

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**ANA ROSA FONSECA DE AGUIAR MARTINS**

**Têmpera e Partição em Aços de Alta Resistência  
contendo Ni: Modelagem Cinética,  
Microestrutura e Propriedades Mecânicas**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Programa de Pós – Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio

Orientador: Prof. Fernando Cosme Rizzo Assunção

Rio de Janeiro  
Abril de 2007



**ANA ROSA MARTINS**

**Têmpera e partição em aços de alta resistência  
contendo Ni: modelagem cinética, microestrutura  
e propriedades mecânicas**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação do Departamento de Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia do Centro Técnico Científico da PUC – Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Fernando Rizzo Cosme Assunção**

Orientador

Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia - PUC–Rio

**Prof. Roberto Ribeiro Aviliez**

Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia - PUC–Rio

**Prof. Marcos Vinícius Soares Pereira**

Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia - PUC–Rio

**Prof. Hélio Goldenstein**

Departamento de Engenharia de Materiais - USP

**Prof. André Luiz V. da Costa e Silva**

Universidade Federal Fluminense - UFF

**Prof. José Eugenio Leal**

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

Rio de Janeiro, 4 de Abril de 2007.

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

### **Ana Rosa Fonseca de Aguiar Martins**

Graduou-se em Engenharia de Materiais e Metalurgia na PUC – Rio em 1993. Obteve o título de mestre nesta mesma instituição em 1996 (mecânica da fratura, correlação microestruturas propriedades mecânicas em ligas de Al de uso aeronáutico). Trabalha desde de 1996 no Instituto Tecnológico da PUC-Rio como engenheira de pesquisa, atuando em projetos de serviços, consultoria técnica e gerente da qualidade dos laboratórios do ITUC.

#### Ficha Catalográfica

Martins, Ana Rosa F. de Aguiar

Têmpera e partição em aços de alta resistência contendo Ni : modelagem cinética, microestrutura e propriedades mecânicas / Ana Rosa F. de Aguiar Martins ; orientador: Fernando Rizzo Cosme Assunção. – 2007.  
194 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais e Metalurgia)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.  
Inclui bibliografia

1. Ciência dos Materiais e Metalurgia – Teses. 2. Aços. 3. Partição de Carbono. 4. Austenita Retida. 5. Têmpera. 6. Partição. I. Assunção, Fernando Rizzo Cosme. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. III. Título.

CDD: 669

Aos meus queridos pais.

## Agradecimentos

- Ao meu orientador Fernando Cosme Rizzo Assunção, pela orientação, confiança em mim depositada e pelo apoio para o desenvolvimento de todas as etapas da minha tese.
- Aos professores Sérgio Braga e Carlos Valois pelo inesgotável apoio e incentivo para a conclusão desse trabalho.
- Ao Grupo de Transformação de Fase do DCMM/PUC-Rio pela acolhida e ajuda na execução da parte experimental.
- Aos funcionários do Instituto Tecnológico, ITUC/PUC – Rio, pelo carinho e solidariedade ao longo desses anos.
- Aos professores John Speer e David Matlock da Colorado School of Mines/USA por disponibilizar a infra-estrutura laboratorial do Steel Center (ASPPRC).
- Ao Dr. Kejian He (Leeds University/UK) pela ajuda na análise das amostras de microscopia de transmissão.
- Ao CNPq que através do programa CIAM financiou parte do trabalho.

## Resumo

Martins, Ana Rosa Fonseca de Aguiar Martins; Rizzo, Fernando. **Têmpera e Partição em Aços de Alta Resistência Contendo Ni: Modelagem Cinética, Microestrutura e Propriedades Mecânicas**. Rio de Janeiro, 2007. 194p. Tese de Doutorado – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Aços de alta resistência contendo frações significativas de austenita retida têm alcançado grande interesse comercial principalmente quando associados ao fenômeno TRIP durante o processo de conformação final. Recentemente, um novo conceito de tratamento térmico, denominado Têmpera e Partição, vem sendo estudado como mais uma alternativa no desenvolvimento de aços multifásicos. Neste processo, o controle da fração volumétrica da austenita retida é possível uma vez que durante o tratamento de partição, a supersaturação de carbono na martensita temperada é utilizada para estabilizar a austenita não transformada, evitando assim transformações futuras que poderiam ocorrer em temperaturas mais baixas. A seqüência de processamento térmico envolve o tratamento de têmpera numa faixa de temperatura entre  $M_s$  e  $M_f$ , seguido de partição numa temperatura igual ou superior à temperatura de têmpera. A partição do carbono da martensita para a austenita é possível caso reações competitivas, como por exemplo, a precipitação de carbeto, sejam suprimidas pela adição de elementos de liga tais como Si e/ou Al. Uma condição básica para o modelo está relacionada à restrição de movimentação da interface martensita/austenita, uma vez que a difusão em temperaturas baixas está limitada aos átomos intersticiais. Essa restrição leva a um novo conceito de equilíbrio denominado Equilíbrio Constrito de Carbono, que é caracterizado pela igualdade do potencial químico na interface austenita-martensita apenas para o carbono. Nesse trabalho foram desenvolvidos quatro aços, contendo diferentes percentuais de C e Ni e com a presença dos elementos Si, Mn, Mo e Cr. A adição desses elementos teve finalidade reduzir a temperatura  $B_s$ , visando desacoplar o tratamento de têmpera e partição de uma eventual transformação bainítica. Um conjunto de condições para o tratamento de têmpera e partição foi então desenhado, envolvendo diferentes temperaturas de têmpera e diferentes temperaturas e tempos de partição. A avaliação microestrutural foi realizada utilizando recursos de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura e de transmissão. A técnica de difração de raios-X foi empregada para quantificar

a fração de austenita retida e seu enriquecimento em carbono. Foi modelado o processo de partição do carbono utilizando o programa DICTRA™. Os resultados dessas simulações foram analisados em termos dos parâmetros microestruturais, do tempo e da temperatura, e como essa combinação influencia a cinética de partição do carbono. Os resultados obtidos para as amostras ensaiadas em tração indicaram uma vasta combinação de resistência e ductilidade, confirmando o potencial do processo na otimização das propriedades mecânicas.

## **Palavras-chave**

Aços; Partição de Carbono; Austenita Retida; Têmpera e Partição.

## Abstract

Martins, Ana Rosa Fonseca de Aguiar Martins; Rizzo, Fernando. **Quenching and Partitioning of Ni-Added High Strength Steels: Kinetics Modelling, Microstructure and Mechanical Properties.** Rio de Janeiro, april 2007. 194p. PhD Thesis- Department of Materials Science and Metallurgy. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

High strength steels containing significant fractions of retained austenite have been developed in recent years and are the subject of growing commercial interest when associated with the TRIP phenomenon during deformation. A new process concept, "Quenching and Partitioning", has been recently proposed for production of steel microstructures containing carbon-enriched austenite. The heat treatment sequence involves quenching to a temperature between the martensite-start ( $M_s$ ) and martensite-finish ( $M_f$ ) temperatures, followed by a partitioning treatment, above or at the initial quench temperature, designed to enrich the remaining untransformed austenite with the carbon escaping from the supersaturated martensite phase, thereby stabilizing the retained austenite phase during the subsequent quench to room temperature. To enable the austenite enrichment, competing reactions, principally carbide precipitation, must be suppressed by appropriate alloying elements, such as Si and/or Al. The concept assumes a stationary martensite/austenite interface and the absence of short-range movements of iron and substitutional elements. The condition under which partitioning occur has been called Constrained Carbon Equilibrium (ECC), due to the restriction in movement of the interface and the assumption that only carbon equilibrates its chemical potential at the interface. In this work, a group of four alloys was investigated, containing different additions of C and Ni and containing Si, Mn, Mo e Cr. These alloys were designed to preclude bainite formation at the partitioning temperatures of interest. Several heat-treatments, were performed in these alloys, using the Q&P concept, to evaluate its effect on the resulting microstructure and mechanical properties. Each alloy was quenched at selected temperatures and partitioned from 350 to 450°C for times ranging from 10 to 1000s. Microstructural characterization was performed by optical microscopy, scanning and transmission electron microscopy, while X-ray diffraction was used to determine both the fraction and the carbon content of the retained austenite. Partitioning kinetics were simulated with DICTRA™. The results were analyzed taking into consideration the scale of the microstructure, as



well as the partitioning temperature. Tensile test results indicated that very high levels of strength with moderate toughness can be achieved confirming the potential of the Q&P to produce a superior combination of mechanical properties.

## **KEYWORDS**

Steel; Carbon Partitioning; Retained Austenite; Quench and Partitioning.

## Sumário

1.	Introdução	25
2.	Revisão Bibliográfica	27
2.1	Concepção e Processamento de Aços Multifásicos	27
2.2	Aspectos Microestruturais do Fenômeno de Plasticidade Induzida por Deformação	31
2.3	Comportamento Mecânico dos Aços TRIP: Uma Comparação com outros Materiais Recentemente Desenvolvidos	33
2.4	Partição de Carbono e o Conceito de Equilíbrio Constrito de Carbono (ECC)	36
2.5	Aplicação do Conceito de ECC ao Processo de Têmpera e Partição	42
2.6	Supressão da Formação de Carbetos	46
2.7	Aprisionamento do Carbono pelas Discordâncias	48
3	Procedimento Experimental	50
3.1	Material	50
3.2	Estudos Termodinâmicos	52
3.3	Metodologia e Seleção da Temperatura de Têmpera	53
3.4	Tratamentos Térmicos	58
3.5	Técnicas de Caracterização Microestrutural	62
3.6	Determinação da Fração de Austenita e Cálculo do Percentual de Carbono	62
3.7	Ensaio de Tração	63
3.8	Estudo da Cinética de Partição	63
4	Análise dos Resultados	66
4.1	Aspectos Termodinâmicos	66
4.1.1	Diagramas de Equilíbrio	66
4.1.2	Aspectos relativos ao Equilíbrio Constrito de Carbono (ECC)	69
4.1.3	Diagrama de Para-Equilíbrio e a Curva $T_0$	72
4.1.4	Precipitação de Carbetos	75
4.2	Aspectos Cinéticos da Partição	81

4.2.1	Distribuição de Carbono durante a Partição	81
4.2.2	Atividade do Carbono	84
4.3	Fração de Austenita retida e Enriquecimento de Carbono	86
4.4	Análise Microestrutural	94
4.5	Ensaio Mecânicos	127
5	Discussão	144
5.1	Aspectos Cinéticos e Termodinâmicos da Partição	144
5.1.1	Distribuição de Carbono durante a Partição	144
5.1.2	Atividade e Fluxo de Carbono	147
5.1.3	Influência dos Parâmetros Dimensionais nas Condições de Equilíbrio	152
5.1.4	Influência da Temperatura nas Condições de Equilíbrio	155
5.1.5	Precipitação de Carbetos	158
5.1.6	Informações Complementares relativas ao Equilíbrio Constrito de Carbono	159
5.2	Microestrutura e Fração de Austenita	161
5.3	Aspectos Mecânicos e Microestruturais	168
5.4	Comparação com outros Aços de Alta Resistência	176
6	Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros	179
	Referências Bibliográficas	182
A	Anexos	
A.1	Sequência de operações utilizadas no THERMOCALC para obtenção da curva $T_0$	186
A.2	Sequência de operações utilizadas no THERMOCALC para obtenção da força motriz para precipitação dos carbetos	188
A.3	Sequência de operações utilizadas no DICTRA	189

## Lista de Figuras

2.1	Representação esquemática de duas rotas convencionais utilizadas para a obtenção de aços multifásicos. (a) austenitização plena seguida de resfriamento contínuo ou tratamento isotérmico. (b) austenitização intercrítica seguido de tratamento isotérmico.	30
2.2	Esquema que ilustra a mudança da nucleação da martensita assistida por tensão para induzida por deformação, dependendo da tensão e da temperatura.	32
2.3	Relação entre ductilidade e resistência de várias categorias de aços amplamente utilizados na estrutura dos automóveis.	33
2.4	Relação entre ductilidade e resistência de várias categorias de aços amplamente utilizados na estrutura dos automóveis.	33
2.5	Fotografia de um veículo submetido a cargas dinâmicas em um ensaio de impacto.	35
2.6	Diagrama esquemático de Energia Livre de Gibbs x Composição ilustrando o equilíbrio a uma determinada temperatura, entre a ferrita e a austenita num sistema Fe-C e as respectivas composições de equilíbrio.	38
2.7	Diagrama esquemático Energia Livre de Gibbs x Composição ilustrando condições possíveis de “Equilíbrio Constrito de Carbono”[1]. Estão ilustrados dois exemplos possíveis de composição para a ferrita e para a austenita, com o mesmo potencial químico para o carbono. O potencial químico do ferro na ferrita e austenita não é o mesmo para as composições $X_{\text{C}}^{\alpha-I}$ e $X_{\text{C}}^{\gamma-I}$ do exemplo I, ou para as composições $X_{\text{C}}^{\gamma-II}$ e $X_{\text{C}}^{\gamma-II}$ .	39
2.8	Exemplo de cálculos utilizando o conceito de ECC para uma liga com 0,5%C, mostrando a dependência das composições de ferrita e austenita com relação à temperatura e a fração inicial de martensita.	41
2.9	Desenho esquemático do processo de Têmpera e Partição. $C_i$ , $C_\gamma$ , $C_m$ , representam a concentração de carbono na liga, na austenita e na martensita respectivamente. $Q_T$ representa a temperatura de têmpera e $P_T$ temperatura de partição. .	44
2.10	a) Desenho esquemático ilustrando o conceito da curva $T_0$ no diagrama Energia de Gibbs vs. %C. (b) Diagrama esquemático ilustrando que no ECC a austenita pode estar mais enriquecida, ou menos enriquecida, que a situação esperada para o paraequilíbrio	45
3.1	Estimativa para as frações de austenita e martensita em função da temperatura de têmpera para o aço identificado por Q1. A fração final de austenita está representada pela linha sólida. As linhas tracejadas representam a austenita e martensita presentes após a têmpera inicial e a martensita adicional formada durante o resfriamento após o tratamento de partição	54
3.2	Estimativa para as frações de austenita e martensita em função da temperatura de têmpera para o aço identificado por Q2. A fração final de austenita está representada pela linha sólida. As linhas tracejadas	54

- representam a austenita e martensita presentes após a têmpera inicial e a martensita adicional formada durante o resfriamento após o tratamento de partição.
- 3.3 Estimativa para as frações de austenita e martensita em função da temperatura de têmpera para o aço identificado por Q3. A fração final de austenita está representada pela linha sólida. As linhas tracejadas representam a austenita e martensita presentes após a têmpera inicial e a martensita adicional formada durante o resfriamento após o tratamento de partição. 55
- 3.4 Estimativa para as frações de austenita e martensita em função da temperatura de têmpera para o aço identificado por Q4. A fração final de austenita está representada pela linha sólida. As linhas tracejadas representam a austenita e martensita presentes após a têmpera inicial e a martensita adicional formada durante o resfriamento após o tratamento de partição. 55
- 3.5 Estimativa das frações de austenita em função da temperatura de têmpera para o aço identificado por Q2 considerando austenitização plena e tratamento intercrítico com 50% de ferrita intercrítica. 56
- 3.6 Estimativa das frações de austenita em função da temperatura de têmpera para o aço identificado por Q4 considerando austenitização plena e tratamento intercrítico com 50% de ferrita intercrítica 57
- 3.7 Fluxograma de tratamento térmico elaborado para a liga Q1. 59
- 3.8 Fluxograma de tratamento térmico elaborado para a liga Q2. 59
- 3.9 Fluxograma de tratamento térmico elaborado para a liga Q3. 60
- 3.10 Fluxograma de tratamento térmico elaborado para a liga Q4. 60
- 3.11 Representação esquemática do tamanho da célula de austenita e ferrita (martensita) para os aços estudados para diferentes temperaturas de têmpera. A dimensão da célula de ferrita considerada é de  $0,2\mu\text{m}$  e  $2\mu\text{m}$ . Em função do percentual de austenita estimado foi determinado o tamanho da célula de austenita. 60
- 4.1 Figura ilustrando efeito da adição de Mn nos campos do diagrama Fe-C. A curva pontilhada, corresponde a uma composição Fe-C-3%Mn, e ilustra a expansão do domínio  $\gamma$  quando comparado às curvas contínuas. 67
- 4.2 Figura ilustrando efeito da adição de Ni no diagrama Fe-C. A curva pontilhada corresponde a uma composição Fe-C-5%Ni, e ilustra a expansão do domínio  $\gamma$  quando comparado às curvas contínuas. 67
- 4.3 Figura ilustrando efeito da adição de Si no diagrama Fe-C. A curva pontilhada corresponde a uma composição Fe-C-3%Si, e ilustra a contração  $\gamma$  quando comparado às curvas contínuas. 68
- 4.4 Diagrama de equilíbrio para uma liga com 2.5%Si, 2.3%Mn, 1.4%Ni, 0.75%Cr e 0.5%Mo. A concentração de carbono é de 0.37% para a liga Q1 e de 0.22% para a liga Q2. As linhas tracejadas indicam essas posições. 68
- 4.5 Diagrama de equilíbrio para uma liga com 2.8%Si, 2.4%Mn, 5.0%Ni, 0.57%Cr e 0.55%Mo. A concentração de carbono é de 0.39% para a liga 69

Q3 e de 0.28% para a liga Q4. As linhas tracejadas indicam essas posições.

- |      |  |    |
|------|--|----|
| 4.6  | Cálculos realizados para a composição da Liga Q1. Os gráficos (a) e (b) ilustram a dependência entre a composição da ferrita e da austenita com a temperatura, (c) variação do potencial químico do carbono na ferrita e na austenita em função da temperatura e (d) influência da temperatura na fração molar de austenita. | 70 |
| 4.7  | Cálculos realizados para a composição da Liga Q2. Os gráficos (a) e (b) ilustram a dependência entre a composição da ferrita e da austenita com a temperatura, (c) variação do potencial químico do carbono na ferrita e na austenita em função da temperatura   | 71 |
| 4.8  | Cálculos realizados para a composição da Liga Q3. Os gráficos (a) e (b) ilustram a dependência entre a composição da ferrita e da austenita com a temperatura, (c) variação do potencial químico do carbono na ferrita e na austenita em função da temperatura.  | 71 |
| 4.9  | Cálculos realizados para a composição da Liga Q4. Os gráficos (a) e (b) ilustram a dependência entre a composição da ferrita e da austenita com a temperatura, (c) variação do potencial químico do carbono na ferrita e na austenita em função da temperatura.  | 72 |
| 4.10 | Diagramas de para-equilíbrio com superposição da curva T0, para a liga Q1. Os símbolos apresentam alguns dos valores experimentais encontrados após o tratamento de têmpera e partição para diferentes temperaturas de têmpera (350, 400 e 450 °C).  | 73 |
| 4.11 | Os símbolos apresentam alguns dos valores experimentais encontrados após o tratamento de têmpera e partição para diferentes temperaturas de têmpera (350, 400 e 450 °C).   | 73 |
| 4.12 | Diagramas de para-equilíbrio com superposição da curva T0, para a liga Q3. Os símbolos apresentam alguns dos valores experimentais encontrados após o tratamento de têmpera e partição para diferentes temperaturas de têmpera (350, 400 e 450 °C).  | 74 |
| 4.13 | Diagramas de para-equilíbrio com superposição da curva T0, para a liga Q4. Os símbolos apresentam alguns dos valores experimentais encontrados após o tratamento de têmpera e partição para diferentes temperaturas de têmpera (350, 400 e 450 °C).  | 74 |
| 4.14 | Liga Q1. Diagrama do cálculo da Força motriz para precipitação de diversos carbeto, considerando uma matriz ferrítica (a) e uma matriz austenítica (b).  | 77 |
| 4.15 | Liga Q2. Diagrama do cálculo da força motriz para precipitação de diversos carbeto, considerando uma matriz ferrítica (a) e uma matriz austenítica (b).  | 78 |
| 4.16 | Liga Q3. Diagrama do cálculo Força motriz para precipitação de diversos carbeto, considerando uma matriz ferrítica (a) e uma matriz austenítica (b).   | 79 |
| 4.17 | - Liga Q4. Diagrama do cálculo da Força motriz para precipitação de diversos carbeto, considerando uma matriz ferrítica (a) e uma matriz austenítica (b).  | 80 |

- 4.18 Perfil de concentração de carbono na ferrita e na austenita em função da distância para a liga Q1. A fração de austenita é de 38%, para a temperatura de têmpera de 187°C e temperaturas de partição de 350, 400 e 450°C. Os cálculos foram realizados empregando o software DICTRATM e considerando como sendo 0,1 µm a distância do centro da ferrita até a interface com a austenita, enquanto distância do centro da austenita até interface foi de 0,063 µm. Os tempos considerados nos cálculos foram de 0,0001s até 100s. 81
- 4.19 Perfil de concentração de carbono na ferrita e na austenita em função da distância para a liga Q1. A fração de austenita é de 31%, para a temperatura de têmpera de 167°C. Os cálculos foram realizados na temperatura de partição de 450°C, considerando como sendo 0,1 µm a distância do centro da ferrita até a interface com a austenita, enquanto a distância do centro da austenita até interface 83
- 4.20 Perfil de concentração de carbono na ferrita e na austenita em função da distância para a liga Q1. A fração de austenita é de 38%, para a temperatura de têmpera de 187°C. Os cálculos foram realizados na temperatura de partição de 450°C, considerando como sendo 1,0 µm a distância do centro da ferrita até a interface com a austenita, enquanto a distância do centro da austenita até interface foi de 0,625 µm. Os tempos considerados nos cálculos foram de 0,0001s até 500s. 84
- 4.21 Gráficos ilustrando a variação na atividade do ferro na interface da ferrita e da austenita em função do tempo. A fração de austenita é de 38%, para a temperatura de têmpera de 187°C. Os cálculos foram realizados na temperatura de partição de 400°C. O tamanho da metade da ferrita é de 1,0µm, enquanto metade da austenita mede 0,625µm. 85
- 4.22 Espectro de difração de raios-x da liga Q1, temperada a 167°C, por 10s, seguido de tratamento de partição a 350°C por 100s. As setas indicam os picos da austenita e da ferrita (martensita). 86
- 4.23 Fração final de austenita em função do tempo de diferentes tempos de partição para amostras austenitizadas a 890°C temperadas a 167, 187, 207°C e submetidas à partição por 10, 30 e 100s nas temperaturas de (a) 350°C, (b) 400°C e (c) 450°C. A curva indica a fração de austenita teórica retida em função da temperatura de partição calculada conforme a metodologia descrita no item 3.3. 88
- 4.24 Espectro de difração de raios-x da liga Q2, temperada a 182°C, por 10s, seguido de tratamento de partição a 350°C por 30s. As setas indicam os picos da austenita e da ferrita (martensita). 89
- 4.25 Fração final de austenita em função do tempo de diferentes tempos de partição para a liga Q2. As amostras foram austenitizadas a 870°C temperadas 182°C submetidas à partição por 10, 30, 100 e 1000s nas temperaturas de 350, 400 e 450°C. A curva indica a fração de austenita teórica retida em função da temperatura de partição calculada conforme a metodologia descrita no item 3.3. 90
- 4.26 Espectro de difração de raios-x da liga Q3, temperada a 147°C, por 10s, seguido de tratamento de partição a 450°C por 30s. As setas indicam os picos da austenita e da ferrita (martensita). 90
- 4.27 Fração final de austenita em função do tempo de diferentes tempos de partição para amostras austenitizadas uma temperatura intercrítica a 870°C temperadas a 147°C e 167°C e submetidas à partição por 10, 30, 91

100s nas temperaturas de 350, 400 e 450°C. A curva indica a fração de austenita teórica retida em função da temperatura de partição calculada conforme a metodologia descrita no item 3.3.

- 4.28 Espectro de difração de raios-x da liga Q4, temperada a 147°C, por 10s, seguido de tratamento de partição a 400°C por 100s. As setas indicam os picos da austenita e da ferrita (martensita). 92
- 4.29 Espectro de difração de raios-x da liga Q4, tratada intercriticamente a 735°C, temperada a 147°C, por 10s, seguido de tratamento de partição a 400°C por 100s. As setas indicam os picos da austenita e da ferrita (martensita). 92
- 4.30 Fração final de austenita em função do tempo para amostras austenitizadas a 870°C, temperadas a 147°C e 167°C e submetidas à partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30, 100 e 1000s. A curva indica a fração de austenita teórica retida em função da temperatura de partição calculada conforme a metodologia descrita no item 3.3. 93
- 4.31 Fração final de austenita em função do tempo para amostras austenitizadas intercriticamente a 735°C, temperadas a 147°C e submetidas à partição a 400°C por 10, 30, 100 e 1000s. A curva indica a fração de austenita teórica retida em função da temperatura de partição calculada conforme a metodologia descrita no item 3.3, para amostras submetidas a austenitização intercrítica a 735°C. 94
- 4.32 Amostra da liga Q1. Micrografia da seção transversal da amostra na condição como recebida 95
- 4.33 Amostra da liga Q1. Micrografia da seção transversal da amostra austenitizada a 890°C, temperada a 187°C e resfriada ao ar. 95
- 4.34 Amostra da liga Q1. Micrografia da seção transversal da amostra na condição de têmpera (a) em água e (b) em nitrogênio líquido. A difração de raios-X não indicou a presença de austenita retida em ambas amostras. 96
- 4.35 Amostra da liga Q1. Micrografia da seção transversal da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, seguido de têmpera a 167°C e partição a 400°C por 100 s. 97
- 4.36 Amostra da liga Q1. Micrografia observada no microscópio eletrônico de varredura da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C por 300 s, têmpera a 167°C e partição a 400°C por 100 s 98
- 4.37 Amostra da liga Q1. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, têmpera a 167°C por 10 s e finalmente tratamento de partição a 400°C por 100 s. Imagem em campo claro mostrando martensita contendo maclas. 98
- 4.38 Amostra da liga Q1. Micrografia da seção transversal da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C por 300 s, têmpera a 167°C e partição a 450°C por 30 s. 99
- 4.39 Amostra da liga Q1. Micrografia observada no microscópio eletrônico de varredura da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C por 300 s, temperada a 167°C e partição a 450°C 99



- por 30 s.
- 4.40 – Amostra da liga Q1, na condição de austenitização a 870°C por 300 s, seguido de têmpera a 167°C e partição a 450°C por 30 s. (a) Imagem em campo claro destacando a presença de ferrita e em (b) campo escuro os carbeto de transição ( $\epsilon$ ). 100
- 4.41 Amostra da liga Q1. Micrografia observada no microscópio ótico da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, temperada a 187°C e partição a 400°C por 10 s. 101
- 4.42 Amostra da liga Q1. Micrografia observada no microscópio eletrônico de varredura da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, temperada a 187°C e partição a 400°C por 10 s. 102
- 4.43 Amostra da liga Q1. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C por 300 s, temperada a 187°C e partição a 400°C por 10 s. 102
- 4.44 Amostra da liga Q1, na condição de austenitização a 870°C por 300 s, seguido de têmpera a 167°C e partição a 450°C por 30 s. (a) Imagem em campo claro destacando a presença de ferrita. (b) imagem em campo escuro, austenita na forma de filmes entre os grãos de ferrita. 103
- 4.45 Amostra da liga Q1. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C por 300 s, temperada a 187°C e partição a 400°C por 10 s. (a) Imagem em campo claro (b) imagem em campo escuro, presença de carbeto identificados por carbeto epsilon ( $\epsilon$ ). 104
- 4.46 Amostra da liga Q2. Micrografia da seção transversal da amostra na condição como recebida. 105
- 4.47 Amostra da liga Q2. Micrografia observada no microscópio ótico da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, temperada a 182°C e partição a 400°C por 100 s. 105
- 4.48 Amostra da liga Q2. Micrografia observada no microscópio eletrônico de varredura da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C por 300 s, temperada a 182°C e partição a 400°C por 30 s. 106
- 4.49 Amostra da liga Q2. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, temperada a 187°C e partição a 450°C por 100 s. Imagem em campo claro indicando a presença de muitas regiões de martensita. 106
- 4.50 - Amostra da liga Q3. Micrografia da seção transversal da amostra na condição como recebida. 107
- 4.51 Amostra da liga Q3. Micrografia da seção transversal da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: austenitização a 870°C, (a) têmpera em banho metálico a 147°C (b) têmpera em água a 25°C, (c) têmpera em nitrogênio líquido. 109
- 4.52 Amostra da liga Q3. Micrografia da seção transversal da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: austenitização a 870°C, (a) 110

têmpera

- 4.53 Amostra Q&P3. Micrografia da seção transversal da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, têmpera a 167°C e tratamento de partição a 450°C por 100 segundos. 110
- 4.54 Amostra da liga Q3. Austenitização a 870°C seguido de têmpera em água a 25°C. (a) Imagem obtida no microscópio ótico, (b) imagem segmentada. 111
- 4.55 Amostra da liga Q3. Micrografia observada no microscópio eletrônico de varredura da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, têmpera a 147°C, partição a 450°C por 100s. 112
- 4.56 Amostra da liga Q3. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, têmpera a 147°C e finalmente tratamento de partição a 450°C por 100 s. Imagem em campo claro. Presença de martensita contendo maclas. 113
- 4.57 Amostra da liga Q3. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, têmpera a 147°C e finalmente tratamento de partição a 450°C por 100 s. Imagem em campo claro. Presença de martensita contendo maclas. 113
- 4.58 Amostra da liga Q3. Micrografia da seção transversal da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, têmpera a 167°C e partição a 400°C por 30s. 114
- 4.59 Amostra da liga Q3. Micrografia observada no microscópio eletrônico de varredura da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, têmpera a 167°C, partição a 400°C por 30s. 114
- 4.60 Amostra da liga Q3. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, têmpera a 167°C e partição a 400°C por 30 s. Presença de austenita apresentando maclas, imagem em campo claro. 115
- 4.61 – Amostra da liga Q3. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, têmpera a 147°C e tratamento de partição a 350°C por 100s. (a) imagem em campo claro, destacando a presença de martensita (b) Imagem em campo escuro, destacando a presença de austenita retida na forma de filmes. 116
- 4.62 Amostra da liga Q3. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870°C, têmpera a 147°C por 10 s e partição a 350°C por 100 s. Presença de austenita apresentando maclas, imagem em campo claro. 117
- 4.63 Microestrutura da amostra da liga Q4 na condição como recebida. A amostra apresenta basicamente martensita na forma de ripas. 118
- 4.64 – Microestrutura da amostra da liga Q4 na condição de têmpera a 147°C. Presença de martensita na forma de ripas. 119
- 4.65 Microestrutura da amostra da liga Q4 após têmpera em água 25°C (a). A amostra apresenta basicamente martensita na forma de ripas. A DR-X 120

- indicou a presença de 5,9% de austenita retida. (b) na condição de têmpera em nitrogênio líquido. A martensita se apresenta na forma de ripas bem finas, não foi detectada austenita na DR-X.
- 4.66 Microestrutura da amostra da liga Q4 amostra austenitizada a 890C por 180s, seguido de têmpera na temperatura de 147°C por 10s e finalmente submetida à partição a 400°C por 10s 121
- 4.67 Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para a amostra austenitizada 890°C por 180s, temperada a 147°C por 10s e submetida à partição a 400°C por 10s. 121
- 4.68 Amostra da liga Q4. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870 °C por 300 s, têmpera a 147 °C por 10 s e tratamento de partição a 400 °C por 10 s. (a) imagem em campo claro indicando a presença de ferrita e (b) imagem em campo escuro destacando a austenita 122
- 4.69 Amostra da liga Q4. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870 °C por 300 s, têmpera a 147 °C por 10 s e tratamento de partição a 400 °C por 10 s. Presença de martensita apresentando maclas. 123
- 4.70 Microestrutura da amostra da liga Q4 amostra austenitizada a 890C por 180s, seguido de têmpera na temperatura de 167°C por 10s e finalmente submetida à partição a 400°C por 30s 124
- 4.71 Microestrutura da amostra da liga Q4 amostra austenitizada a 890°C, seguido de têmpera na temperatura de 167°C por 10s e finalmente submetida à partição a 400°C por 30s 124
- 4.72 Amostra da liga Q4. Micrografia observada no microscópio eletrônico de transmissão da amostra tratada termicamente, nas seguintes condições: Austenitização a 870 °C por 300 s, têmpera a 167 °C por 10 s e tratamento de partição a 400 °C por 30 s. (a) imagem em campo claro indicando a presença de ferrita e (b) imagem em campo escuro destacando a austenita. 125
- 4.73 Microestrutura da amostra da liga Q4 amostra austenitizada intercriticamente a 735C por 300ss, seguido de têmpera na temperatura de 147°C por 10s e finalmente submetida à partição a 400°C por 10s. 126
- 4.74 Microestrutura da amostra da liga Q4 amostra austenitizada intercriticamente a 735°C por 300s, seguido de têmpera na temperatura de 147°C por 10s e finalmente submetida à partição a 400°C por 10s 126
- 4.75 Valores de tensão de escoamento e ruptura em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 167 °C e que sofreram partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30 e 100s. 128
- 4.76 Valores de alongamento em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 167 °C e que sofreram partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30,100s. 128
- 4.77 Curva tensão-deformação para a liga Q1 na condição de austenitização a 890C, têmpera a 167°C seguido de partição a 400°C por 10s. 129

4.78	Valores de tensão de escoamento e de ruptura em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 187°C e que sofreram partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30,100s.	130
4.79	Valores de tensão de escoamento e de ruptura em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 187°C e que sofreram partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30,100s.	130
4.80	Curva tensão-deformação para a liga Q1 na condição de austenitização a 890C, têmpera a 187°C seguido de partição a 450°C por 30s.	131
4.81	Valores de tensão de escoamento e de ruptura em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 207°C e que sofreram partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30,100s.	132
4.82	Valores de alongamento em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 167°C e que sofreram partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30,100s.	132
4.83	Superfície de fratura do corpo de prova da liga Q1 austenitizado a 890°C, temperados a 187°C e que sofreram partição a 450°C por 30. (a) Presença de microcavidades (b) Micromecanismo de fratura de baixa energia.	133
4.84	Superfície de fratura do corpo de prova da liga Q1 austenitizado a 890°C, temperados a 187°C e que sofreram partição a 450°C por 30. (a) Presença de microcavidades (b) Micromecanismo de fratura de baixa energia.	134
4.85	Valores de tensão de escoamento e de ruptura em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 147°C e que sofreram partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30,100s.	135
4.86	Valores de alongamento em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 147°C e que sofreram partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30,100s.	135
4.87	– Valores de tensão de escoamento e de ruptura em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 167°C e que sofreram partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30, 100s.	137
4.88	– Valores de alongamento em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 167°C e que sofreram partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30, 100s.	137
4.89	Superfície de fratura do corpo de prova da liga Q3 austenitizado a 890°C, temperados a 147°C e que sofreram partição a 400°C por 30. (a) presença de facetas de fratura de baixa energia, (b) regiões apresentando fratura intergranular.	138
4.90	Superfície de fratura do corpo de prova da liga Q3 austenitizado a 890°C, temperados a 147°C e que sofreram partição a 450°C por 10. (a) presença de facetas de fratura de baixa energia, (b) regiões apresentando fratura intergranular.	138
4.91	Valores de tensão de escoamento e de ruptura em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 147°C e que sofreram partição a 400 por 10, 30, 100 e 1000s.	139

4.92	Valores de alongamento em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 147°C e que sofreram partição a 400°C por 10, 30, 100 e 1000s.	139
4.93	Valores de tensão de escoamento e de ruptura em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 167°C e que sofreram partição a 350, 400 e 450°C por 10, 30, 100 e 1000s.	140
4.94	Valores de alongamento em função do tempo de partição para os corpos de prova austenitizados a 890°C, temperados a 167°C e que sofreram partição a 350, 400, 450°C por 10, 30,100 e 1000s.	142
4.95	Curva tensão-deformação para a liga Q4 na condição de austenitização a 890°C, têmpera a 147°C seguido de partição a 400°C por 10s.	142
4.96	Superfície de fratura do corpo de prova austenitizado a 890°C, temperados a 147°C e que sofreram partição a 400°C por 100s. (a) Presença de microcavidades de diferentes dimensões, (b) região apresentando um aspecto frágil da superfície de fratura.	143
4.97	Superfície de fratura do corpo de prova austenitizado a 890°C, temperados a 167°C e que sofreram partição a 450°C por 10s. (a) Presença de microcavidades de diferentes dimensões, (b) região apresentando um aspecto frágil da superfície de fratura	143
5.1	Perfis de concentração de W(C) x distância para a liga Q1 para diferentes tempos. Temperatura de partição de 400°C. Considerando a célula de ferrita com 0,15µm e de austenita com 0,068µm.	147
5.2	Perfis de atividade do carbono x distância para a liga Q1 para diferentes tempos,. Temperatura de partição de 400°C. Considerando a célula de ferrita com 0,15µm e de austenita com 0,068µm.	149
5.3	Gráfico ilustrando a variação da atividade química do carbono na interface ferrita-austenita em função do tempo.	149
5.4	Variação do fluxo, e da atividade de carbono na interface, durante a partição a 450°C, para um tamanho de ferrita de 0,2 µm e de austenita de 0,12 µm. O tempo está apresentado na escala log para facilitar a visualização de todo o processo.	151
5.5	Concentração de carbono (wt%) na interface para a ferrita (a) e para a austenita (b) em função do tempo. Temperatura de 450°C, tamanho de ferrita de 0,2 µm e de austenita de 0,12 µm. A concentração inicial de carbono é 0,0037.	151
5.6	Concentração de carbono (wt%) na interface da ferrita (a) e da austenita (b) em função do tempo. Temperatura de 400°C. Ferrita com dimensões de 0.1, 0.15 e 0.2µm e austenita com dimensão de 0.1 µm. O tempo está apresentado na escala log para facilitar a visualização de todo o processo.	153
5.7	Concentração de carbono (wt%) na interface da ferrita (a) e da austenita (b) em função do tempo. Temperatura de 450°C. Ferrita com dimensões de 0.2µm e austenita com dimensão de 0.05, 0.15 e 0.20µm. O tempo está apresentado na escala log para facilitar a visualização de todo o processo.	154

- 5.8 Concentração de carbono (wt%) na interface da ferrita (a) e da austenita (b) em função do tempo. Temperatura de 450°C. Ferrita com dimensões de 0.1 µm e austenita com dimensão de 0.05, 0.15 e 0.20µm. O tempo está apresentado na escala log para facilitar a visualização de todo o processo. 155
- 5.9 Concentração de carbono na interface da ferrita (a) e da austenita (b) em função do tempo, para as temperaturas de 350, 400 e 450°C, considerando a ferrita com 0,2 µm e de austenita de 0,1 µm. 157
- 5.10 - Gráfico ilustrando a variação da composição da ferrita e da austenita, considerando atividades idênticas para o carbono, para temperaturas entre 200 e 600°C[1]. 157
- 5.11 - Concentração de carbono na região central da célula de ferrita (a) e de austenita (b) em função do tempo. Temperatura de 450°C, tamanho de ferrita de 0,2 µm e de austenita de 0,12 µm. O eixo x está apresentando na escala log para facilitar a visualização de todo o processo 159
- 5.12 Diagrama esquemático de Energia Livre de Gibbs x composição, relacionando a atividade do carbono com a respectiva composição para diferentes tempos de partição. 161
- 5.13 Liga Q1, amostras austenitizadas a 890°C por 300s, temperadas a 167°C por 10 e submetidas à partição por 10, 30 e 100s nas temperaturas de 350, 400 e 450°C. (a) Fração de austenita em função do tempo de partição (b) Percentual de carbono na austenita em função do tempo de partição. 164
- 5.14 Liga Q1, amostras austenitizadas a 890°C por 300s, temperadas a 187°C por 10 e submetidas à partição por 10, 30, 100 e 1000s nas temperaturas de 350, 400 e 450°C. (a) Fração de austenita em função do tempo de partição (b) Percentual de carbono na austenita em função do tempo de partição. 164
- 5.15 Liga Q1, amostras austenitizadas a 890°C por 300s, temperadas a 207°C por 10 e submetidas à partição por 10, 30 e 100s nas temperaturas de 350, 400 e 450°C. (a) Fração de austenita em função do tempo de partição (b) Percentual de carbono na austenita em função do tempo de partição. 164
- 5.16 - Liga Q2, amostras austenitizadas a 890°C por 300s, temperadas a 182°C por 10 e submetidas à partição por 10, 30, 100 e 1000s nas temperaturas de 350, 400 e 450°C. (a) Fração de austenita em função do tempo de partição (b) Percentual de carbono na austenita em função do tempo de partição. 165
- 5.17 - Liga Q3, amostras austenitizadas a 890°C por 300s, temperadas a 182°C por 10 e submetidas à partição por 10, 30 e 100s nas temperaturas de 350, 400 e 450°C. (a) Fração de austenita em função do tempo de partição (b) Percentual de carbono na austenita em função do tempo de partição. 165
- 5.18 Liga Q3, amostras austenitizadas a 890°C por 300s, temperadas a 182°C por 10 e submetidas à partição por 10, 30 e 100s nas temperaturas de 350, 400 e 450°C. (a) Fração de austenita em função do tempo de partição (b) Percentual de carbono na austenita em função do tempo de partição 165

- 5.19 Liga Q4. (a) Fração de austenita em função do tempo de partição. Para amostras austenitizadas a 890°C por 300s, temperadas a 147°C por 10s e submetidas à partição por 10, 30, 100 e 1000s nas temperaturas de 350, 400 e 450°C. (b) Percentual de carbono na austenita em função do tempo de partição. 166
- 5.20 - Liga Q4 (a) Fração de austenita em função do tempo de partição. Para amostras austenitizadas a 890°C por 300s, temperadas a 167°C por 10 e submetidas à partição por 10, 30, 100 e 1000s nas temperaturas de 350, 400 e 450°C. (b) Percentual de carbono na austenita em função do tempo de partição. 166
- 5.21 (a) Fração de austenita em função do tempo de partição. Para amostras austenitizadas uma temperatura intercrítica 735°C por 1800s, temperadas a 147°C por 10s e submetidas à partição por 10, 30, 100 e 1000s nas temperaturas de 400°C. (b) Percentual de carbono na austenita em função do tempo de partição. 167
- 5.22 (a) Fração de austenita em função do tempo de partição. Para amostras austenitizadas uma temperatura intercrítica 735°C e 890°C. A temperatura de todas as amostras foi a 147°C por 10s e em seguida submetidas à partição por 10, 30, 100 e 1000s nas temperaturas de 400°C. (b) Percentual de carbono na austenita em função do tempo de partição. 167
- 5.23 Valores de alongamento na fratura em função da tensão de ruptura para amostras da liga Q1, Q3 e Q4 em diferentes condições de temperatura e partição. 169
- 5.24 Fração de austenita (%) em função da tensão de ruptura para amostras da liga Q1, Q3 e Q4 em diferentes condições de temperatura e partição. 171
- 5.25 Fração de austenita (%) em função da tensão de ruptura para amostras da liga Q1 em diferentes condições de temperatura e partição. 172
- 5.26 Fração de austenita (%) em função da tensão de ruptura para amostras da liga Q4 em diferentes condições de temperatura e partição. 172
- 5.27 Fração de austenita (%) em função da tensão de ruptura para amostras da (a) liga Q3 temperadas a 147°C e (b) temperadas a 167°C. 174
- 5.28 Micrografia da seção longitudinal do corpo de prova ensaiado em tração da liga Q3. (a) região próxima à superfície de fratura. (b) região afastada 0,1mm da superfície de fratura. (c) região afastada superfície de fratura. 176
- 5.29 Valores de resistência e alongamento na fratura na fratura total obtido para os corpos de prova submetidos ao processo de temperatura e partição, quando comparados com diferentes grupos de aço (TRIP, Dual-Phase e Martensítico). 179

## Lista de Tabelas

3.1	Composição química para as amostras projetadas e os respectivos valores de Ms e Bs.	51
3.2	Composição química das amostras em estudo e os respectivos valores de Ms e Bs.	51
3.3	Estimativa da temperatura de têmpera, em função da microestrutura inicial, considerando tratamentos intercríticos, e os percentuais de austenita final, para a liga identificada por Q1.	57
3.4	Descrição dos tratamentos térmicos realizados para a liga Q1.	61
3.5	Descrição dos tratamentos térmicos realizados para a liga Q2	61
3.6	Descrição dos tratamentos térmicos realizados para a liga Q3.	61
3.7	Descrição dos tratamentos térmicos realizados para a liga Q4	62
4.1	Resultados obtidos para a fração de austenita medida pela técnica de DR-X e utilizando processamento digital de imagens.	111
4.2	Resultados dos ensaios de tração, e da fração de austenita, para os corpos de prova da liga Q1 austenitizadas a 890 °C e temperados a 167°C e submetidos a diferentes condições de partição.	127
4.3	Resultados dos ensaios de tração, e da fração de austenita, para os corpos de prova da liga Q1 austenitizadas a 890 °C e temperados a 187°C e submetidos a diferentes condições de partição.	129
4.4	Resultados dos ensaios de tração, e da fração de austenita, para os corpos de prova da liga Q1 austenitizadas a 890 °C e temperados a 207°C e submetidos a diferentes condições de partição.	131
4.5	Resultados dos ensaios de tração, e da fração de austenita, para os corpos de prova da liga Q3 austenitizadas a 890 °C e temperados a 147°C e submetidos a diferentes condições de partição.	134
4.6	Resultados dos ensaios de tração, e da fração de austenita, para os corpos de prova da liga Q3 austenitizadas a 890 °C e temperados a 167°C e submetidos a diferentes condições de partição.	136
4.7	Resultados dos ensaios de tração, e da fração de austenita, para os corpos de prova da liga Q4 austenitizadas a 890 °C e temperados a 147°C e submetidos a diferentes condições de partição.	140
4.8	Resultados dos ensaios de tração, e da fração de austenita, para os corpos de prova da liga Q4 austenitizadas a 890 °C e temperados a 167°C e submetidos a diferentes condições de partição.	142