4 | Difração de Raios-X | 43 |
| 3.5 | Nanoindentação | 43 |
| 3.6 | Simulação do Tratamento Intercrítico | 44 |
| 3.7 | Tratamento Intercrítico | 44 |
| 4 | Análise e Discussão dos Resultados | 45 |
| 4.1 | Nanoindentação | 45 |
| 4.2 | Tratamento Intercrítico | 51 |
| 4.3 | Difração de Raios-X | 59 |
| 4.4 | Microestrutura | 69 |
| 5 | Conclusões | 89 |

| | | |
|-----|---------------------------------------|----|
| 5.1 | Sugestões para trabalhos futuros..... | 91 |
| 6 | Referências Bibliográficas | 92 |
| 7 | Anexo I – Macro ThermoCalc | 96 |
| 8 | Anexo II – Macro Dictra | 98 |

Lista de Figuras

Figura 2-1. Evolução do uso de aço nos carros da FIAT desde a década de 80 até os dias atuais. 19

Figura 2-2 – Relação entre alongamento e tensão de ruptura para diversos aços [7]. 20

Figura 2-3: Gráficos mostrando duas rotas comerciais de produção de aços. O gráfico superior indica a rota para a produção de aços TRIP com bainita e austenita que utiliza uma austenitização completa seguida de uma transformação isotérmica ou um resfriamento contínuo. A rota inferior é utilizada para a fabricação de aços TRIP com bainita, ferrita e austenita e utiliza um tratamento intercrítico seguido de uma transformação isotérmica. 23

Figura 2-4: Esquema ilustrando os mecanismos de deformação dominantes a diferentes faixas de temperatura: plasticidade induzida por tensão (entre M_s e M_s^σ), plasticidade induzida por deformação (entre M_s^σ e M_d) e plasticidade induzida por deslizamento de discordâncias (acima de M_d) [19]. 24

Figura 2-5. Imagens de campo claro (esquerda) e escuro (direita) mostrando a precipitação de carboneto ϵ em um aço 9260 [23]. 26

Figura 2-6. Diagrama da Energia Livre de Gibbs vs Composição demonstrando a austenita e a ferrita em equilíbrio. 27

Figura 2-7. Diagrama da Energia Livre de Gibbs VS Composição demonstrando a austenita e a ferrita em ECC. 28

Figura 2-8: Cálculo do ECC para um aço com 0,5%C mostrando a relação entre temperatura, porcentagem de carbono e porcentagem de martensita. 29

Figura 2-9. Ilustração do processo de T&P. Este processo consiste em uma austenitização completa seguida por uma têmpera feita em uma temperatura ótima calculada. Após a têmpera inicial, o aço é aquecido até uma temperatura onde

ocorre a partição do carbono da martensita, enriquecendo a austenita e fazendo com que ela fique termicamente estável à temperatura de utilização do material.30

Figura 2-10. Gráfico de Fração Volumétrica VS Temperatura de Têmpera, que indica a temperatura ótima de têmpera, onde a fração de austenita retida é máxima.32

Figura 2-11. Gráfico mostrando os resultados do tratamento térmico por T&P em aços TRIP, apresentando, também, o cálculo pelo modelo de T&P e por transformação bainítica..... 33

Figura 2-12. Sequência de gráficos mostrando a distribuição do carbono na austenita e na ferrita (martensita) para 0 segundo, 0,1 segundo e 10 segundos na temperatura de partição de 400°C. A célula de austenita utilizada no cálculo tem 0,068µm de espessura e chegou ao equilíbrio com 10 segundos de partição e a célula de ferrita com 0,15µm chegou ao equilíbrio com 0,1 segundos. 34

Figura 2-13. Indentador de Berkovich [32]. 35

Figura 2-14. Esquema ilustrando um material totalmente plástico(a), elasto-plástico (b) e totalmente elástico (c) [35]. 36

Figura 2-15. Gráfico carga-profundidade de uma indentação feita em um grão de austenita. O “pop in” presente na curva de carregamento é devido à transformação martensítica induzida por deformação..... 36

Figura 2-16. Gráfico mostrando a altura máxima(h), a altura de contato (h_c), altura após a remoção da carga (h_f), e carga (P). 37

Figura 2-17. Gráfico ilustrando o cálculo da rigidez S pela parte superior da curva de descarregamento, e algumas grandezas utilizadas nas medições de nanoindentação. 38

Figura 3-1. Esquema do tratamento térmico realizado nas amostras. 42

Figura 4-1. Indentação em uma amostra Q4 utilizando uma carga de 10.000µN. 46

| | |
|---|----|
| Figura 4-2. Gráfico dureza vs carga mostrando os resultados de dureza da bainita em um aço TRIP para diferentes cargas. | 47 |
| Figura 4-3. Resultados das amostras preparadas com pasta de diamante até 1µm (linhas vermelhas), OPS (linhas azuis) e nital 2% (linhas verdes). As amostras preparadas com nital 2% apresentam módulo de elasticidade e dureza maiores que as amostras preparadas com pasta de diamante e OPS. | 48 |
| Figura 4-4. Localização das indentações em uma amostra da liga Q3. | 49 |
| Figura 4-5. Gráfico força-deslocamento para a martensita (linha preta) e para a austenita retida (linha vermelha). | 50 |
| Figura 4-6. Diagrama de fases da liga Q2. | 51 |
| Figura 4-7. Diagrama de fases da liga Q4. Como a liga Q4 tem um teor de carbono de 0,28% observa-se uma pequena janela para ser feito o tratamento intercrítico. | 52 |
| Figura 4-8. Gráfico mostrando o deslocamento da interface ferrita/austenita para tempos de 0; 0,1; 1; 10; 20 e 75 segundos na liga Fe-C. | 53 |
| Figura 4-9. Gráfico mostrando o deslocamento da interface ferrita/austenita para tempos de 0; 0,1; 10; 100; 108000; 1×10^7 ; 1×10^8 e 1×10^9 segundos na liga Fe-C-Ni. | 54 |
| Figura 4-10. Gráfico mostrando o deslocamento da interface ferrita/austenita para tempos de 0; 0,1; 10; 10800; 1×10^7 e 1×10^8 segundos na liga Fe-C-Cr. | 54 |
| Figura 4-11. Gráfico mostrando o deslocamento da interface ferrita/austenita para tempos de 0; 0,1; 10; 100; 1×10^5 e 3×10^6 segundos na liga Fe-C-Si. | 55 |
| Figura 4-12. Gráfico mostrando o deslocamento da interface ferrita/austenita para tempos de 0; 10; 10800 e 1×10^6 para a liga Q2. | 55 |
| Figura 4-13. Liga Q2 aquecida a 767°C por 3 horas. Microestrutura com aspecto martensítico, sem evidência da presença de ferrita equiaxial delineando os contornos de grão austeníticos originais. Nital 2%. | 56 |

Figura 4-14. Liga Q2 aquecida a 767°C por 3 horas. Microestrutura com aspecto martensítico, revelando a presença de uma segunda fase finamente dispersa. Nital 2%.....57

Figura 4-15. Liga Q2 austenitizada a 930°C por 30 minutos e recozida durante 3 horas a 767°C. Microestrutura com aspecto martensítico e alguns grãos de ferrita. Nital 2%.58

Figura 4-16. Liga Q2 austenitizada a 930°C por 30 minutos e recozida durante 3 horas a 767°C. Microestrutura martensítica com alguns grãos de ferrita nos pontos triplos. Nital 2%.58

Figura 4-17. Gráfico mostrando a fração volumétrica de austenita retida para diferentes tempos e temperaturas de partição..... 60

Figura 4-18. Gráfico da temperatura ótima de têmpera da liga Q1, mostrando a fração ótima de austenita retida e os dados experimentais obtidos. Obs: Os dados referentes às duas condições estão ligeiramente deslocados no eixo horizontal para facilidade de visualização..... 61

Figura 4-19. Fração volumétrica de austenita retida para uma temperatura de partição de 350°C. O aumento de tempo de partição aumentou a fração de austenita retida..... 62

Figura 4-20. Fração volumétrica de austenita retida para uma temperatura de partição de 400°C. O aumento de tempo de partição aumentou a fração de austenita retida..... 62

Figura 4-21. Fração volumétrica de austenita retida para uma temperatura de partição de 450°C. As maiores frações de austenita retida foram observadas com tempo de 30 segundos. 63

Figura 4-22. Gráfico mostrando a fração volumétrica de austenita retida para diferentes tempos e temperaturas de partição..... 64

Figura 4-23. Gráfico da temperatura ótima de têmpera da liga Q4, mostrando a fração ótima de austenita retida e os dados experimentais obtidos.

Obs: Os dados referentes às duas condições estão ligeiramente deslocados no eixo horizontal para facilidade de visualização..... 65

Figura 4-24. Fração volumétrica de austenita retida para uma temperatura de partição de 350°C. O aumento de tempo de partição aumentou a fração de austenita retida..... 66

Figura 4-25. Fração volumétrica de austenita retida para uma temperatura de partição de 400°C. O aumento de tempo de partição aumentou a fração de austenita retida..... 66

Figura 4-26. Fração volumétrica de austenita retida para uma temperatura de partição de 350°C. O aumento de tempo de partição aumentou a fração de austenita retida..... 67

Figura 4-27. Liga Q1 com temperatura de partição de 350°C e tempo de partição de 1000 segundos. A microestrutura apresenta ripas e placas de martensita e bainita. Nital 2%. 70

Figura 4-28. Liga Q1 com temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 1000 segundos. A microestrutura apresenta ripas e placas de martensita. Nital 2%. 70

Figura 4-29. Liga Q1 com temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 1000 segundos. A microestrutura apresenta ripas e placas de martensita. Nital 2%. 71

Figura 4-30. Liga Q1 com temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 10 segundos. A microestrutura apresenta ripas e placas de martensita. Nital 2%..... 71

Figura 4-31. Liga Q1 com temperatura de austenitização de 930°C e com temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 10 segundos. A microestrutura apresenta ripas e placas de martensita. Nital 2%. 72

Figura 4-32. Liga Q1 com temperatura de austenitização de 890°C e com temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 10 segundos. A microestrutura apresenta ripas e placas de martensita. Nital 2%. 73

Figura 4-33. Liga Q1 com temperatura de austenitização de 930°C (direita) e 890°C (esquerda) com temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 10 segundos. As microestruturas apresentam ripas e placas de martensita. Nital 2%..... 73

Figura 4-34. Liga Q2 com temperatura de partição de 350°C e tempo de partição de 10 segundos. A microestrutura apresenta placas e ripas de martensita. Nital 2%..... 74

Figura 4-35. Liga Q2 com temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 10 segundos. A microestrutura apresenta placas e ripas de martensita. Nital 2%..... 75

Figura 4-36. Liga Q2 com temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 10 segundos. A microestrutura apresenta placas e ripas de martensita. Nital 2%..... 75

Figura 4-37. Liga Q2 com temperatura de austenitização de 930°C, temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 10 segundos. A microestrutura apresenta placas e ripas de martensita. Nital 2%. 76

Figura 4-38. Liga Q2 com temperatura de austenitização de 890°C, temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 10 segundos. A microestrutura apresenta placas e ripas de martensita. Nital 2%. 77

Figura 4-39. Liga Q2 com temperatura de austenitização de 930°C (direita) e 890°C (esquerda) com temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 10 segundos. As microestruturas apresentam ripas e placas de martensita. Nital 2%..... 77

Figura 4-40. Distribuição dos tamanhos de grão para uma amostra Q3 austenitizada a 930°C. 78

Figura 4-41. Liga Q3 com temperatura de partição de 350°C e tempo de partição de 30 segundos. Microestrutura apresenta placas de martensita. Nital 2%. 78

| | |
|---|----|
| Figura 4-42. Liga Q3 com temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 30 segundos. Microestrutura apresenta placas de martensita. Nital 2%. | 79 |
| Figura 4-43. Liga Q3 com temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 30 segundos. Microestrutura apresenta placas de martensita. Nital 2%. | 79 |
| Figura 4-44. Liga Q3 com temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 10 segundos. Microestrutura apresenta placas de martensita. Nital 2%. | 80 |
| Figura 4-45. Liga Q3 com temperatura austenitização de 930°C e temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 30 segundos. Microestrutura apresenta placas de martensita. Nital 2%. | 81 |
| Figura 4-46. Liga Q3 com temperatura de austenitização de 890°C e temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 30 segundos. Microestrutura apresenta placas de martensita. Nital 2%. | 81 |
| Figura 4-47. Liga Q3 com temperatura de austenitização de 930°C e temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 30 segundos. Grãos de austenita primária. Ataque de Liang Zhang e Dong Cheng Guo. | 82 |
| Figura 4-48. Liga Q3 com temperatura de austenitização de 890°C e temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 30 segundos. Grãos de austenita primária. Ataque de Liang Zhang e Dong Cheng Guo. | 82 |
| Figura 4-49. Liga Q3 com temperatura de austenitização de 930°C (direita) e 890°C (esquerda) com temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 30 segundos. As microestruturas apresentam placas de martensita. Nital 2%. | 83 |
| Figura 4-50. Liga Q4 com temperatura de partição de 350°C e tempo de partição de 100 segundos. Microestrutura com ripas e placas de martensita. Nital 2%. | 84 |

Figura 4-51. Liga Q4 com temperatura de partição de 400°C e tempo de partição de 100 segundos. Microestrutura com ripas e placas de martensita. Nital 2%..... 84

Figura 4-52. Liga Q4 com temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 100 segundos. Microestrutura apresenta placas e ripas de martensita. Nital 2%..... 85

Figura 4-53. Liga Q4 com temperatura de austenitização de 930°C, temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 100 segundos. Nital 2%. 86

Figura 4-54. Liga Q4 com temperatura de austenitização de 890°C, temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 100 segundos. Nital 2%. 86

Figura 4-55. Liga Q4 com temperatura de austenitização de 930°C, temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 100 segundos. Microestrutura mostrando grãos de austenita primária. Ataque de Liang Zhang e Dong Cheng Guo..... 87

Figura 4-56. Liga Q4 com temperatura de austenitização de 890°C, temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 100 segundos. Microestrutura mostrando grãos de austenita primária. Ataque de Liang Zhang e Dong Cheng Guo..... 87

Figura 4-57. Liga Q4 com temperatura de austenitização de 930°C (direita) e 890°C (esquerda) com temperatura de partição de 450°C e tempo de partição de 100 segundos. As microestruturas apresentam ripas e placas de martensita. Nital 2%..... 88

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Ligas Projetadas | 40 |
| Tabela 2. Ligas Produzidas | 41 |
| Tabela 4.1: Relação entre carga aplicada, dureza e módulo de elasticidade em uma amostra Q4..... | 45 |
| Tabela 4.2. Tabela relacionando a dureza e módulo de elasticidade da martensita e da austenita em uma amostra da liga Q3..... | 49 |
| Tabela 4.3. Dados obtidos na difração de raios-X para a liga Q1..... | 59 |
| Tabela 4.4. Dados obtidos na difração de raios-X para a liga Q4..... | 64 |