



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Paulo Roberto de Oliveira Nunes

Estudo e Aplicação de Novos Materiais para a Construção Civil em  
Belém do Pará.

Belém

2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Paulo Roberto de Oliveira Nunes

Estudo e Aplicação de Novos Materiais para a Construção Civil em  
Belém do Pará.

Dissertação apresentação para a obtenção do  
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica,  
Instituto de Tecnologia, Universidade Federal  
do Pará.

Área de Concentração Materiais e Processos.  
Orientador: Prof. Dr. Fernando Antônio de Sá

Belém

2009

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP), Biblioteca do Mestrado em Engenharia Mecânica/ UFPA, Belém-Pa.**

N972e            Nunes, Paulo Roberto de Oliveira

Estudo e aplicação de novos materiais para a construção civil em Belém do Pará / Paulo Roberto de Oliveira Nunes; orientador Fernando Antônio de Sá. – Belém, 2009.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009.

1. PRODUÇÃO COMERCIAL - vergalhões. 2. CONCRETO ARMADO – construção civil. 3. CONCRETO ARMADO - vergalhões – microestrutura. 4. SOLDABILIDADE. I. Sá, Antônio Fernando de, orientador. II. Título.

CDD 19 ed. 669.141

Paulo Roberto de Oliveira Nunes

Estudo e Aplicação de Novos Materiais para a Construção Civil em  
Belém do Pará.

Dissertação apresentação para a obtenção do  
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica,  
Instituto de Tecnologia, Universidade Federal  
do Pará.  
Área de Concentração Materiais e Processos.

Data de aprovação:

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Antônio Fernando de Sá - UFPa

Orientador

---

Prof. Dr. Fathi Aref Ibraim Darwish - UFF

Membro Externo

---

Prof. Dra. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias - UFPa

Membro Interno

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me proporcionar condições de saúde e determinação para poder concretizar mais esta missão.

Ao Professor Dr. Fernando Antônio de Sá, pelos ensinamentos, orientações seguras e pacientes e pelo estímulo que me transmitiu entusiasmo para a elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal do Pará - UFPA que, através do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – POSMEC, me proporcionou a oportunidade de participar deste curso; e ao Sr. Arnaldo M. da Silva, do Laboratório da Engenharia Civil da UFPA pela realização dos ensaios mecânicos, nas várias amostras dos experimentos.

Ao Professor MSc. Fernando Gonçalves do Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará - CEFET .

À Direção da COPALA – Indústrias Reunidas S.A., de forma muito especial ao Srs. José M. da C. Mendonça e Manoel Ibiapina A.C.Macedo Neto, pelo total apoio e incentivo para a realização dos experimentos nas instalações da Empresa e pela liberação do meu tempo, para o comparecimento às atividades acadêmicas.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste estudo.

Aos meus companheiros da Equipe “Martensita Revenida” da COPALA: Adalton Sales (Índio), Alysson Pontes, André Gemaque, Cristiano Rodrigues (Gordinho), Idivaldo Bastos de Souza (Verme), Jonas P. Santos (Estrupício), Lucídio Pereira da Silva (Piauí), Marco A. S. de Oliveira (Marquinho), Raimundo N. S. e Santos (Grilo), Reginaldo N. de Oliveira (Traíra), Renato Avelar (Barril) e, em especial amigo e parceiro incansável Enderson Rauff Pinheiro (O Ciclista da Madrugada), que teve importante participação na preparação desta dissertação.

E de forma muito especial ao meu “Porto Seguro”, minha querida esposa e companheira Heloísa Helena C. da Luz, pela sua paciência, suporte, companheirismo e compreensão, sendo a minha fonte de energia e perseverança, para transpor todas as barreiras, e chegar, com êxito, à conclusão deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	5
<b>SUMÁRIO</b> .....	6
<b>RESUMO</b> .....	8
<b>ABSTRACT</b> .....	9
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	10
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	15
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	17
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	19
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	19
1.2 JUSTIFICATIVA.....	21
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 <b>Objetivo geral</b> .....	23
1.3.2 <b>Objetivos específicos</b> .....	23
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	24
2.1 PROCESSOS PRODUTIVOS ATUAIS .....	24
2.2 BARRAS PARA ARMADURAS DE CONCRETO ARMADO .....	32
2.3 TRATAMENTO TÉRMICO/TRANSFORMAÇÕES DE FASES.....	33
2.3.1 <b>Soluções sólidas de ferro</b> .....	33
2.3.2 <b>Curvas de resfriamento para aços hipoeutetóides</b> .....	37
2.3.3 <b>Transformações metalúrgicas</b> .....	38
2.3.4 <b>Recristalização, crescimento de grão e textura</b> .....	44
2.4 RESISTÊNCIA A SISMOS E A ALTAS TEMPERATURAS .....	49
2.5 SOLDABILIDADE.....	52
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	58
3.1 MATERIAIS DE REFERÊNCIA .....	64
3.2 EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	68
3.3 EQUIPAMENTOS E METODOLOGIAS .....	76
3.3.1 <b>Análises químicas</b> .....	77
3.3.2 <b>Ensaio de propriedades mecânicas</b> .....	78
3.3.3 <b>Ensaio metalográfico</b> .....	80
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	81
4.1 RESULTADOS.....	81
4.1.1 <b>Análises químicas</b> .....	81

4.1.2 Ensaio de propriedades mecânicas .....	82
4.1.3 Ensaio metalográfico .....	89
4.2 DISCUSSÕES .....	90
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>97</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	97
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>99</b>
<b>NORMAS TÉCNICAS UTILIZADAS .....</b>	<b>106</b>

## RESUMO

Esta pesquisa teve como principal objetivo o desenvolvimento e a aplicação de novos materiais para a produção de vergalhões pela indústria local. Atualmente, os vergalhões para a construção civil, são produzidos por processo de laminação a quente e resfriamento ao ar, a partir de aço produzido com composição química de elevados teores de carbono equivalente (C.E.). Para a realização dos experimentos foi empregado material com composição química modificada, com menores teores de C.E.. Durante a laminação a quente, foi aplicado um resfriamento brusco às barras, seguido de um resfriamento ao ar. Através deste tratamento térmico, ocorreram modificações na microestrutura das barras. Os vergalhões produzidos foram então submetidos a diversos ensaios de avaliação, cujos resultados demonstraram evidências de melhorias importantes na resistência mecânica destes produtos. As barras obtidas com esta nova composição química, além de otimizar os custos operacionais, também resultaram em material com melhores possibilidades de soldagem, por processos mais simples, em relação aos normalmente empregados. Através desta modificação na composição química tem-se como expectativa uma redução de aproximadamente 2,1 kg de pó de carbono e de 5,8 kg da liga ferro-sílico-manganês por tonelada de aço. Os experimentos foram realizados em condições operacionais que ainda não são as ideais, porém a avaliação dos resultados é um sinal que estimula a realização de futuros testes, em melhores condições, os quais certamente resultarão em melhorias ainda mais significativas.

**Palavras-chave:** Vergalhões para concreto armado. Resfriamento brusco na laminação. Tratamento térmico. Modificação da microestrutura. Melhoria nas propriedades mecânicas. Otimização dos custos operacionais.

## **ABSTRACT**

The main objective of this research was the development and application of new materials, for the production of reinforcing bars by the local industry. At present, these products are manufactured in a hot rolling mill, followed by air cooling, and made from a steel with a high carbon equivalent (C.E.) in its chemical composition. In the experiments, it was employed a material with a modified chemical composition, having a lower C.E. During the hot rolling, a rapid water cooling was applied to the bars, followed by an atmospheric cooling. Through this heat treatment, the microstructure of the bars was modified. The produced reinforcing bars were then subjected to several evaluation essays, which results shown evidences of important implementation on their mechanical resistance. The products manufactured from this modified chemical composition, besides optimizing the operating costs, also resulted in materials with better possibilities of being welded by simpler processes, in relation to those nowadays applied. Through these modifications in the chemical composition there is an expectation of reduction in the consumption of approximately 2,1 kg of carbon powder and of 5,8 kg of the iron-silicon-manganese alloy per ton of produced steel. The experiments took place in not yet ideal conditions, but the evaluation of the results is a sign that stimulates the realization of future tests, in better conditions, which certainly will result in more significant improvements.

**Key words:** Reinforcing bars. Rapid water cooling in the hot rolling mill. Heat treatment. Modification of microstructure. Implementation in the mechanical resistance. Optimization of the operating costs.

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 1

Figura 1.1 – Consumo aparente de produtos de aços longos (GERDAU, 2006).....18

### Capítulo 2

Figura 2.1 – Ciclo de resfriamento de barras processo Tempcore.....24

Figura 2.2 – Curvas de variação de temperatura da barra para diferentes posições de raio durante o processo de tratamento térmico superficial. (ALVES, 2004).....25

Figura 2.3 – Equipamento para resfriamento de barras (THERMEX, 2006).....26

Figura 2.4 – Bancada de resfriamento (MEFOS, 2008).....26

Figura 2.5 – Sistema de resfriamento com água (MEFOS, 2008).....27

Figura 2.6 – Instalação Thermex para resfriamento de barras (THERMEX, 2006).....27

Figura 2.7 – Representação esquemática do canhão Thermex. (ALVES, 2004).....28

Figura 2.8 – Comparativo entre os sistemas Thermex e Tempcore. (TAMM, 2003).....29

Figura 2.9 – Barras retas de aços produzidas. (ONE STEEL, 2007).....30

Figura 2.10 – Martensita tetragonal em alguns aços (BHADESHIA, 1996).....36

Figura 2.11 – Diagrama CCT para um aço de baixa liga, com 0,2% de carbono. (ASKELAND, 2003).....37

Figura 2.12 – Relação entre resistência mecânica e teor de carbono. (CALLISTER, 2002.).....38

Figura 2.13 – Relação entre temperatura de início de formação de martensita e teor de carbono. (ASKELAND, 2003).....39

Figura 2.14 - Relação entre resistência mecânica e temperatura de revenimento (MEYRICK, 2001).....41

Figura 2.15 – Microestrutura da martensita revenida. (ASKELAND, 2003).....	42
Figura 2.16 – Ilustração esquemática da fragilização da martensita revenida de um aço temperado e revenido. (BRIANT e BANERJI, 1978).....	43
Figura 2.17 – Influência da taxa de resfriamento na resistência ao escoamento (HASHIMOTO e NAKAMURA, 2006).....	44
Figura 2.18 – Influência da taxa de resfriamento no limite de resistência (HASHIMOTO e NAKAMURA, 2006).....	45
Figura 2.19 – Taxa de resfriamento x tamanho de grão. (HASHIMOTO e NAKAMURA, 2006).....	45
Figura 2.20 – Efeito da taxa de resfriamento na microestrutura no aço com 0,25%C, 0,5%Si e 1,2%Mn. (HASHIMOTO e NAKAMURA, 2006).....	46
Figura 2.21 – Ilustração mostrando o efeito do resfriamento acelerado no tamanho de grão e na microestrutura transformada. (HASHIMOTO e NAKAMURA, 2006).....	46
Figura 2.22 – Representação esquemática da evolução da recristalização metadinâmica durante a laminação a quente. (PADILHA, 2005).....	47
Figura 2.23 - Redução da resistência dos aços para concreto armado. (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002).....	50
Figura 2.24 - Redução do módulo de elasticidade dos aços para concreto armado. (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002).....	50
Figura 2.25 – Armação treliçada. (SANTINE, 2004).....	52
Figura 2.26 – Aplicação de armação treliçada. (SANTINE, 2004).....	52
Figura 2.27 – Aplicação de produtos pré-fabricados – tapetes de aço (ONE STEEL, 2007).....	53
Figura 2.28 – Microestrutura multiconstituída de uma região soldada (BAPTISTA, s.d.).....	55
Figura 2.29 – Corte em secção transversal de vergalhão com tratamento térmico superficial. Visualização das regiões afetadas através da transferência de calor (ALVES, 2004).....	56

### **Capítulo 3**

Figura 3.1 – Fluxograma – metodologia experimental.....	57
Figura 3.2 – Cestão de carga fria.....	58

Figura 3.3 – Forno a arco elétrico.....	59
Figura 3.4 – Lingoteiras.....	59
Figura 3.5 – Forno de reaquecimento.....	60
Figura 3.6 – Área de laminação da barras.....	60
Figura 3.7 – Taxa de deformação nos últimos passes da laminação para a produção do vergalhão Ø 10mm.....	61
Figura 3.8 – Área da seção transversal do lingote 10 X 10 cm.....	61
Figura 3.9 – Espectrômetro para a realização de análises químicas.....	62
Figura 3.10 – Prensa tesoura para o corte das amostras.....	62
Figura 3.11 – Identificação das amostras coletadas do 4º experimento.....	63
Figura 3.12 – Metalografia do centro da amostra do fabricante “A” Ø 10,0mm – 400X (CEFET, 2008).....	64
Figura 3.13 – Metalografia da superfície da amostra fabricante “A” Ø 10,0mm – 400X (CEFET, 2008).....	64
Figura 3.14 – Metalografia do centro da amostra fabricante “B” Ø 10,0mm – 400X (CEFET, 2008).....	65
Figura 3.15 – Metalografia da superfície da amostra fabricante “B” Ø 10,0mm – 400X (CEFET, 2008).....	66
Figura 3.16 – Relação entre resistência ao escoamento, alongamento (%) e carbono equivalente em vergalhões bitola 10mm, em 800 amostras não resfriadas.....	67
Figura 3.17 – Parte da equipe participante dos experimentos.....	67
Figura 3.18 – Desenformamento dos lingotes e medição de temperatura.....	68
Figura 3.19 – Início da laminação dos lingotes (trem de desbaste).....	68
Figura 3.20 – Medição de temperatura antes do trem de desbaste.....	69
Figura 3.21 – Passagem dos lingotes pelo ultimo estágio de laminação (trem acabador).....	69
Figura 3.22 – Medição de temperatura antes do resfriamento.....	70
Figura 3.23 – Resfriamento brusco das barras (após trem acabador).....	70
Figura 3.24 – Medição de temperatura após o resfriamento.....	70
Figura 3.25 – Registro de tempo.....	71

Figura 3.26 – Registro dos dados.....	71
Figura 3.27 – Forno de reaquecimento de lingotes na laminação.....	72
Figura 3.28 - Cilindro do trem acabador.....	73
Figura 3.29 - Tesoura de corte das barras.....	73
Figura 3.30 – Resfriamento das barras.....	74
Figura 3.31 – Lavadoras de alta pressão.....	75
Figura 3.32 – Pirômetros óticos e forno usado para austenitização das amostras do primeiro experimento.....	76
Figura 3.33 – Espectrômetro Ótico.....	76
Figura 3.34 – Máquina universal de ensaios – Amsler capacidade 100 t.....	77
Figura 3.35 – Balança para a pesagem das barras para a determinação da densidade linear de massa. (peso por metro).....	77
Figura 3.36 – Equipamento para a marcação preliminar para a determinação do alongamento % após a ruptura em 10 Ø.....	78
Figura 3.37 – Máquina universal de ensaios - Pino aplicado para a realização do ensaio de dobramento a 180°.....	78
Figura 3.38 – Microscópio ótico.....	79

## Capítulo 4

Figura 4.1 – Gráfico variação do limite de resistêcia – barras do 4° experimento.....	83
Figura 4.2 – Gráfico variação de resistêcia de escoamento – barras do 4° experimento.....	84
Figura 4.3 – Gráfico variação da relação limite de resistêcia/ resistêcia de escoamento – barras do 4° experimento.....	85
Figura 4.4 – Gráfico variação do alongamento – barras do 4° experimento.....	85
Figura 4.5 – Fotografias das estrições nas rupturas das amostras do experimento 4.....	87
Figura 4.6 – Metalografia da amostra 2 - Corrida TESTE COP.....	88
Figura 4.7 – Metalografia da amostra 5 - Corrida TESTE COP.....	89

Figura 4.8 – Relação entre resistência de escoamento e carbono equivalente nas amostras dos experimentos 3 e 4, das 800 amostras da produção, sem resfriamento, e os dados dos fabricantes “A” e “B”.....92

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo 1

Tabela 1.1 – Ranking mundial de produtores de aço (IISI, 2008).....	18
---	----

### Capítulo 2

Tabela 2.1 – Especificações para composições químicas para aços destinados à produção de vergalhões. (MACAU, DECRETO LEI 64/96).....	30
--	----

Tabela 2.2 – Requisitos mínimos estabelecidos pela NBR ABNT 7480.....	32
---	----

Tabela 2.3 – Composição química dos aços (% em massa). (HASHIMOTO e NAKAMURA, 2006).....	44
--	----

### Capítulo 3

Tabela 3.1 – Ensaio físico fabricante “A” .....	63
---	----

Tabela 3.2 – Análises químicas fabricante “A” .....	64
---	----

Tabela 3.3 – Ensaio físico fabricante “B” .....	65
---	----

Tabela 3.4 – Análises químicas fabricante “B” .....	65
---	----

Tabela 3.5 – Médias das análises químicas e dos ensaios físicos das 800 amostras produzidas sem resfriamento.....	66
---	----

### Capítulo 4

Tabela 4.1 – Análise química da corrida TESTE – 1º experimento.....	80
---	----

Tabela 4.2 – Análise química da corrida 1302 – 2º experimento.....	80
--	----

Tabela 4.3 – Análise química da corrida 1311 – 2º experimento.....	80
--	----

Tabela 4.4 – Análise química da corrida 1563 – 3º experimento.....	80
--	----

Tabela 4.5 – Análise química da corrida TESTE COP.....	80
--	----

Tabela 4.6 – Ensaio físico da corrida TESTE – 1º experimento.....	81
---	----

Tabela 4.7 – Ensaio físico da corrida 1302 – 2º experimento.....	81
Tabela 4.8 – Ensaio físico da corrida 1311 – 2º experimento.....	81
Tabela 4.9 – Ensaio físico da corrida 1563 – 3º experimento.....	81
Tabela 4.10 – Ensaio físico da corrida TESTE COP – 4º experimento.....	82
Tabela 4.11 – Resumo dos ensaios físicos do 4º experimento.....	82
Tabela 4.12 – Valores de reduções nas áreas transversais das barras na ruptura com resfriamento (estricção).....	87
Tabela 4.13 – Valores de reduções nas áreas transversais das barras na ruptura sem resfriamento (estricção).....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>A</b>	Alongamento após ruptura em 10 Ø (%) - Norma ABNT NBR 7480.
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
<b>Agt</b>	Alongamento na força máxima (%) - Norma ABNT NBR 7480.
<b>Along.</b>	Alongamento (%).
<b>AZ/NZS</b>	Normas técnicas da Austrália e Nova Zelândia.
<b>CA 25</b>	Barras de aço para concreto armado com resistência ao escoamento de 25 kgf/mm <sup>2</sup> .
<b>CA 50</b>	Barras de aço para concreto armado com resistência ao escoamento de 50 kgf/mm <sup>2</sup> .
<b>CA 60</b>	Fios de aço para concreto armado com resistência ao escoamento de 60 kgf/mm <sup>2</sup> .
<b>CA 42 S</b>	Barras de aço com resistência ao escoamento de 42 kgf/mm <sup>2</sup> .
<b>C.E.</b>	% de carbono equivalente.
<b>CCC</b>	Sistema cristalino cúbico de corpo centrado.
<b>CCT</b>	Diagrama de resfriamento de transformação de fases por resfriamento contínuo - continuous cooling transformation.
<b>CFC</b>	Sistema cristalino cúbico de face centrada.
<b>C.R.M.</b>	Centre de Reserches Metallurgiques - Centro de Pesquisas Metalúrgicas –Liege, Bélgica.
<b>Dobr.180°</b>	Ensaio de dobramento a 180° - norma ABNT 7480.
<b>Ec</b>	Módulo de elasticidade.
<b>F.A.E.</b>	Forno a arco elétrico.
<b>Fst</b>	Limite de resistência - NBR 7480.
<b>Fyk</b>	Resistência ao escoamento - NBR 7480.
<b>IBS</b>	Instituto Brasileiro de Siderurgia.
<b>IISI</b>	Instituto Internacional de Ferro e Aço - International Institute of Iron and Steel.
<b>ISO</b>	The International Organization for Standardization - Organização Internacional para Normalização.
<b>IIW</b>	Instituto Internacional de Solda - International Institute of Welding.
<b>ITT</b>	Diagrama de transformação isotérmica - Isothermal cooling transformation.
<b>NBR</b>	Norma Brasileira.
<b>T.E.</b>	Resistência ao escoamento - denominação usual com o mesmo significado da Fyk da NBR 7480.

- T.R.** Limite de resistência - denominação usual com o mesmo significado da  $F_y$  NBR 7480.
- TTT** Diagrama de transformação de fases - tempo, temperatura, transformação.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Cenário Internacional e do Brasil do Mercado Aço.

Komatsu, na edição de 26 de janeiro 2008 do jornal *O Estado de São Paulo* publicou a seguinte matéria:

*2007 foi um ano de resultados positivos para a siderurgia. Em nível global, o crescimento do consumo aparente foi da ordem de 6,8%, atingindo cerca de 1,20 bilhão de toneladas de produtos siderúrgicos.*

Segundo o Instituto Internacional de Ferro e Aço - IISI a produção de aço bruto mundo já contava com um novo recorde em 2007. Atingiu 1,34 bilhão de toneladas, e os dez maiores produtores são mostrados na tabela 1.1. O Brasil ocupa a 9ª posição.

Tabela 1.1 - Ranking mundial de produtores de aço (IISI, 2008)

<b>País</b>	<b>Ranking</b>	<b>2007</b>	<b>2006</b>	<b>%07/06</b>
<b>China</b>	1	489	422,2	15,7
<b>Japão</b>	2	120,2	116,2	3,4
<b>E.U.A</b>	3	97,2	98,6	-1,4
<b>Rússia</b>	4	72,2	70,8	2
<b>Índia</b>	5	53,1	49,5	7,2
<b>Coréia do Sul</b>	6	51,4	48,5	6
<b>Alemanha</b>	7	48,5	47,2	2,8
<b>Ucrânia</b>	8	42,8	40,9	4,7
<b>Brasil</b>	9	33,8	30,9	9,3
<b>Itália</b>	10	32	31,6	1,2

No plano interno, tivemos um ano de sucessivos recordes, tanto na produção, como no consumo. A produção de aço bruto, estimada pelo Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS, foi de aproximadamente 34 milhões de toneladas. (REVISTA GAZETA MERCANTIL, INFOMET, 2008)

O aumento de demanda no mercado interno foi observado, em praticamente todos os grandes setores consumidores, com destaque aos bens de capital (+30,7%), construção civil (+16,2%), automotivo (+17,8%) e utilidades comerciais (+16,7%). O consumo aparente doméstico apresentou, assim, crescimento de 19,7%, totalizando cerca de 22,2 milhões de toneladas de produtos, sendo 13,4 milhões de produtos planos (+20,5%) e 8,8 milhões de produtos longos (+18,5%).

Ao longo de 2007 todas as empresas siderúrgicas mantiveram ativos programas de investimentos, não só para ampliação da capacidade produtiva, como para o enobrecimento da mistura de produção.

A capacidade total do setor atingiu em 2007; 41,0 milhões de toneladas/ano. (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA - IBS, 2008)

#### Mercado Mundial de Aços Longos

Observa-se na Figura 1.1 que para o ano de 2005, de um consumo aparente de 1,05 bilhão de toneladas, 479 milhões foram de produtos longos, dos quais aproximadamente 200 milhões destinaram-se ao mercado de vergalhões.

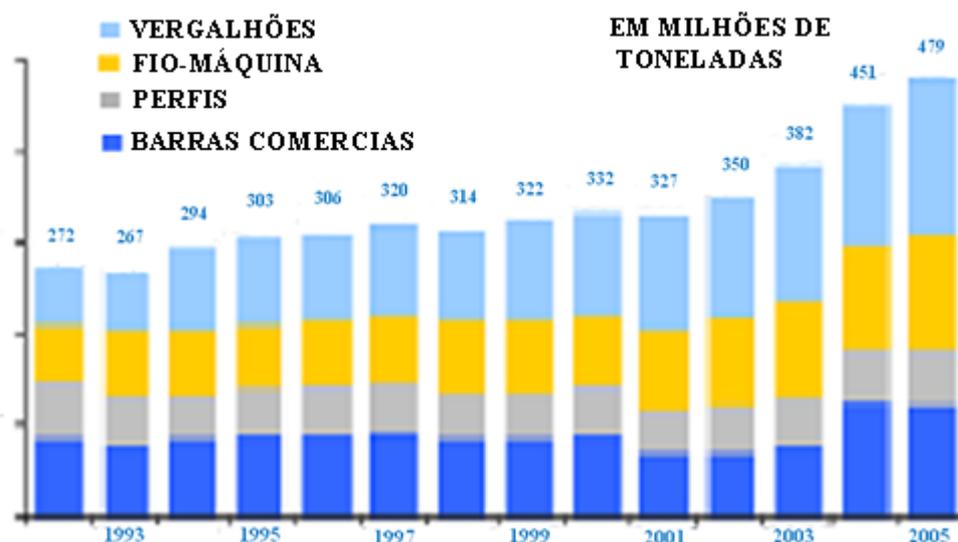


Figura 1.1 - Consumo aparente de produtos de aços longos (GERDAU, 2006)

#### Produção Brasileira de Aços Longos

A produção de laminados longos, utilizados principalmente na construção, cresceu 8,8% em 2007, quando foram produzidas 9,8 milhões de toneladas. (KOMATSU, 2008).

#### Novas Exigências do Mercado de Aços Estruturais

A competitividade cada vez mais acirrada entre as diversas siderúrgicas e as novas exigências do mercado, continuamente, têm promovido o desenvolvimento de novos aços estruturais que atendam aos requisitos, cada vez mais severos, de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e de mais fácil soldabilidade. (ONE STEEL, 2003)

O aumento da necessidade da execução de soldas na construção civil tem levado as usinas siderúrgicas ao desenvolvimento de barras de aço CA-50, que também sejam soldáveis. (ONE STEEL, 2003)

O desenvolvimento de novos tipos de aços é um desafio para a produção siderúrgica na Amazônia.

Sabe-se que na região amazônica localizam-se fontes de matérias-primas inigualáveis no território brasileiro, sendo de extrema importância a existência de reservas de minério de ferro na Província Mineral de Carajás.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Na indústria siderúrgica, mudanças tecnológicas têm ocorrido de maneira sistemática.

Recentemente, foi iniciada a produção incipiente de vergalhões para concreto armado, com composições químicas modificadas e com menores custos de fabricação, buscando a melhoria das propriedades mecânicas do aço.

As propriedades mecânicas do aço são definidas através do controle da sua microestrutura e das fases que as constituem. Isto pode ser conseguido através da escolha adequada da composição química e de tratamentos termomecânicos. A microestrutura final depende da sua composição e da sua história termomecânica. A história pode envolver somente o tratamento térmico, somente o tratamento mecânico ou uma combinação de ambos (ROTHER, 2005). Os tratamentos térmicos podem modificar as microestruturas dos aços por processos tais como: recuperação, recristalização, crescimento de grãos e transformação de fases.(MEYRICK, 2001).

A literatura mostra, em várias publicações tais como: One Steel Reinventing Reinforcing (2003), One Steel (2003), Santine (2006), Department of Building and Housing da Austrália(2005), Belgo(2007), que esses aços deverão ter em sua composição, teores de carbono e de manganês controlados, de tal modo que também não apresentem grandes dificuldades aos procedimentos de soldagem aos quais poderão ser submetidos.

Estas melhorias de propriedades podem ser conseguidas através de dois mecanismos: ou pela adição de elementos de liga, a um nível mínimo, complementados ou não por tratamentos térmicos, que promovam endurecimento por precipitação, ou por tratamento termomecânico (laminação controlada) de aços-carbono comuns ou microligados (ROTHER, 2005).

Diversos trabalhos publicados – (FENGPUC – RS[s.d.]), (SINGH; SAHA, 2006), (BAYER, 2003), (DREWES; WALKER , [s.d.]), (POLITO, 2006), apontam como resultados que o acréscimo de determinados elementos de liga, melhoram a resistência mecânica e à corrosão, os quais resultam em melhorias no comportamento mecânico da liga.

As novas tecnologias de processamento dos aços exigem um conhecimento cada vez mais aprofundado do sinergismo processo-microestrutura-propriedades dos aços atuais e futuros. A necessidade destes novos conhecimentos é a melhoria das propriedades dos aços, de tal forma a torná-los cada vez mais competitivos, comercialmente. (EUROPEAN COMMISSION, 2001).

Diversas outras publicações como por exemplo, Tempcore(1975), One Steel(2003), Gerdau(2006), Thermex(2006 – 2007) e Belgo(2007), Nagasaka et. al.(1993), indicam a possibilidade da obtenção de barras estruturais, com boas condições de resistência mecânica e de fácil soldagem, através de processos de controle da temperatura, durante a laminação, que resultam na produção de barras, com estruturas metalúrgicas modificadas, pelo tratamento térmico, obtendo-se, desta forma, as propriedades desejadas.

Surge daí a necessidade de se obter um estudo mais detalhado do efeito no comportamento mecânico, decorrente da aplicação do processo de laminação controlada, na produção de vergalhões para concreto armado, através de projetos de pesquisa aplicada, em aços com baixo teor de carbono, que atendam às especificações da indústria da construção civil, e que, ao mesmo tempo, respondam às necessidades desse setor, fortemente marcado pela questão do desperdício (excessivo descarte de pontas).

Na composição química, o carbono equivalente (C.E.) é utilizado como um indicador para a soldabilidade dos aços. Várias fórmulas baseadas no empirismo, têm sido utilizadas para sinalizar esta propriedade, tais como as dos seguintes autores: Dearden e O'Neill(1940), Bastien(1970), Yurioka(1987), Kihara(1959), Shinozaki(1982), Stout(1976). Porém, a fórmula para o cálculo do C.E., com maior utilização é aquela adotada pelo International Institute of Welding - I.I.W., conforme compilação feita por Gorni( 2007).

$$CE = C + Mn/6 + Ni/15 + Cu/15 + Cr/5 + Mo/5 + V/5$$

*Onde: os símbolos dos elementos representam os seus respectivos % em peso.*

Dados experimentais e de bibliografia (MODENESI, 2004; REID, 2005) indicam que o C.E. deve ser limitado, porém não existe um consenso a respeito dos limites máximos estabelecidos para este parâmetro, dada a sua natureza empírica.

A amplitude referenciada por diversos autores, em relação ao carbono equivalente máximo adotado para aços soldáveis varia de 0,41% a 0,55%.(SAHA; JAYANDA, 2006). As normas americana e canadense estabelecem que barras de aço com C.E. máximo de 0,44% não precisam de pré-aquecimento antes da solda, porém precisarão de um aquecimento de, pelo menos, até 10° C se o C.E. for menor ou igual a 0,55% ( BIRO, GEORGE T. 2005).

A limitação do C.E. expressa, de forma simplificada, a redução da tendência à formação de martensita nas regiões das soldas, afetadas pelo calor, e, conseqüentemente, da possibilidade do surgimento de trincas, durante o resfriamento, as quais prejudicariam a qualidade do material, em relação as suas características de ductilidade, resistência mecânica e de resistência ao dobramento.(MODENESI, 2004),(KOU, [s.d.]).

**Um estudo desta natureza pode trazer como contribuição:**

*No setor da metalurgia da região:* a possibilidade de capacitação e atualização da mão-de-obra local, inserindo inovações metodológicas operacionais;

*No setor da construção civil:* a possibilidade do aproveitamento da sucata e, paralelamente, com a redução das sobras dos vergalhões, com a minimização de desperdícios de material, traduzindo-se em menores custos operacionais, refletindo-se em economia global na construção civil;

*Na ciência:* a inserção de um campo de estudo ainda pouco explorado na região, possibilitando a abertura de uma linha de pesquisa;

*Na sociedade:* a vantagem da produção de um novo material, ecologicamente correto, que propicie a utilização da sucata, bem como a criação de empregos diretos e indiretos, cumprindo então a função da ciência e tecnologia, na construção da modernidade, centrada no desenvolvimento econômico e social.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo geral

Desenvolver a produção de barras de aços com novas microestruturas na siderurgia regional, utilizadas para a indústria da construção civil, atendendo às demandas futuras desse setor industrial.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

Fabricar aços, a partir de composições químicas controladas, com novas estruturas, para a produção de barras laminadas a quente, destinadas a armaduras para concreto armado, com características de resistência mecânica melhoradas.

Promover um processo de resfriamento drástico, aplicado a barras laminadas a quente, tendo-se como interesse a formação e avaliação de novas estruturas metalúrgicas.

Correlacionar os aspectos microestruturais destes materiais com as propriedades mecânicas;

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. PROCESSOS PRODUTIVOS ATUAIS

As barras destinadas a armaduras para concreto armado, dependendo da sua categoria de resistência mecânica, podem ser produzidas por algum dos seguintes processos:

Laminação a quente, com resfriamento ao ar, de barras de aço comum ao carbono;

Laminação a quente, resfriamento ao ar e posterior torção para aumentar a resistência. Esta tecnologia já foi utilizada no Brasil, mas a atual norma da NBR ABNT 7480 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT não mais autoriza esta prática, porém, ela ainda é adotada em outros países, como a Índia.

Laminação a quente, com resfriamento ao ar, de barras de aço com teor médio de carbono, com ou sem a adição de alguns elementos de liga, para a produção de barras de maior resistência; e

Laminação a quente, com resfriamento controlado, a partir de aços com baixos teores de carbono e manganês, com ou sem a adição de elementos de liga, para a fabricação de produtos com maior resistência, boa ductilidade e com mais fácil soldabilidade (REID CONSTRUCTION SYSTEMS, 2005).

Esta última alternativa que emprega na realidade um tratamento térmico com água, durante o processo de laminação, para a melhoria das propriedades mecânicas dos vergalhões, vem se consolidando como um processo de fabricação na maioria das usinas siderúrgicas. (NAGASAKA et. al. 1993).

Esta prática está sendo adotada maciçamente pelos maiores produtores mundiais de barras para concreto armado (EUROPEAN COMMISSION, 2001), inclusive os do Brasil. Ela também resulta em benefícios, em termos de custos de produção, quando comparada com outras alternativas que exigem o emprego, por exemplo, de aços microligados.

Com o sistema de tratamento térmico, provocado pelo resfriamento, instalado logo após a saída do último cilindro do trem acabador, a barra laminada, em contato com a água, sofre brusco

resfriamento e, nestas condições, ocorrem transformações de fases, conforme mostrado na Figura 2.1. (CASCUDO, 2000)

As barras a serem conformadas, são aquecidas num forno de reaquecimento e laminadas, através de uma seqüência de passes, em conjuntos de laminadores, os quais, progressivamente, reduzem o lingote ao seu tamanho e forma final da barra.

A barra é sujeita a um tratamento térmico em três etapas sucessivas, denominadas de têmpera, revenimento e resfriamento ao ar, conforme mostrado na Figura 2.1.

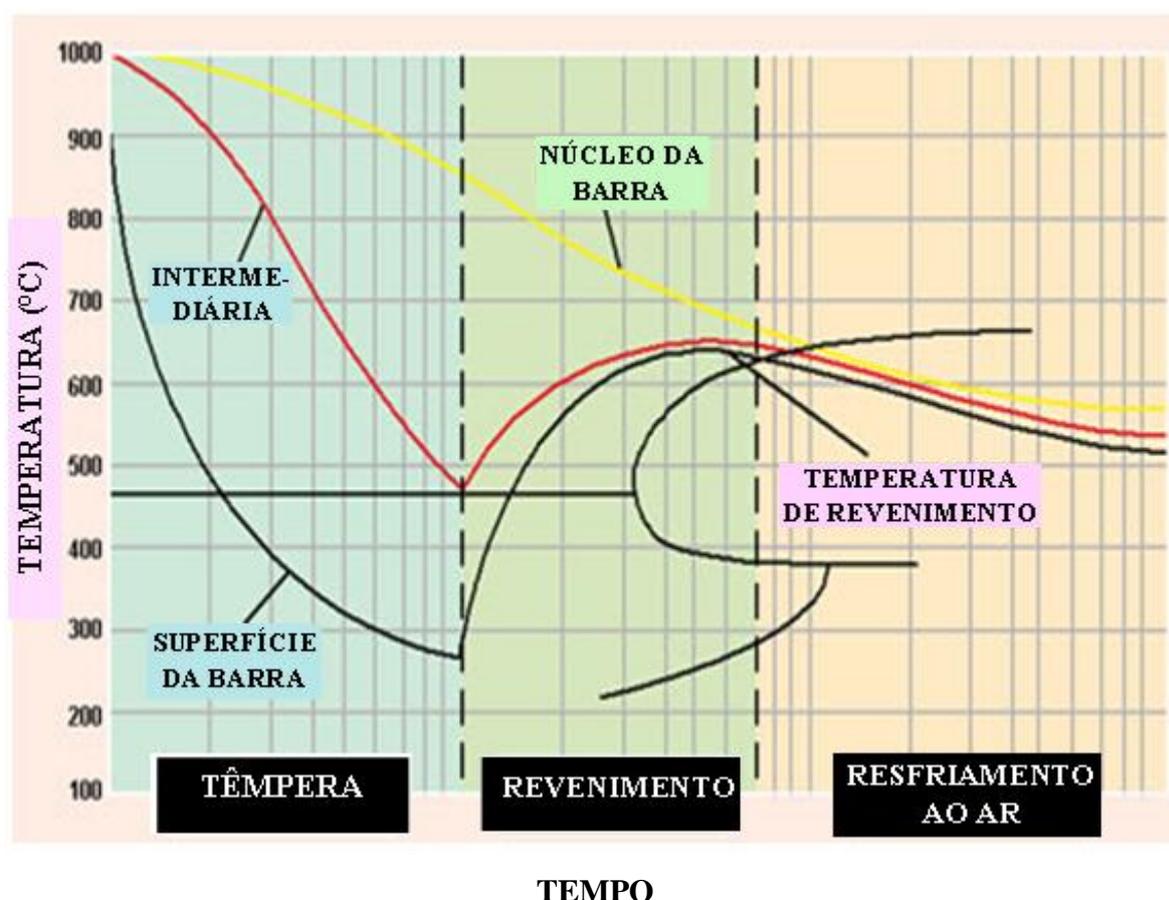


Figura 2.1 - Ciclo de resfriamento de barras processo Tempcore (TEMPCORE, 1975)

O primeiro estágio, de têmpera, começa assim que a barra sai do trem acabador, sendo então rapidamente resfriada, por um sistema de pulverizadores de água.

Isto transforma a camada superficial da barra, numa estrutura endurecida, chamada martensita, enquanto o núcleo permanece austenítico.

O segundo estágio, de autorevenimento, começa quando a barra deixa a unidade de têmpera, com um gradiente de temperatura através da sua secção transversal, sendo a temperatura do núcleo superior a da superfície.

Isto faz com que o calor flua do centro para a superfície, resultando no revenimento da superfície, gerando uma estrutura chamada “martensita revenida”, resistente e tenaz.

O núcleo ainda permanece austenítico neste estágio.

O terceiro estágio, de resfriamento ao ar, acontece no leito de resfriamento, onde o núcleo austenítico é transformado num núcleo dúctil de ferrita-perlita. Então, a estrutura final consiste numa combinação de uma camada externa de alta resistência, de martensita revenida, e um núcleo dúctil de ferrita-perlita.

Desta forma fica formada uma estrutura combinada, que resulta na melhoria de resistência, ductilidade, tenacidade e algumas características de soldabilidade, exigidas para o produto final.

Este é o fundamento dos dois mais tradicionais processos de resfriamento controlado adotados no mundo: o Thermex e o Tempcore, cujos princípios fundamentais são mostrados na Figura 2.2.

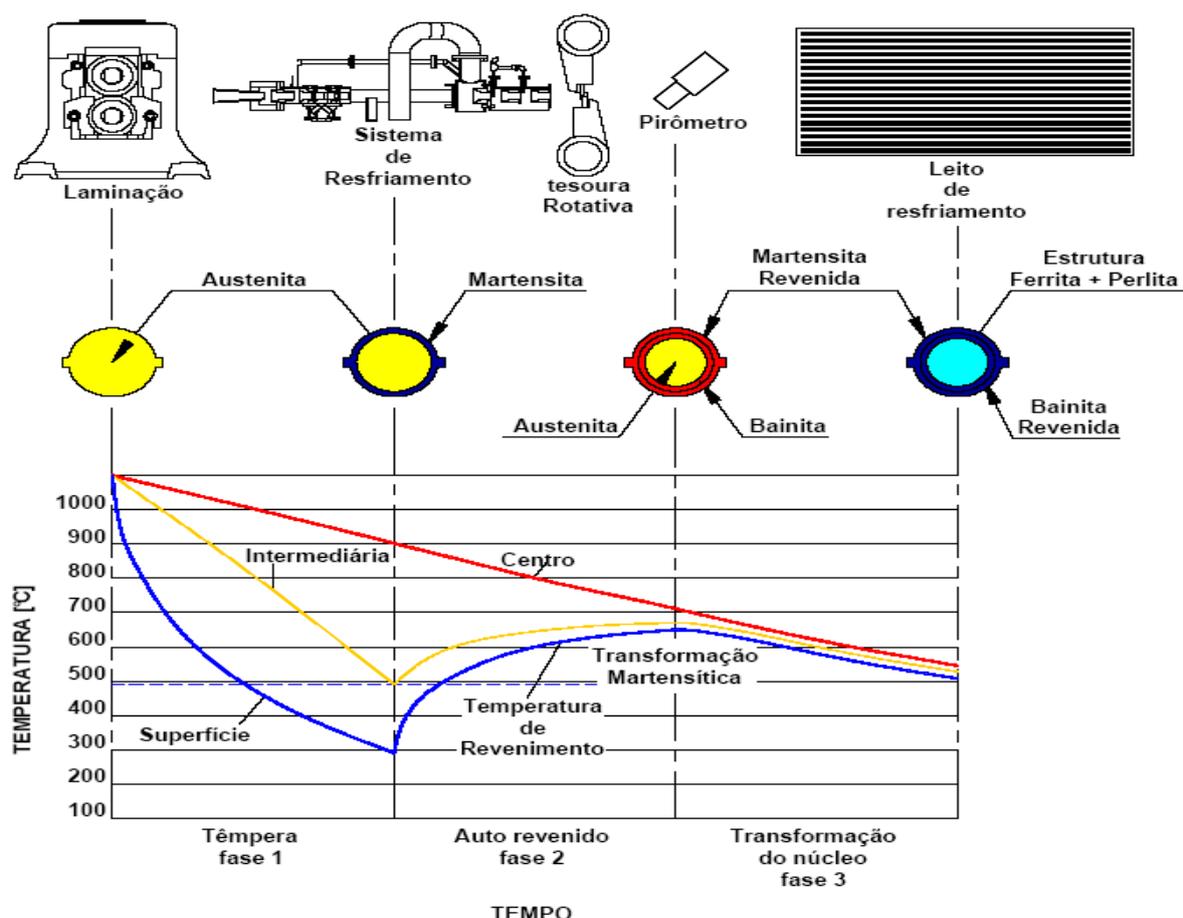


Figura 2.2 - Curvas de variação de temperatura da barra para diferentes posições de raio durante o processo de tratamento térmico superficial. (ALVES, 2004)

Outros tipos de equipamentos para resfriamento controlado aplicados em laminações são apresentados nas Figuras 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6.



Figura 2.3 – Equipamento para resfriamento de barras (TAMM,2003)



Figura 2.4 – Bancada de resfriamento (MEFOS, 2008)



Figura 2.5 – Sistema de resfriamento com água (MEFOS, 2008)



Figura 2.6 – Instalação Thermex para resfriamento de barras (TAMM, 2003)

O primeiro processo de resfriamento controlado de barras laminadas foi desenvolvido e patenteado (em 1975) pelo Centre de Recherches Metallurgiques (C.R.M. – Liege, Bélgica, 1975) e, atualmente, o processo Tempcore<sup>®</sup>, licenciado pelo C.R.M. já é adotado por mais de 60 fábricas no mundo e a capacidade de produção de vergalhões, através desta tecnologia, já ultrapassou 12 milhões de toneladas/ano. (TEMPCORE, 2007).

Também, vem sendo adotada amplamente a tecnologia Thermex, na produção de vergalhões, mediante o tratamento térmico das barras, através de resfriamento com água, na laminação.

No sistema Thermex, são utilizados tubos, também denominados canhões, onde a água troca calor com as barras, tendo seu fluxo no mesmo sentido de laminação. Este sistema de troca térmica garante, por sua vez, que a barra tenha um resfriamento homogêneo em sua superfície, para garantir suas propriedades mecânicas ao final do processo.

A Figura 2.7 mostra uma representação esquemática do funcionamento do canhão, com as indicações de entrada e saída da barra, passando pelas regiões de entrada e saída de água, e do tubo intermediário de resfriamento.

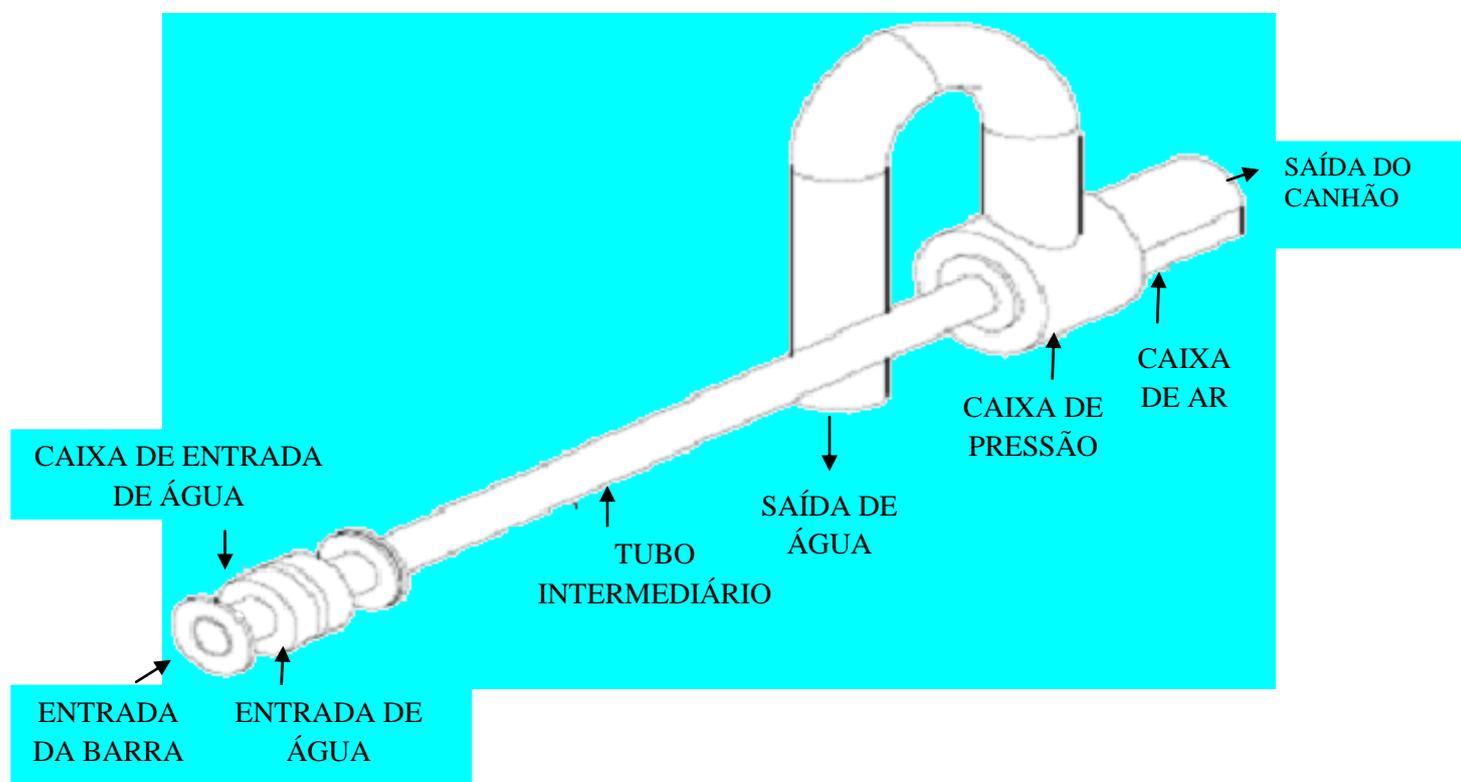


Figura 2.7 - Representação esquemática do canhão Thermex. (ALVES, 2004)

O sistema Thermex de resfriamento apresenta um dispositivo de controle, baseado na medição de pressões e temperaturas. Além destes, são utilizados outros controladores, previamente dispostos nas demais etapas do processo de laminação.

Os principais itens e parâmetros controlados relevantes à garantia do processo estão descritos a seguir:

- Temperatura da barra no processo de laminação;
- Temperatura de equalização da barra no leito de resfriamento;
- Pressão de água da linha de recalque do sistema;

- Temperatura da água de entrada;
- Temperatura da água de retorno;
- Velocidade de laminação;
- Controle dos níveis dos reservatórios de água;
- Controle da torre de resfriamento de água do sistema.

As medições de temperaturas da água de entrada e retorno do sistema fornecem as informações necessárias ao funcionamento da torre de resfriamento.

Do mesmo modo, a temperatura das barras durante o processo de laminação serve como parâmetro para controle e regulação do forno de reaquecimento da laminação.

Este processo, denominado Thermex Quenching Technology pertence à Hennigsdorfer Stahl Engineering, da Alemanha, e a sua concepção é, basicamente, a mesma do processo Tempcore, do qual difere apenas em alguns detalhes construtivos do sistema.

Uma diferença fundamental entre ambos os sistemas mencionados é a velocidade com que é atingida a formação da estrutura martensítica, conforme mostra a Figura 2.8.

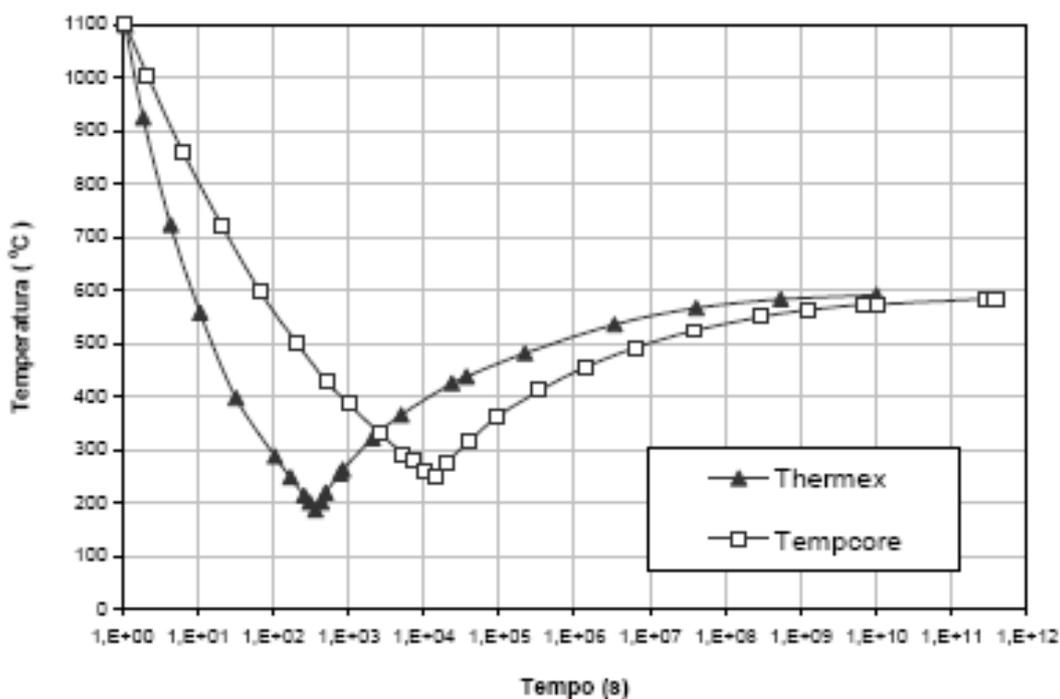


Figura 2.8 – Comparativo entre os sistemas Thermex e Tempcore

Curvas de temperatura superficial (TAMM, 2003).

Somente na Índia, a capacidade de produção instalada por esta tecnologia chegou a 8 milhões de toneladas/ano em 31.03.2008 (TAMM, 2003).

Na Austrália, o fabricante One Steel Reinforcing produz vergalhões de CA50, com as seguintes características:

- Barras retas, nas bitolas de 12 a 40 mm, cujos aspectos externos são mostrados na Figura 2.9, através do processo Tempcore, limitando o C.E. entre 0,39 – 0,44%; e

- Em rolos, nas bitolas 10, 12, e 16 mm, com C.E. limitado a 0,44%, porém microligado. (ONE STEEL, 2007)



Figura 2.9 – Barras retas de aço produzidas. (ONE STEEL, 2007)

Em MACAU, são produzidas as categorias A235, A335, A400 e A500, todas com o teor de carbono limitado a 0,25%, para atender as exigências de soldabilidade. (IMPrensa OFICIAL,1996).Na Tabela 2.1 são apresentadas as composições químicas,típicas de cada categoria.

Tabela 2.1 - Especificações para composições químicas para aços destinados à produção de vergalhões (MACAU, DECRETO LEI 64/96)

Elemento	Classe	Classe	Classe	*Classe
	A235	A335	A400	A500
	% max.	% max.	% max.	% max.
C	0.25	0.25	0.25	0.25
S	0.060	0.050	0.050	0.050
P	0.060	0.050	0.050	0.050
Mn	0.65	1.60	1.60	—
Si	0.30	0.80	1.00	—
V	—	—	0.12	—
N	0.012	0.012	0.012	0.012

## 2.2. BARRAS PARA ARMADURAS DE CONCRETO ARMADO

No mercado brasileiro são encontrados diversos tipos de barras e fios de aço destinados à confecção de armaduras estruturais de concreto. Na designação desses fios e barras é usado o prefixo de “CA”, indicativo de seu emprego no “concreto armado”.

A norma NBR 7480 – “Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado”, especifica os aços nas categorias CA 25, CA 50 e CA 60, sendo os dois últimos os mais utilizados.

Esta Norma tem como escopo, o estabelecimento dos requisitos exigidos para encomenda, fabricação e fornecimento de barras e fios de aço destinados a armaduras para estruturas de concreto armado, com ou sem resfriamento superficial.

Como requisitos gerais, são definidos as seguintes condições:

**Classificação:** Os produtos são classificados em barras ou fios em função dos seus diâmetros nominais e do processo de fabricação, sendo classificados como barras os produtos de diâmetro nominal 6,3 mm ou superior, obtidos, exclusivamente, por laminação a quente.

Classificam-se como fios aqueles com diâmetro nominal 10mm ou inferior obtidos a partir de fio-máquina, com trefilação ou laminação a frio.

De acordo com o valor característico da resistência de escoamento, as barras de aços são classificadas nas categorias CA-25 ou CA-50 e os fios de aços na categoria CA-60.

São também definidas nesta norma as características geométricas, defeitos, tolerâncias indicadas para massa linear e para o comprimento das barras, além de exigências para a marcação dos produtos.

Os requisitos específicos de propriedades mecânicas de tração e dobramento definidos pela NBR 7480 são apresentados na Tabela 2.2.

A característica especificada na tabela 2.2 classificada como “alongamento” representa uma das formas de expressar a ductilidade das barras. A ductilidade, por sua vez, representa a deformação plástica requerida para a fratura. Como todas as deformações relativas, é adimensional, sendo calculada a partir da deformação longitudinal (expressa em %), ao longo do eixo de aplicação da carga no teste de tração.

Tabela 2.2 – Requisitos mínimos estabelecidos pela NBR ABNT 7480

Categoria	Valores mínimos de tração				Ensaio de dobramento 180°	
	Resistência característica ao escoamento Fyk (MPa)	Limite de resistência Fst (Mpa)	Alongamento após a ruptura em 10 Ø A (%)	Alongamento na força máxima Agt(%)	Diâmetro do pino (mm)	
					Ø <20	Ø >=20
CA 25	250	1,20 Fy	18	*	2 Ø	4 Ø
CA 50	500	1,08 Fy	8	5	3 Ø	6 Ø

Um outro indicador do valor da ductilidade é a estrição na seção de fratura. Trata-se da redução de área observada na seção fraturada da barra. É uma propriedade relativa, adimensional, referida à área inicial da seção reduzida da amostra. Materiais altamente dúcteis apresentam grande estrição. O alongamento é uma medida do “esticamento” plástico, ao passo que a estrição é uma medida de “contração” plástica. A estrição é preferida por alguns engenheiros como uma medida de ductilidade porque não necessita de uma base de medidas aleatória, além de poder ser utilizada na determinação de *deformação verdadeira* no ponto de fratura. Não se pode estabelecer uma correlação exata entre alongamento e estrição, uma vez que a deformação plástica pode resultar bastante localizada. É claro que um material muito dúctil apresentará altos valores para ambos, enquanto que um material não-dúctil os terá próximo de zero. (VLACK, 2003)

### 2.3. TRATAMENTO TÉRMICO/TRANSFORMAÇÕES DE FASES

#### 2.3.1. Soluções sólidas de ferro.

Durante os processos de transformações de fases das ligas ferro carbono, dependendo das condições de resfriamento, poderá haver a formação das seguintes soluções sólidas de ferro:

Ferrita ( $\alpha$ ):

Solução sólida de carbono em ferro, em estrutura Cúbica de Corpo Centrado(CCC), existente até a temperatura de 912 °C. Nesta faixa de temperatura, a solubilidade do carbono no ferro é muito baixa, chegando ao máximo de 0,020% a 727°C. (SILVA, 2006).

A configuração estrutural do ferro puro à temperatura ambiente é denominada, alternativamente, ferro  $\alpha$  ou ferrita. Ela é muito macia e dúctil; com a pureza comercialmente encontrada, sua resistência à tração é menor que 310 MPa(45.000psi). É um material ferromagnético a temperaturas inferiores a 770°C. Sua densidade é de 7,88g/cm<sup>3</sup>.

Como a ferrita tem uma estrutura cúbica de corpo centrado, os interstícios são pequenos e pronunciadamente alongados, não podendo acomodar com facilidade nem mesmo um pequeno átomo esférico de carbono. Conseqüentemente, a solubilidade do carbono na ferrita é muito baixa (1 átomo de carbono para 1000 átomos de ferro). O átomo de carbono é pequeno demais para a solução sólida substitucional e muito grande para uma solução sólida intersticial. (VLACK, 2003)

Austenita ( $\gamma$ ):

Solução sólida de carbono em ferro com estrutura Cúbica de Face Centrada(CFC), existindo entre as temperaturas de 727 e 1495 °C, e com solubilidade máxima de carbono no ferro de 2,11% a 1148°C. (SILVA,2006).

É uma forma estável de ferro puro a temperatura entre 912°C e 1394°C. É difícil comparar as propriedades mecânicas entre ferrita e austenita porque isto teria que ser para temperaturas diferentes. Contudo, pode-se dizer que nas temperaturas de sua estabilidade, a austenita é macia e dúctil, sendo conseqüentemente bastante adequada aos processos de fabricação, os quais, na sua maioria, são por conformação a quente. A maioria das operações de forjamento e laminação de aços é conduzida a temperaturas iguais ou superiores a 1100°C, quando então o ferro é cúbico de face centrada. A austenita não é ferromagnética, qualquer que seja a temperatura.

A estrutura cúbica de face centrada do ferro tem espaçamentos interatômicos maiores que os da ferrita. Mesmo assim, os vazios naturais da estrutura CFC são escassamente longos o suficiente para aglomerar átomos de carbono nos interstícios e, este aglomerado, introduz deformações na estruturas. Resulta daí que nem todos os vazios podem ser preenchidos num só tempo, que é de aproximadamente 6% a 912°C. A solubilidade máxima é de somente 2,11% em peso de carbono. Por definição, os aços contêm menos de 1,2% de carbono; portanto, a altas temperaturas, os aços tem seu carbono inteiramente dissolvido na austenita. (VLACK, 2003).

A austenita (do nome do metalurgista inglês Robert – Austen ) apresenta uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui boa resistência mecânica e apreciável tenacidade; é não-magnética.

Ferrita ( $\delta$ ):

É uma solução sólida de carbono em ferro CCC, sendo estável até 1538 °C, quando o ferro se liquefaz. Os nomes de ferrita  $\alpha$  e ferrita  $\delta$  são usados para indicar a mesma solução sólida de carbono em ferro C.C.C., porém ocorrendo em diferentes faixas de temperatura. A solubilidade máxima de carbono na ferrita  $\delta$  é um pouco maior que na ferrita  $\alpha$  (0,09 e 0,02%, respectivamente), devido ao fato de que a ferrita  $\delta$  ocorre em temperaturas maiores, em que a agitação térmica da matriz de ferro é também maior, favorecendo a maior dissolução do carbono. (SILVA, 2006).

Acima de 1394°C, a austenita não é mais, a longo alcance, a forma estrutural mais estável do ferro, uma vez que volta prevalecer a configuração cúbica de corpo centrado, agora denominada ferro  $\delta$ . (VLACK, 2003).

#### Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ):

É um carboneto de ferro com estrutura ortorrômbica e de alta dureza. A cementita dá origem a um eutetóide de extrema importância no estudo dos aços: a perlita.

A *cementita* (do latim “caementum”) é o carboneto de ferro  $\text{Fe}_3\text{C}$  contendo 6,67% de carbono; muito dura (na escala Moh’s ocuparia aproximadamente o lugar do feldspato) e quebradiça; é responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como pela sua menor ductilidade.

#### Perlita:

Se uma peça de composição Fe- 0,77%C (eutetóide) for levada a uma temperatura maior que 727° C, a estrutura austenítica (CFC) será estável, com os átomos de carbono nos interstícios octaédricos da estrutura. Se esta peça for resfriada lentamente e mantida a temperaturas inferiores a 727° C, a estrutura austenítica não será mais estável, ocorrendo a reação eutetóide. A reação eutetóide, em aços, produz uma microestrutura característica chamada “perlita”. A perlita não é uma fase, e sim uma mistura de duas fases, ferrita e cementita, que ocorrem sob a forma de lamelas paralelas.

A *perlita* (nome devido à “nuance” de cores de madrepérola que esse constituinte frequentemente apresenta ao microscópio) é uma mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita, na forma de lâminas finas (de espessura raramente superior a um milésimo de milímetro), dispostas alternadamente. As propriedades mecânicas da perlita são, portanto, intermediárias entre as da ferrita e da cementita, dependendo, entretanto, do tamanho das partículas de cementita. Sua resistência à tração é, em média, 75 kgf/ mm<sup>2</sup> (740 MPa). A proporção de perlita num aço cresce de 0% para o ferro até 100% para aço eutetóide (0,77% de

carbono), de modo que um aço com 0,5% de carbono, por exemplo, apresentará cerca de 65% de perlita.

#### Bainita:

Quando um aço é resfriado rapidamente para temperaturas abaixo do nariz da curva Transformação Térmica Isotérmica (I.T.T.) e mantido nessa temperatura, ocorre a formação de uma estrutura denominada bainita. A bainita é classificada como superior ou inferior, de acordo com a temperatura na qual é formada. A formação da bainita é um processo misto que envolve difusão, como ocorre na formação da ferrita e da perlita, e forças de cisalhamento análogas às observadas nas transformações martensíticas.

A *bainita*, que é formada na temperatura entre 550 e 200°C, varia de aspecto, que vai desde um agregado de ferrita em forma de pena e carboneto de ferro muito fino, em torno de 450°C, até um constituinte em forma de agulhas com coloração escura (em torno de 200°C) e sua dureza varia de 40 a 60 Rockwell C.

Na parte mais baixa do diagrama Temperatura Tempo Transformação (TTT), a bainita caracteriza-se pela excelente ductilidade e resistência ao choque, com durezas elevadas, acima mesmo de 50 Rockwell C.

#### Martensita:

É uma solução sólida de carbono em ferro  $\alpha$  (ferrita), apresentando uma estrutura tetragonal de corpo centrado, isto é, uma célula unitária correspondendo a um prisma reto de base quadrada, com as arestas laterais diferentes das arestas da base. Esta microestrutura contém grandes tensões internas, haja vista ser obtida mediante processo de têmpera, estando o carbono forçosamente distribuído na rede cristalina da ferrita. No exame de superfície polida, a martensita é vista geralmente sob forma de “agulhas”. Na figura 2.10 é mostrada esquematicamente a transformação que ocorre na passagem da estrutura austenítica em martensítica., Também é mostrada a variação nos parâmetros de rede da estrutura tetragonal resultante, após a transformação da estrutura cristalina. Observa-se que a distorção aumenta na medida em que aumenta o teor de carbono dos aços.

A *martensita* apresenta um reticulado tetragonal e sua dureza é muito elevada, podendo atingir 65 a 67 Rockwell C. Sua resistividade térmica é consideravelmente mais alta que a dos conglomerados ferrita-cementita, qualquer que seja o seu grau de dispersão. Sua elevada dureza é devido a diversos fatores como:

- precipitação de partículas submicroscópicas de carboneto de ferro da solução sólida gama e retenção dessas partículas na forma de uma solução sólida supersaturada no reticulado do

ferro alfa (formado no esfriamento) onde atuam como espécies de “chavetas”, impedindo o escorregamento;

- distorção do reticulado;
- tensões internas;
- tamanho de grão muito pequeno.

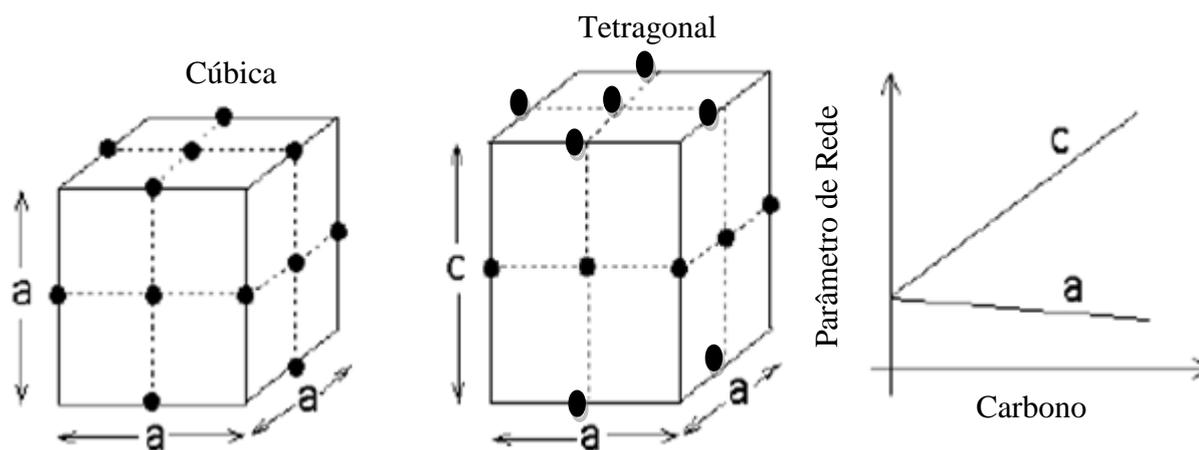


Figura 2.10 – Martensita tetragonal em alguns aços (BHADESHIA, 1996)

### 2.3.2. Curvas de resfriamento para aços hipoeutetóides.

Esta curva de transformação por resfriamento contínuo, denominada Transformação por resfriamento Contínuo (Continuous Cooling Transformation – C.C.T.), apresenta a relação entre as taxas de resfriamento e as possibilidades de formação das fases, que serão obtidas nas transformações que ocorrerão, em função dos tempos e das variações das temperaturas que serão aplicadas a estes materiais, durante o tratamento térmico. (NEVES; REGONE; BUTTON, 2002)

Na Figura 2.11 que representa um diagrama CCT para um aço hipoeutetóide, a curva identificada por  $F_s$  representa as condições de início de formação da ferrita.

As curvas identificadas por  $P_s$  e  $P_f$  representam as condições de início e final, respectivamente, da formação da fase perlita.

As curvas identificadas por  $B_s$  e  $B_f$  representam as condições de início e final, respectivamente, da formação da fase bainita.

A reta  $M_s$  mostra as condições de início de formação da fase martensítica.

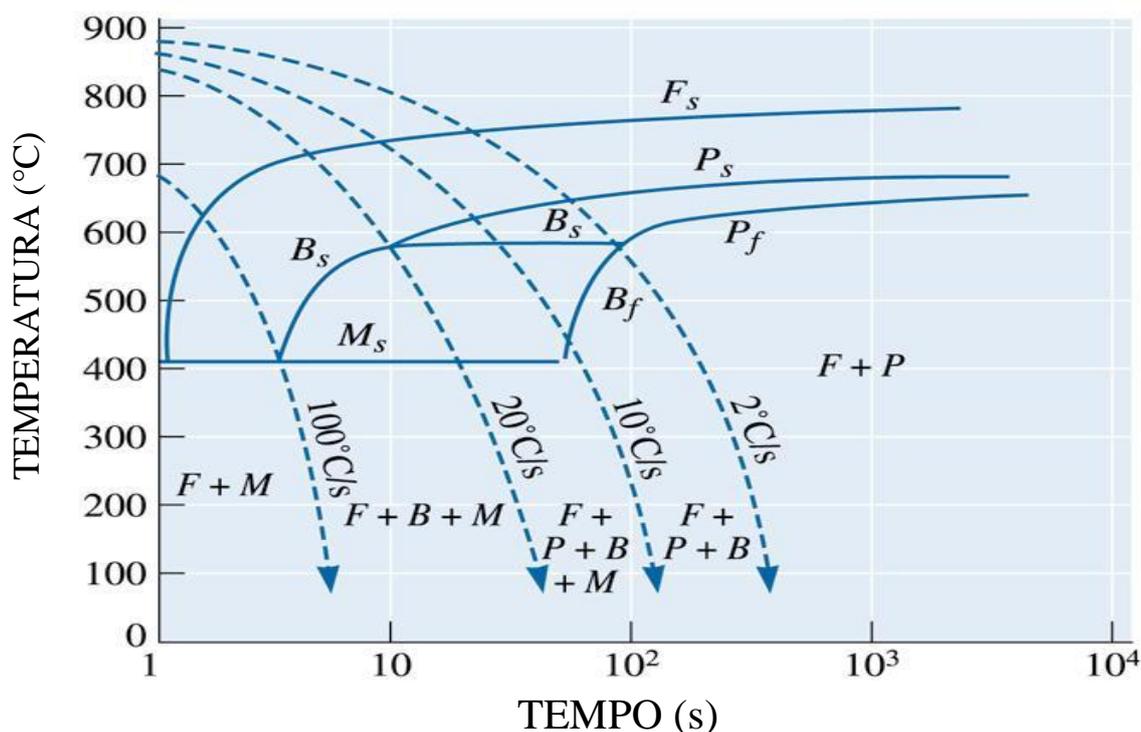


Figura 2.11 - Diagrama C.C.T para um aço de baixa liga, com 0,2% carbono (ASKELAND,2003)

Obs.: Este diagrama foi uma referência da maior importância em termos de ser o indicador usado para o controle do tempo de aplicação do resfriamento das barras, durante a realização dos quatro experimentos.

### 2.3.3. Transformações metalúrgicas

Um aço resfriado muito lentamente, a partir do campo austenítico, apresentará à temperatura ambiente, uma ou mais das soluções sólidas: ferrita, perlita e cementita, dependendo do seu teor de carbono.

Meyrick (2001) menciona que, os aços comuns ao carbono, são freqüentemente usados quando consistem de uma mistura de ferrita e perlita. A resistência ao escoamento (T.E.) e o limite de resistência (T.R.) destes aços, são controladas pelas propriedades mecânicas da ferrita e da cementita e dos detalhes microestruturais, referentes à forma como estas fases estão misturadas.

A tensão de escoamento na ferrita é uma função da densidade das discordâncias e do tamanho dos grãos. A dependência do tamanho dos grãos deve-se ao fato dos seus contornos atuarem como barreiras ao deslizamento das discordâncias

A cementita por ser dura e frágil, não se deforma plasticamente, portanto, o escoamento da estrutura perlítica é uma função do movimento das discordâncias da ferrita.

Quando o teor de carbono vai se elevando, as características da perlita passam a ser dominantes nas propriedades mecânicas e os detalhes morfológicos tais como o espaçamento da perlita também afetam a resistência ao escoamento e o limite de resistência.

Este efeito é mostrado no seguinte gráfico (Figura 2.12), extraído de Callister (2002). Observa-se que com o aumento do teor de carbono ocorre o aumento da resistência ao escoamento (T.E.) e do limite de resistência (T.R.), porém fica evidenciado um aumento gradual significativo na relação T.R./T.E. à medida que aumenta o teor de carbono, devido à predominância das características da perlita.

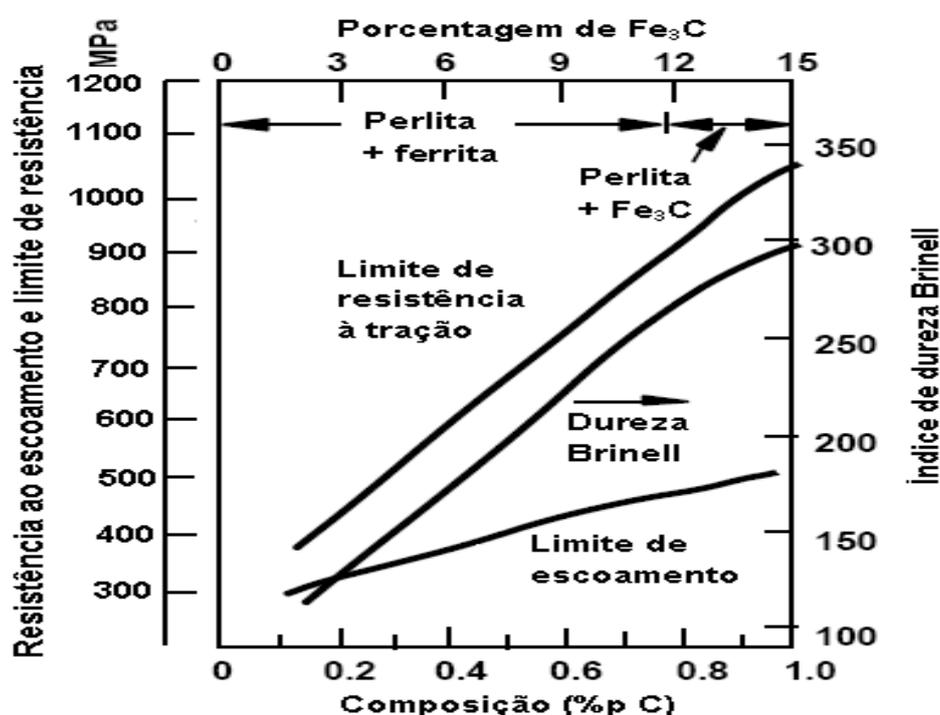


Figura 2.12 – Relação entre resistência mecânica e teor de carbono. (CALLISTER, 2002.)

Porém, se o resfriamento do aço a partir da região austenítica, for muito rápido (por exemplo, resfriando-se diretamente em água), aparecerão outros constituintes metaestáveis, como a bainita e a martensita, que não são previstos no diagrama de fases ferro-cementita.

A transformação da austenita em outros constituintes pode ocorrer por difusão, cisalhamento ou uma mistura dos dois mecanismos.

A formação da bainita é um processo misto que envolve difusão, como ocorre na formação da ferrita e da perlita, e forças de cisalhamento análogas às observadas nas transformações martensíticas. (SILVA, 2006).

## A transformação martensítica

Se uma amostra de um aço-carbono austenitizada for arrefecida rapidamente, até a temperatura ambiente, por meio de imersão em água (têmpera), a sua estrutura vai passar de austenita para martensita.

A martensita nos aços-carbono é uma fase metaestável, que consiste em uma solução sólida supersaturada de carbono, dissolvido intersticialmente no ferro cúbico de corpo centrado (CCC) ou tetragonal de corpo centrado (CCT). A tetragonalidade é causada por uma pequena distorção na célula unitária CCC do ferro.(Figura 2.10).

A temperatura  $M_s$  é aquela em que se inicia a transformação martensítica, e a temperatura  $M_f$  para a qual se completa a transformação designa-se por temperatura final de transformação martensítica.

Nas ligas Fe-C, a temperatura  $M_s$  diminuiu com o aumento da proporção em peso de carbono nas ligas, conforme apresentado na Figura 2.13.

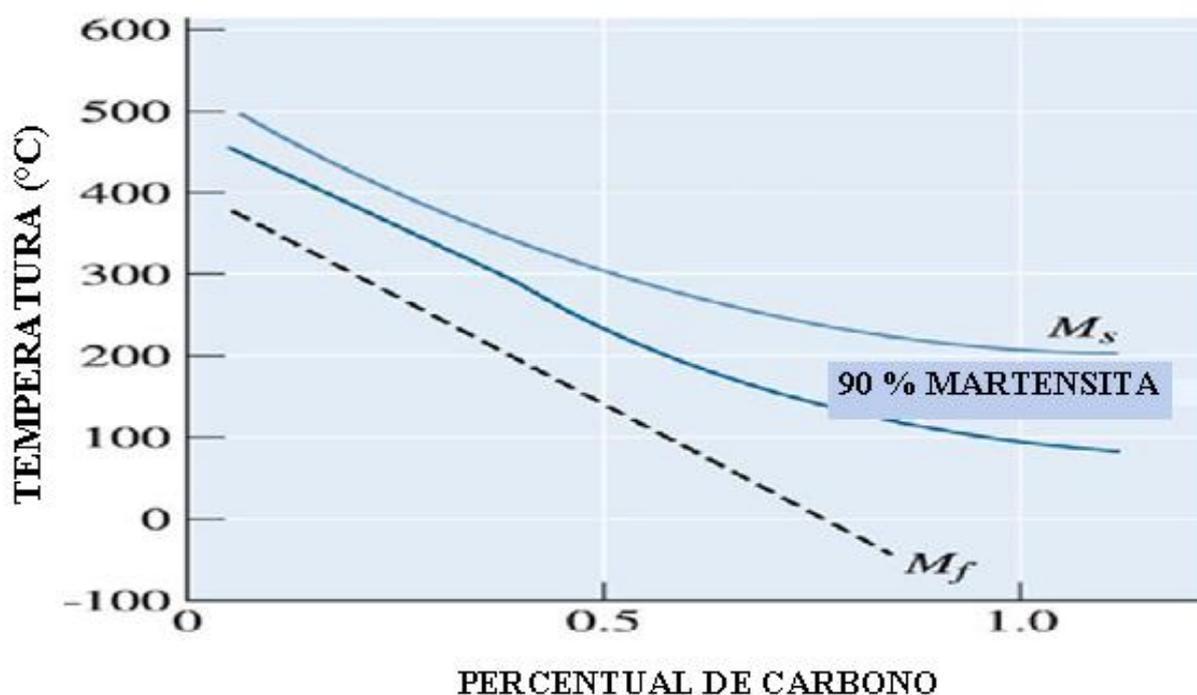


Figura 2.13 – Relação entre temperatura de início de formação da martensita e teor de carbono (ASKELAND, 2003)

Admite-se que a transformação da austenita em martensita nas ligas Fe-C (aços carbono) ocorre sem difusão, porque a transformação ocorre tão rapidamente que os átomos não têm tempo para se misturarem. Parece não haver uma barreira de energia de ativação que impeça a formação

da martensita. Admite-se que não ocorre variação de composição na fase-mãe depois da reação, e que cada átomo tende a manter os seus vizinhos iniciais. A posição relativa dos átomos de carbono em relação aos átomos de ferro é a mesma, tanto na martensita como na austenita.

Para teores de carbono das martensitas inferiores, com cerca de 0,2%, a austenita transforma-se na estrutura cristalina CCC da ferrita  $\alpha$ . Com o aumento do teor de carbono nas ligas Fe-C, a estrutura CCC sofre distorção, dando uma estrutura TCC (tetragonal de corpo centrado).

A dureza e a resistência mecânica das martensitas Fe-C estão diretamente relacionadas com o seu teor de carbono e aumentam quando este teor aumenta.

No entanto, a ductilidade e a tenacidade diminuem com o aumento da quantidade de carbono, pelo que muitos dos aços-carbono martensíticos são revenidos, por aquecimento à temperaturas abaixo da temperatura de transformação, 723°C.

As martensitas Fe-C de baixo carbono têm resistência mecânica elevada devido à elevada concentração de deslocamentos que se forma (martensita em farripas) que torna difícil o movimento de outras deslocamentos. Quando o teor de carbono é superior a 0,2%C, o endurecimento por solução sólida intersticial torna-se mais importante e a rede CCC do ferro sofre distorção e torna-se tetragonal. Porém, nas martensitas Fe-C, com elevado teor de carbono, as numerosas interfaces de maclas, na martensita em placas, também contribuem para a dureza. (SMITH, 1998).

### Martensita Revenida

A martensita, além de ser muito dura, é tão frágil que não pode ser usada para a maioria das aplicações; além disso, quaisquer tensões internas que possam ser introduzidas durante a têmpera, possuem um efeito de enfraquecimento.

A ductilidade e a tenacidade da martensita podem ser aprimoradas e essas tensões internas podem ser aliviadas, através de um tratamento térmico, conhecido como revenido.

O revenido é realizado a temperaturas entre 250 e 650°C. Esse tratamento térmico de revenimento permite, através de processos de difusão, a formação da martensita revenida (fase  $\alpha$  + Fe<sub>3</sub>C).

Para efeito didático Meyrick (2001), divide o revenimento em três estágios, em função das temperaturas em que os mesmos acontecem. O primeiro deles, ocorre a temperaturas abaixo de 200°C, porém não foram evidenciados efeitos significativos na resistência mecânica na martensita revenida.

O segundo estágio de revenimento ocorre entre 200 e 300°C. Essa etapa também não tem impacto significativo na resistência do material, principalmente quando se refere a aços comuns ao carbono, nos quais praticamente não acontece a formação de austenita retida.

O início do terceiro estágio ocorre a aproximadamente 300°C, temperatura na qual começa a ocorrer a precipitação da cementita, a partir da solução sólida; a matriz perde a sua tetragonalidade e torna-se uma ferrita com estrutura CCC. A cementita precipitada, coalesce, em massas maiores, e o aço fica mais macio.

A dureza após o revenimento fica progressivamente menor, um efeito que torna-se cada vez mais significativo a medida que aumenta a temperatura de revenimento, porque passam a predominar as características da cementita, em detrimento daquelas da martensita. Este efeito provoca aumento de tenacidade e se manifesta também na relação plástica que torna-se menor, a medida que aumenta a temperatura de revenimento. Isto é evidenciado na figura 2.14.

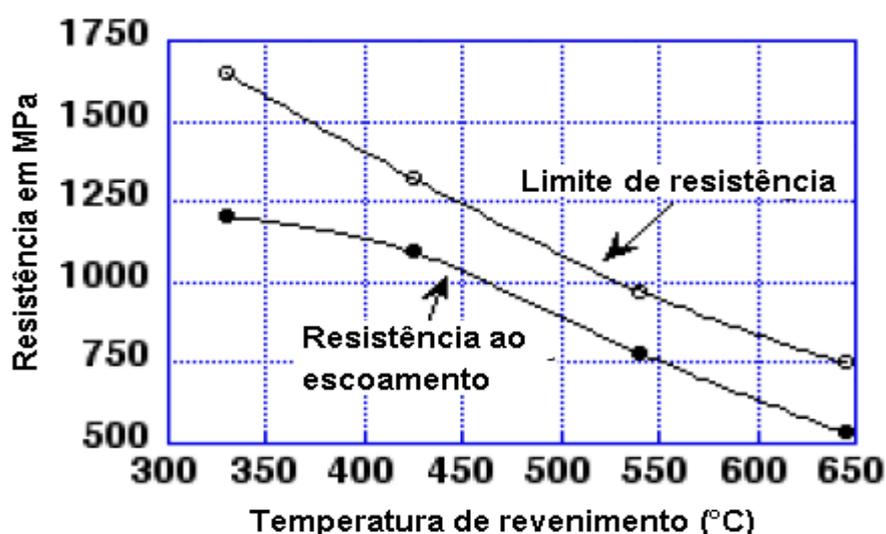


Figura 2.14 – Relação entre resistência mecânica e temperatura de revenimento (MEYRICK, 2001).

A martensita tetragonal de corpo centrado - TCC - monofásica que está supersaturada, com carbono, se transforma na martensita revenida, composta pelas fases estáveis ferrita e cementita.

A martensita revenida não apresenta a mesma estrutura cristalina da martensita. (VLACK, 2003).

A microestrutura de ferro  $\alpha$  e cementita produzida pelo revenimento é diferente de ambas: perlita ou bainita, em função da forma (história térmica), através da qual foram obtidas. A perlita e a bainita são formadas a partir do resfriamento da austenita, uma solução sólida CFC.

A martensita revenida (Fig. 2.15) é formada pelo aquecimento da martensita, uma solução sólida TCC. (SHACKELFORD, 2005).

A microestrutura da martensita revenida consiste em pequenas partículas de cementita e uniformemente dispersas, embutidas no interior de uma matriz contínua de ferrita, conforme apresentada na Figura 2.15. Nesta figura a cementita é identificada como a parte mais clara e a ferrita é a fase mais cinzenta.

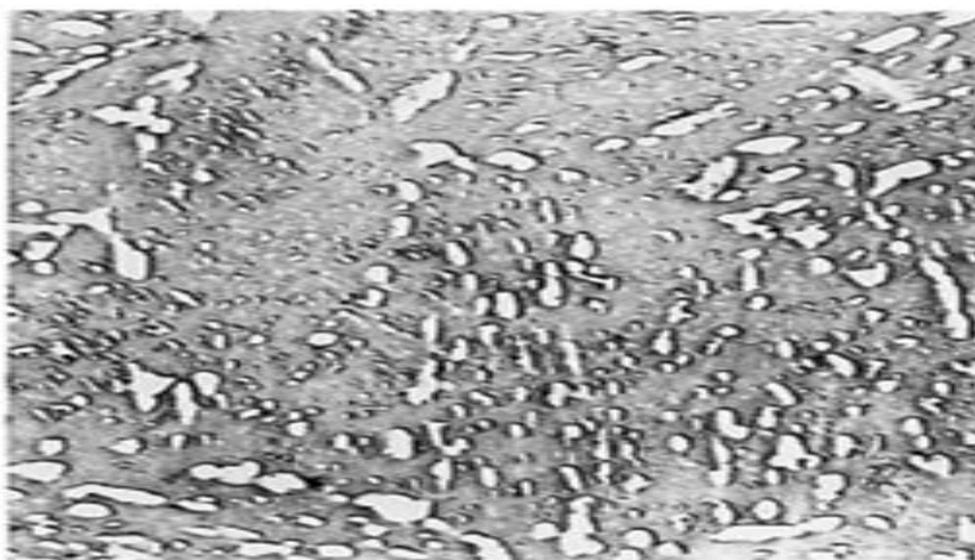


Figura 2.15 – Microestrutura da martensita revenida (ASKELAND, 2003)

Quando aços de alta resistência e médio teor de carbono são revenidos entre 250 e 400°C, acontece um fenômeno prejudicial, denominado fragilização da martensita revenida. (CAHN, 1996). É denominada transição dútil-frágil.

Embora, após o revenimento, a dureza decresça continuamente neste intervalo, a tenacidade, medida pelo teste Charpy em "V" atinge um valor mínimo. Este efeito é mostrado na figura 2.16 (BRIAN; BANERJI [1978]).

Quando os aços-carbonos são revenidos em temperaturas próximas a 350°C, ocorre uma redução na energia no teste Charpy de impacto. Esta é normalmente denominada como fragilidade a 350°C. A queda na tenacidade parece associada à formação de partículas de cementita, na forma de placas, nos contornos dos grãos e que pode ser agravada pela segregação de elementos tais como: As, Sb, Se, P. O revenimento nessa temperatura é normalmente evitado. (MEYRICK, 2001).

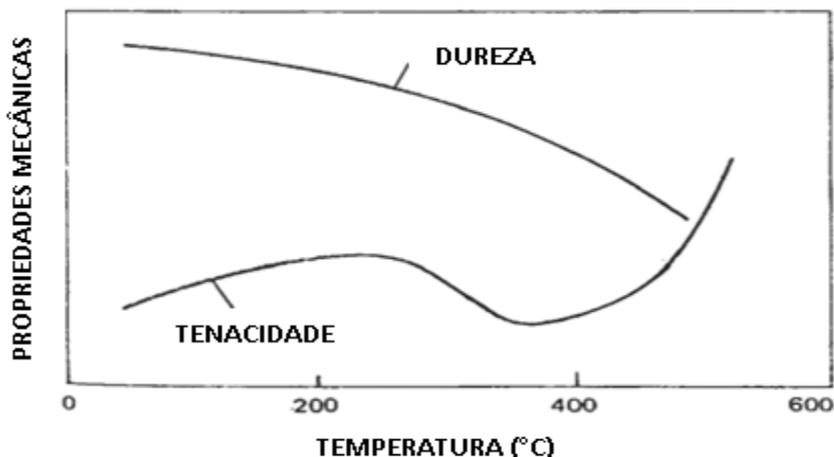


Figura 2.16 – Ilustração esquemática da fragilização da martensita revenida de um aço temperado e revenido. (BRIANT; BANERJI, 1978)

Durante a austenitização, os átomos de P e S segregam-se nos contornos dos grãos da austenita. Esta segregação permanece durante toda a transformação para austenita e durante o revenimento, reduzindo a coesão dos contornos anteriores da austenita.

A cementita precipita nos mesmos contornos que servem como locais de nucleação para as trincas durante a aplicação das cargas de impacto. As trincas propagam-se ao longo dos contornos enfraquecidos, resultando em fratura intergranular.

#### 2.3.4. Recristalização, crescimento de grão e textura

Dong (2005), afirma que dentre os diferentes mecanismos de aumento de resistência, o refino de grão é o único método que melhora, simultaneamente, tanto a resistência quanto a tenacidade.

Segundo El-Bitar (2002), o tamanho final dos grãos é influenciado principalmente pela temperatura de acabamento, enquanto que a estrutura interna dos grãos (sub-grãos) é atribuível as deformações que ocorrem entre os diversos passes da laminação.

Hashimoto e Nakamura, (2006), apresentam em trabalho publicado, uma relação entre as taxas de resfriamento aplicadas, com a nucleação e o crescimento de grãos, na laminação de vergalhões e demonstram que o resfriamento acelerado, após a laminação a quente, é bastante eficaz, para o aumento do escoamento e do limite de resistência, devido, principalmente, ao refino de grão do material.

Os referidos autores realizaram estudos em aços com as composições químicas mostradas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Composição química dos aços (% em massa) (HASHIMOTO; NAKAMURA, 2006)

	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	N	Ceq
0 Nb	0,249	0,47	1,19	0,023	0,002	0,04	*	*	0,0065	0,554
5 Nb	0,248	0,51	1,22	0,024	0,002	0,042	0,051	*	0,0079	0,565
5 NbV	0,244	0,51	1,26	0,026	0,003	0,036	0,05	0,045	0,0071	0,596

$$Ceq = C(\%) + Si(\%)/7 + Mn(\%)/5 + Cr(\%)/9$$

Ficou demonstrado por estes autores que, para uma taxa de resfriamento de 40°C/s, houve, em média, um aumento de 20-30 MPa na resistência de escoamento, para o aço comum ao carbono(aço 0Nb), conforme pode-se observar na Figura 2.17.

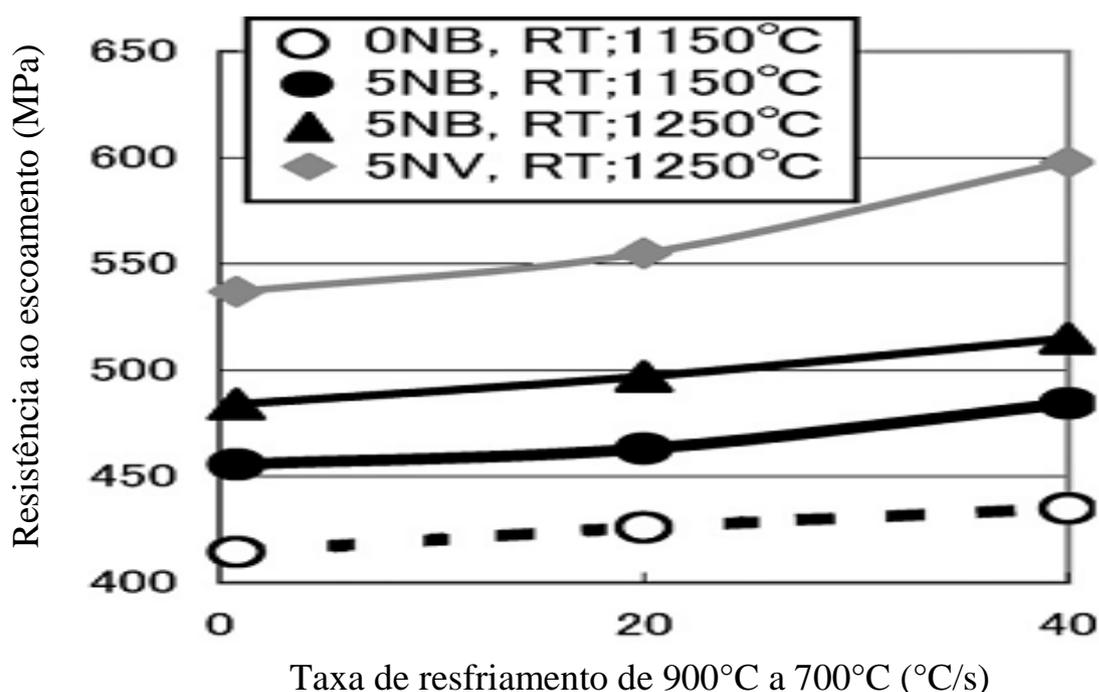


Figura 2.17 - Influência da taxa de resfriamento na resistência ao escoamento. (HASHIMOTO; NAKAMURA, 2006)

Também foi constatado um aumento no limite de resistência para estes materiais (figura 2.18), porém, numa proporção menor que aquela observada para a resistência ao escoamento.

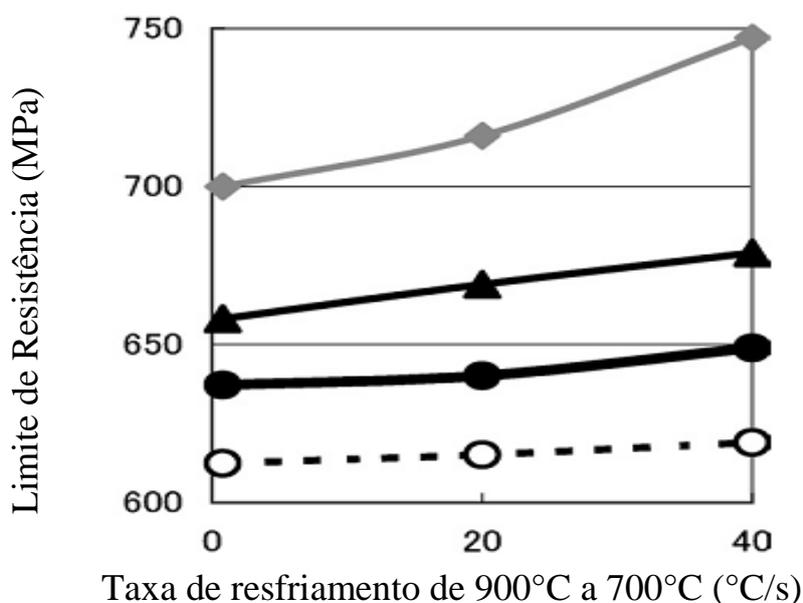


Figura 2.18 - Influência da taxa de resfriamento no limite de resistência (HASHIMOTO; NAKAMURA, 2006)

Ficou demonstrado pelos autores que estas variações na resistência ao escoamento e limite de resistência foram causadas, principalmente, pela redução no tamanho dos grãos. Embury (1971), apresenta a relação Hall – Petch, a qual demonstra que a resistência ao escoamento varia, linearmente em relação ao inverso da raiz quadrada do diâmetro médio dos grãos. O ferro e os aços-carbono obedecem à esta relação, com uma constante de proporcionalidade de, aproximadamente  $1,9 \text{ kgmm}^{-3/2}$ . Na figura 2.19 observa-se que para o aço não ligado, identificado como 0NB, estudado por Hashimoto e Nakamura, o tamanho de grão foi reduzido de aproximadamente de  $10,5 \mu\text{m}$  para  $7,0 \mu\text{m}$ , ou seja, houve uma redução de em torno de 33,3%.

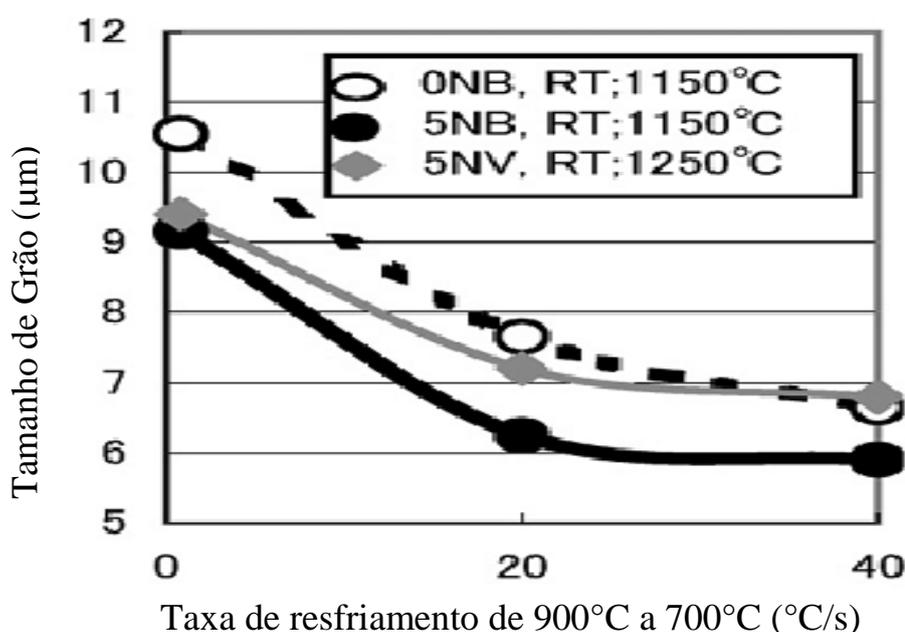


Figura 2.19 – Taxa de resfriamento x Tamanho de grão (HASHIMOTO; NAKAMURA, 2006)

Este fato pode ser constatado através de observações da microestrutura do material para diferentes taxas de resfriamento, conforme mostrado na Figura 2.20.

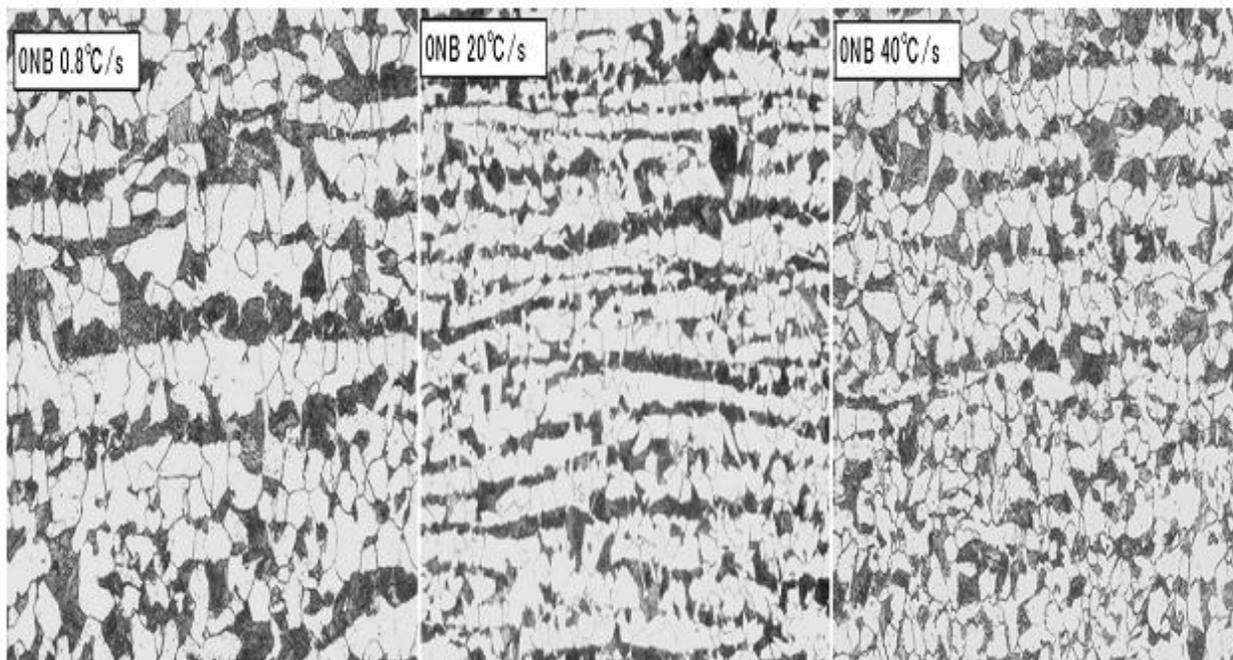


Figura 2.20 – Efeito da taxa de resfriamento na microestrutura no aço com 0,25 %C, 0,5 %Si e 1,2 %Mn. (HASHIMOTO; NAKAMURA, 2006)

Na figura 2.21, são apresentadas duas situações de resfriamento. No caso 1' o resfriamento foi lento, a partir de temperatura elevada, causando a formação de poucos grãos, com grande crescimento.

Na situação 2' o resfriamento foi acelerado, causando a nucleação de um grande número de grãos, com pouco crescimento. Neste caso o aumento da resistência é causado por refino de grão.

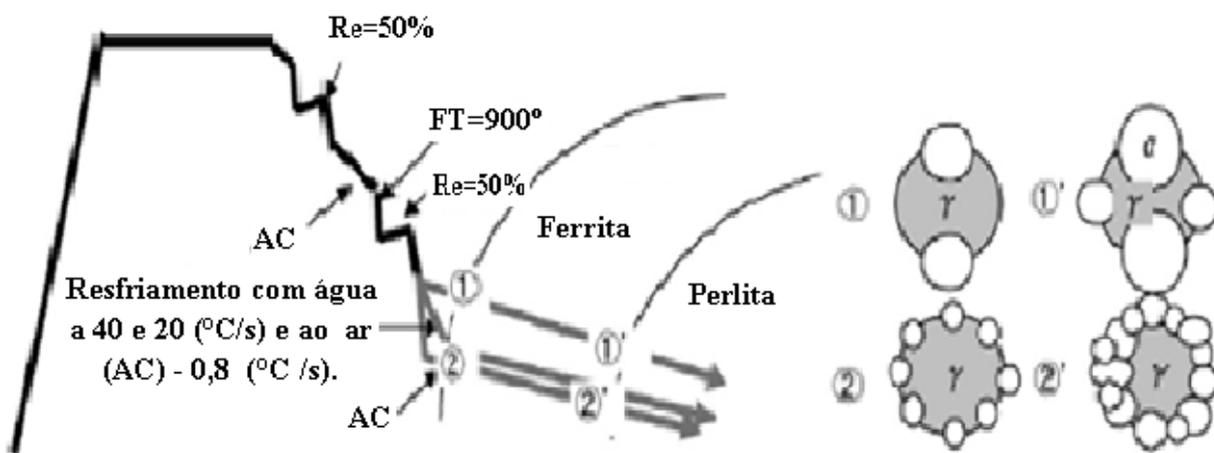


Figura 2.21 – Ilustração mostrando o efeito do resfriamento acelerado no tamanho de grão e na microestrutura transformada. (HASHIMOTO; NAKAMURA, 2006)

Vilar e Balancin (2007), no estudo “Efeito da precipitação da cementita na formação de contornos de alto ângulo e refino de grão ferrítico em aço baixo carbono”, da Universidade de São Carlos, investigaram a influência da formação da cementita no refino de grão durante a deformação de aços, e concluíram que:

Durante o reaquecimento das amostras de aços carbono temperadas, ocorre a transformação da estrutura martensítica em uma matriz ferrítica com partículas de cementita finamente dispersas. É a chamada martensita revenida e a elevada densidade de discordâncias, oriunda da têmpera, é determinante para a precipitação de carbonetos durante o revenimento.

Com o decorrer do tempo de revenimento, os carbonetos precipitados nos contornos recristalizados irão coalescer e atuarão como barreiras para a movimentação de discordâncias, ancorando o crescimento destes contornos.

Os autores também evidenciam que as transformações dinâmicas, que ocorrem durante a deformação plástica são aceleradas com o aumento da energia armazenada com a deformação. Esta constatação também foi feita por Gorni e Vallin(2003), Neto e Balancin(2004), Gallego(2004), Sun et. al. (2005) e Bitar et. al. (2002). Song [s.d.].

Foi evidenciado que a precipitação da cementita e a recristalização dinâmica da ferrita são responsáveis pela formação de contornos de alto ângulo, bem como, pelo intenso refino de grão, durante a deformação subcrítica. Os contornos de grão atuam como barreiras ao deslizamento de discordâncias. Desta forma as partículas de cementita interferem no processo de rotação de subgrãos e inibem o crescimento dos grãos formados. (KUC, 2005).

A Figura 2.22 é apresentada na publicação de Padilha (2005) e representa, de forma esquemática, a ocorrência da recristalização durante o processo de laminação a quente.

Observa-se na mesma que logo após a passagem do material pelos cilindros de laminação, ocorre a formação de muitos núcleos de recristalização, provocada pela energia de deformação aplicada ao aço.

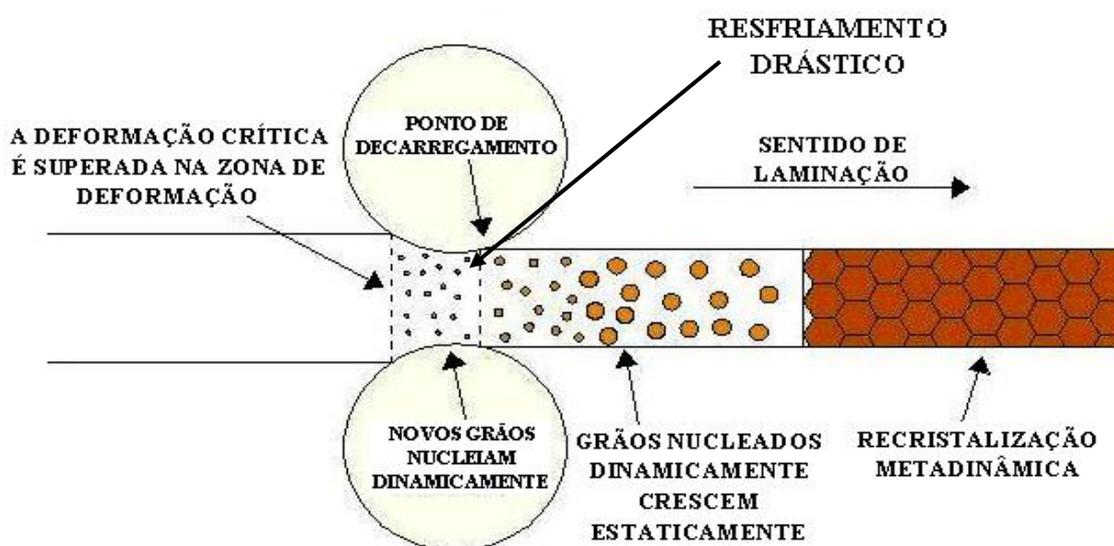


Figura 2.22 - Representação esquemática da evolução da recristalização metadinâmica durante a laminação a quente (PADILHA, 2005)

Nos materiais deformados a quente, a temperatura é suficiente para que ocorra a recristalização, durante a deformação. Como em geral um material metálico, com menor tamanho de grão apresenta propriedades melhores, o crescimento de grão, após a recristalização, deve ser evitado resfriando-se o material. (SANTOS, 2006), (FENGPUC – RS[s.d.]).

Korchynsky(2001), afirma que o refino de grãos pode ser melhorado através de resfriamento acelerado após o término da laminação a quente. O super-resfriamento da austenita aumenta a taxa de nucleação da ferrita e reduz a taxa de crescimento. Uma combinação destes dois fatores contribui para a formação de grãos menores.

Este fundamento, de resfriamento drástico, após a deformação a quente provocada pela laminação, foi aplicado durante a fase experimental.

## 2.4. RESISTÊNCIA A SISMOS E A ALTAS TEMPERATURAS

### Resistência a sismos

Essas propriedades têm relações estreitas com as características de ductilidade do aço empregado, ou seja, com seu alongamento percentual, obtido através da realização do ensaio de tração.

A norma NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismos, estabelece os requisitos exigíveis para a execução de obras desta natureza.

O artigo “Steel Long Products - Expectations of Constrution Sector” (SAHA, 2006) referindo-se aos aços resistentes a sismos, menciona o que segue:

as solicitações que ocorrem durante um terremoto, são quase-estáticas por natureza e, portanto, o aço deve ser projetado de tal forma que ele possa suportar os esforços gerados durante o sismo. O critério de projeto muda de acordo com a extensão da força gerada.

Em geral, o aço resistente a sismo deve atender as seguintes exigências:

Alta resistência ao escoamento;

Baixa variação na resistência ao escoamento;

Elevado alongamento; e

Boa capacidade de absorção energia plástica, sob carga dinâmica.

Elevada resistência ao escoamento – se a resistência ao escoamento do material é elevada, o material permanecerá no limite elástico durante o terremoto. Isto é particularmente verdadeiro para terremoto de menor intensidade.

Baixa variação na resistência ao escoamento – todas as estruturas de aço são projetadas na sua resistência de escoamento.

Elevada relação limite de resistência/resistência de escoamento – esta relação significa o intervalo de plasticidade do material. Por este motivo, no evento de um terremoto de maior intensidade, o aço terá capacidade de absorver mais a energia plástica, antes do colapso estrutural. Isto proporcionará condições adicionais de segurança e tempo para evacuação do local. Gorni et. al. (2004), demonstram que menores temperaturas de acabamento resultam num maior aumento de resistência ao escoamento do que no limite de resistência dos aços.

A norma da Austrália e Nova Zelândia AS/NZS 4671 estabelece para esta relação um valor mínimo de 1,15 e um máximo de 1,40. Extraído do artigo: “Report on grade – 500e steel reinforcement” (2005).

Elevado alongamento – essa característica significa que a estrutura pode acomodar grandes deformações antes de atinja a deformação plástica.

Boa capacidade de absorção de energia plástica sob esforço dinâmico – isto assegura que a estrutura pode acomodar uma grande quantidade da energia plástica, durante a ocorrência de terremotos de maior intensidade.

Têm sido intensos os trabalhos de pesquisa para a produção de aços com os atributos mencionados anteriormente. As Normas Japonesas tornaram obrigatório o uso de aços resistentes a sismos na construção civil. (SAHA, 2006). Na Índia, os produtores fabricam barras resistentes a sismos, com os seguintes valores típicos: resistência ao escoamento: 520 – 600 N/mm<sup>2</sup>; relação plástica(T.R./T.E.): 1.15 a 1.30; alongamento total de 18 -30% (THERMEX, 2002)

#### Aços resistentes a incêndio

Os incêndios normalmente não chegam a temperaturas que possam causar a fusão do aço (aproximadamente 1550 °C). As máximas temperaturas alcançadas aproximam-se dos 1200 °C (FERREIRA, 1988), (COSTA et. al. 2002).

#### Laminados a quente

Os aços de dureza natural, isto é, laminados a quente, são produzidos acima dos 700 °C ,sem nenhum tratamento após a laminação (PETRUCCI,1978), (FIGUEIREDO et al., 2000). Eles não perdem as propriedades de resistência quando aquecidos até 1100 °C ou 1200 °C, e resfriados em seguida (PETRUCCI,1978), (LANDI, 1977).

Somente em temperaturas muito elevadas e por tempo prolongado a granulação poderá se tornar grosseira, impedindo a recuperação total das características originais (LANDI ,1977).

A redução, na resistência aos aços laminados, é linear até 400 °C e, a partir daí, decai acentuadamente (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002). As Figuras 2.23 e 2.24 mostram, respectivamente, a redução da resistência e do módulo de elasticidade dos aços usados nas estruturas de concreto armado e do próprio concreto endurecido, quando submetidos a temperaturas elevadas.

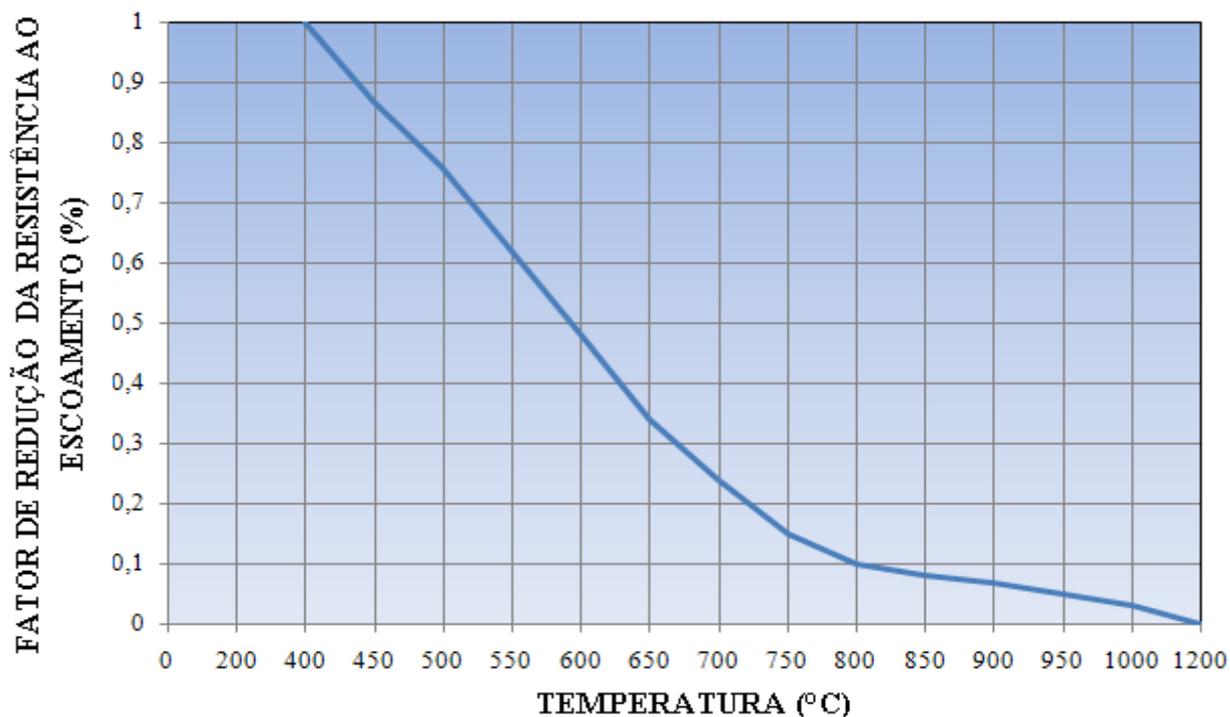


Figura 2.23 - Redução da resistência dos aços para concreto armado. (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002)

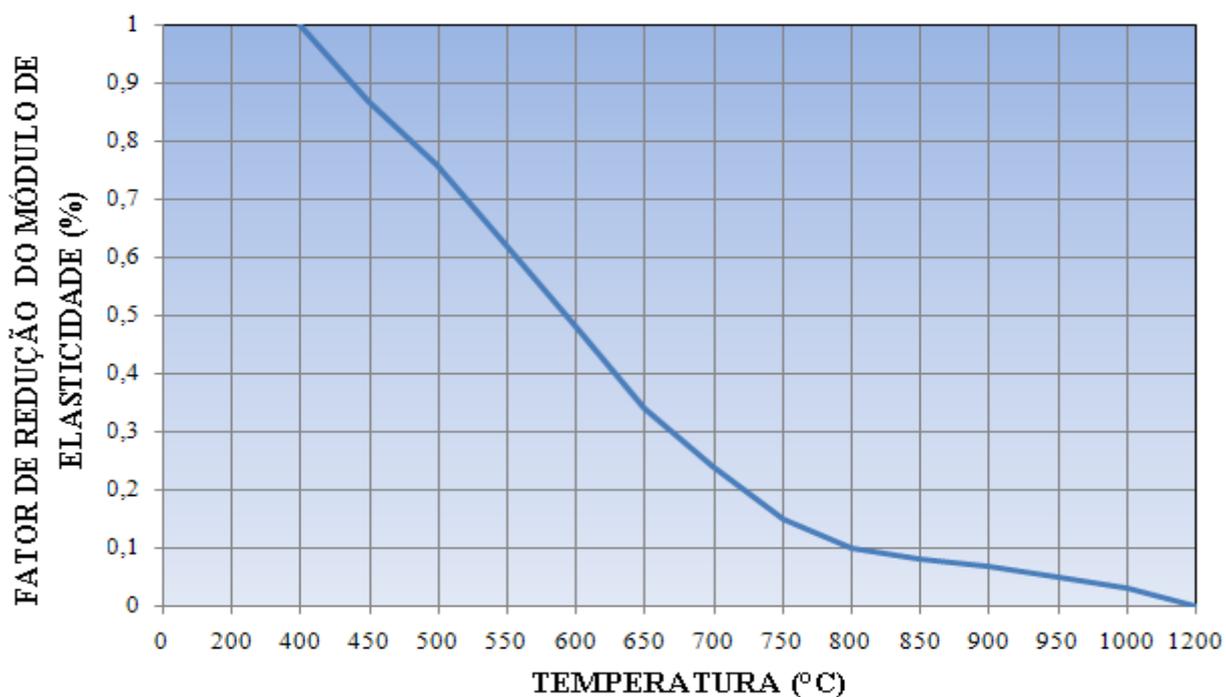


Figura 2.24 - Redução do módulo de elasticidade dos aços para concreto armado. (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002)

Atribui-se esta redução na resistência à maior facilidade de deslizamento das discordâncias formadas pelos contornos de grãos com a elevação da temperatura. (HUTCHISON; BAIRD, 1968).

A resistência ao escoamento da ferrita policristalina, é dependente da densidade das discordâncias e do tamanho de grão. (MEYRICK, 2001.)

A norma NBR 15200 - Projeto de estrutura de concreto em situação de incêndio, estabelece os critérios de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio e a forma de demonstrar o seu atendimento.

Esta Norma apresenta a variação esperada nas propriedades mecânicas, nas barras e fios de aços, quando submetidos a temperaturas típicas de incêndio.

Como referência, o fabricante One Steel Reinforcing Pty Limited, da Austrália, informa aos seus clientes as seguintes reduções na resistência no limite do escoamento dos seus produtos na categoria CA-50 (500MPa):

- a 300°C a resistência é reduzida para 400 MPa; e

- a 500°C a resistência é reduzida para 250 MPa.

Aços microligados, nos quais é mais sensível o efeito de endurecimento pela formação de carbeto, resistem um pouco mais a ação de temperaturas elevadas. As microestruturas geradas pelo endurecimento secundário são muito resistentes e formam a grande parte das ligas usadas nas indústrias de geração de energia, onde a temperatura dos vapores é tipicamente de 600°C.

## 2.5. SOLDABILIDADE

Reproduzimos do artigo “Emendas com Soldas: cuidados e procedimentos básicos na confecção de emendas” (ANDRADE; SECCO, 2007) o seguinte texto:

A emenda de barras de aço destinadas a concreto armado apresenta grande uso na recuperação e construção das armaduras de concreto. Dentro destas, a emenda com solda tem grande importância devido ao custo relativamente baixo, uso de mão-de-obra facilmente encontrada e por permitir a realização de emendas em locais de difícil acesso. O aumento na construção civil da execução de emendas com solda, utilizando eletrodo ou por caldeamento, está exigindo o desenvolvimento, nas usinas siderúrgicas de vergalhões mais facilmente soldáveis.

Alguns exemplos de aplicação de aços que exigem características de fácil soldabilidade são apresentados na Figura 2.25 e 2.26.

Na Figura 2.25 é mostrada de forma esquemática, uma armadura treliçada, cujo processo de fabricação deve atender aos seguintes requisitos:

A armadura treliçada, tratada na NBR 14862, é uma armação pré-fabricada em forma de estrutura espacial prismática por dois fios de aço paralelos na base (banzo inferior) e um fio de aço

no topo (banzo superior), interligados por eletrofusão aos dois fios de aço diagonais (sinusóides), com espaçamento regular de 200 mm (passo). O aço a ser utilizado na sua confecção deve ter suas características de soldabilidade garantidas, sendo permitida apenas a solda pelo sistema de eletrofusão, não podendo ser utilizados outros tipos de solda ou junções, executadas na obra ou fora dela.

A armação treliçada desempenha um importante papel nas lajes pré-moldadas que dela se utilizam, pois a estrutura espacial formada pelas barras na sapata de concreto de pequena rigidez, confere ao conjunto a rigidez necessária para a fabricação, transporte e montagem.

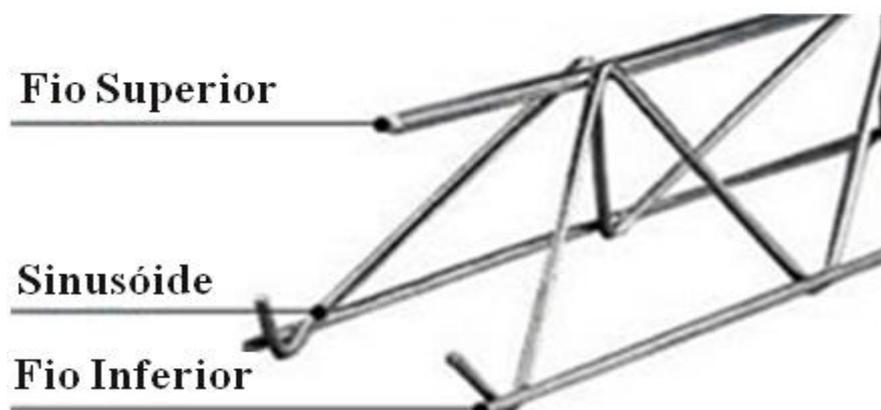


Figura 2.25 – Armação Treliçada. (SANTINE, 2004)

Na Figura 2.26 são mostradas algumas aplicações de armações treliçadas em diversas estruturas.



Figura 2.26 – Aplicações de armações treliçadas. (SANTINE, 2004)

Outro exemplo de aplicação de barras de aço com características de soldabilidade é mostrado na Figura 2.27, em estruturas denominadas de “tapetes de aço”.



Figura 2.27 - Aplicação de produtos pré-fabricados – tapetes de aço (ONE STEEL, 2007)

A maior ou menor adequabilidade dos aços à soldagem está diretamente relacionada a sua composição química, especialmente em relação ao teor de carbono, ou seja, do efeito da composição na maior ou menor possibilidade de formação de trincas na região soldada. (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006)

Como regra geral, sabe-se que quanto maior o teor de carbono, maior a possibilidade de formação de trincas na Zona Afetada Termicamente (Z.A.T.), na solda. (KOU,[s.d.]),(MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Um dos critérios adotados a nível internacional é o denominado Carbono Equivalente (C.E.), sendo apresentada a seguir, a fórmula compilada por Gorni, 2007 referendada pelo Instituto Internacional de Solda (IIW):

$$CE = C + Mn/6 + Ni/15 + Cu/15 + Cr/5 + Mo/5 + V/5$$

A nível internacional, normalmente, têm sido classificados como soldáveis aços com C.E. máximo de 0,44%.(ONE STEEL, 2003).

No Brasil, oficialmente o C.E. máximo para aços soldáveis é de 0,55%, conforme estabelece a norma NBR ABNT 8965 – Barras de aço CA42 S com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado.

Este limite, inicialmente proposto para uma categoria de aço que na verdade não é produzido em rotina no Brasil, ainda é o valor de referência para critério de soldabilidade de vergalhões e

produtos correlatos, conforme exigência da norma NBR ABNT 6118 – Projetos de estruturas de concreto armado – procedimentos.

## 2.6. ENSAIOS METALOGRAFICOS

### Macro e a Micrografia

O exame metalográfico procura relacionar a microestrutura do material às propriedades físicas, ao processo de fabricação, e pode ser: macrográfico e micrográfico.

### Macrografia

Consiste no exame do aspecto de uma superfície plana seccionada de uma peça ou amostra metálica, devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Por seu intermédio, tem-se uma idéia de conjunto, referente à homogeneidade do material, à distribuição e natureza de falhas, impurezas; ao processo de fabricação. Para a macrografia, o aço é o material de maior interesse.

Algumas das heterogeneidades mais comuns nos aços que podem ser observadas na macrografia são as seguintes: vazios, causados pelo resfriamento lento; segregações, causadas pelas impurezas e outros metais; dendritas, formação de grãos de vários tamanhos; trincas, devido às tensões excessivas no resfriamento.

### Micrografia

Consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, permitindo observar a granulação do material, a natureza, a forma, a quantidade e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões.

Estas observações são de grande utilidade prática. (BAPTISTA[s.d.]

### Metalografia Colorida

A metalografia é um ensaio realizado nos materiais metálicos, abordando a sua textura, que, em geral, é realizado em uma seção previamente preparada e atacada adequadamente por um reagente químico.

O perfeito ataque é o que evidencia a microtextura, com nitidez, caracterizando bem o corpo de prova.

No ataque colorido, uma fase em particular é determinada por uma cor definida. A identificação direta de microconstituintes, por meio de diferenciação através de cores, torna-se então possível.

Os vários reagentes causam a coloração das diferentes fases, de modo que é possível, pela escolha correta do reagente, colorir de forma distinta uma ou outra. (ABDALLA et. al. 2006).

As cores são desenvolvidas, por interferência, sempre do mesmo modo, por uma mesma fase, portanto, somente uma cor é desenvolvida por uma fase ou potencial específico. A Figura 2.28 mostra em azul a ferrita, em amarelo a martensita, em marrom a bainita e, em vermelho, a perlita.

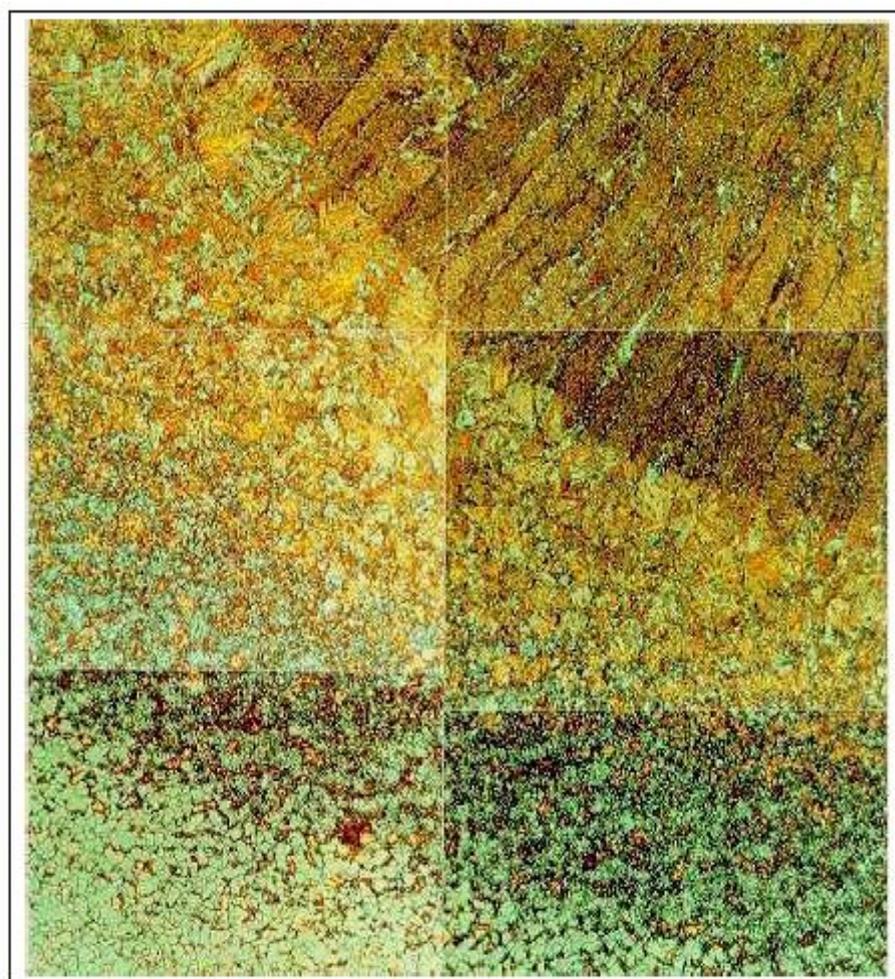


Figura 2.28 – Microestrutura multiconstituída de uma região soldada (BAPTISTA, s.d.)

A Figura 2.29 mostra nitidamente, na macrografia, o aspecto da seção de um vergalhão, representado na camada junto à superfície (mais escura), a martensita revenida ou sorbita e o núcleo (mais claro), mostrando os constituintes perlita e ferrita.

As micrografias, com aumento de 500X, mostram, no detalhe, as microestruturas presentes em cada parte da seção transversal.

1. CAMADA TRATADA JUNTO À SUPERFÍCIE DO VERGALHÃO CONSTITUÍDA POR MARTENSITA REVENIDA.
2. REGIÃO INTERMEDIÁRIA COM FORMAÇÃO DE BAINITA (PRESENÇA DE TRAÇOS DE MARTENSITA NA REGIÃO EXTERNA E FERRITA E PERLITA INTERNAMENTE).
3. NÚCLEO DO VERGALHÃO CONSTITUÍDO POR PERLITA-FERRITA DE GRANULAÇÃO FINA.



Figura 2.29 – Corte em secção transversal de vergalhão com tratamento térmico superficial. Visualização das regiões afetadas através da transferência de calor (ALVES, 2004)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fase experimental aconteceu em quatro experimentos, realizados no período de abril a outubro de 2008.

A metodologia experimental adotada neste trabalho foi realizada nas seguintes etapas, conforme mostrado no fluxograma exibido na figura 3.1.

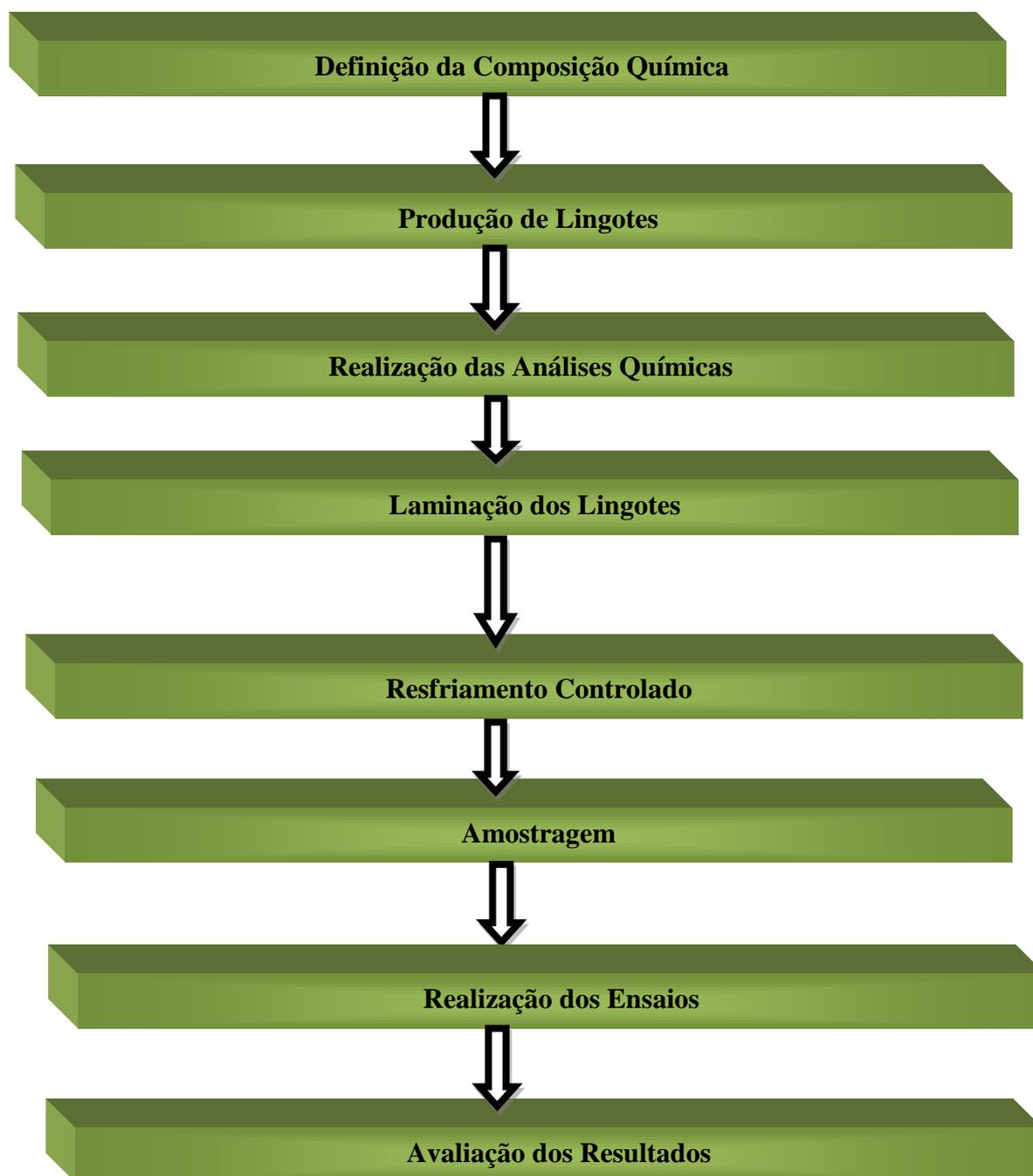


Figura 3.1 – Fluxograma - Metodologia Experimental

A composição química foi definida a partir de pesquisa bibliográfica e de amostras de referência, de produtos com propriedades mecânicas adequadas aos objetivos da pesquisa, adquiridas no mercado.

Nos experimentos desta pesquisa foram utilizadas amostras com teores de carbono equivalente (C.E.) compreendidos entre 0,32 e 0,56%, e a referência para o cálculo do C.E. foi a fórmula adotada pelo Instituto Internacional de Solda (I.I.W.) (GORNI, 2007).

$$\text{C.E.} = \text{C} + \text{Mn}/6 + \text{Ni}/15 + \text{Cr}/5 + \text{Mo}/15 + \text{V}/5$$

*Onde: os símbolos dos elementos representam os seus respectivos % em peso.*

Os lingotes foram produzidos, a partir da fusão de sucata, num forno a arco elétrico (F.A.E.) na COPALA Indústrias Reunidas S.A., localizada em Belém do Pará.

O processo industrial para a produção de vergalhões consiste, basicamente, na fusão de sucata metálica para produção de lingotes, os quais, numa segunda etapa do processo, passam por laminadores, para a produção de barras (vergalhões), que são empregadas em estruturas de construção civil e em grades.

Depois de recebida, a sucata é pesada e estocada num pátio, a céu aberto, onde, dependendo da sua natureza e forma de utilização, é submetida a alguns dos seguintes processamentos: corte através de tesoura mecânica; corte oxi-acetileno e prensagem. Em seguida, a sucata é levada para o forno, através de recipientes denominados de “cestões de carga fria” (ver figura 3.2), os quais são abastecidos por pontes rolantes, munidas de eletroímãs. O carregamento de sucata metálica no forno elétrico é feito através de sistema de aberturas no fundo dos cestões, os quais são sustentados pelas pontes rolantes.



Figura 3.2 – Cestão de carga fria

Após a fusão da sucata no forno elétrico (ver Figura 3.3), o aço é vazado num recipiente, denominado de “panela de carga quente”.



Figura 3.3 – Forno a arco elétrico

A panela é então transportada para a área de lingotamento, na qual o aço líquido é despejado em moldes chamados de “lingoteiras” (ver Figura 3.4). Assim, são produzidos os lingotes, com peso em torno de 90 kg, encerrando a primeira fase da produção.



Figura 3.4 - Lingoteiras

Numa segunda fase, os lingotes são colocados num forno de reaquecimento (ver Figura 3.5), onde permanecem em torno de 1 hora. A temperatura de aquecimento é de aproximadamente 1200°C.



Figura 3.5 – Forno de reaquecimento

Cada lingote é retirado do forno, para ser laminado, através de passagem, por vários estágios nos cilindros de laminação, até atingirem a bitola desejada dos vergalhões (ver Figura 3.6).



Figura 3.6 – Área de laminação das barras

Para a produção das barras utilizadas nos quatro experimentos, na bitola de 10 mm, foram necessários 18 passes pelos cilindros da laminação e a taxa de redução de área (deformação), do 17º para o 18º (passe acabador) foi de 13,7 %. (Figura 3.7).



Figura 3.7 Taxa de deformação nos dois últimos passes da laminação para a produção do vergalhão Ø 10 mm.

A deformação total para a produção desta bitola é de 99,2%, pois a seção inicial (Figura 3.8) é de 10x10 cm(10.000mm<sup>2</sup>), e a seção final é de 78,5mm<sup>2</sup>.(Figura 3.7)



Figura 3.8 – Área da seção transversal do lingote de 10 X 10 cm

A laminação dos lingotes, a aplicação do resfriamento controlado e as amostragens também foram realizadas nas dependências desta Empresa. As análises químicas foram feitas no espectrômetro de emissão ótica do laboratório da COPALA (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Espectrômetro para realização de análises químicas

A coleta das amostras foi realizada na COPALA, e a preparação das mesmas foi aconteceu na COPALA, no laboratório da Universidade Federal do Pará (UFPA) e no laboratório metalográfico do Centro Federal de Educação Tecnológica(CEFET). Os ensaios de resistência mecânica e dobramento foram realizados na UFPA e as avaliações metalográficas foram executadas no CEFET, conforme metodologia e procedimentos relatados nos itens subsequentes. Na Figura 3.10 é mostrado o equipamento (prensa tesoura) utilizado para o corte e coleta das e amostras.



Figura 3.10 – Prensa tesoura para o corte das amostras

A Figura 3.11 mostra um detalhe da identificação das amostras coletadas no 4º experimento e destinadas aos ensaios de resistência mecânica e metalografia.



Figura 3.11 – Identificação das amostras coletadas do 4º experimento.

A avaliação dos resultados dos ensaios foi realizada de acordo com diretrizes estabelecidas pelas normas técnicas e especificações pertinentes ao material produzido.

### 3.1. MATERIAIS DE REFERÊNCIA

a) Como produtos de referência para o desenvolvimento desse estudo, foram utilizadas amostras de dois fabricantes denominados como “A” e “B”, cujas características estão mostradas nas tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 e nas figuras 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15.

Tabela 3.1 – Ensaio físico fabricante “A”

Ensaio Físico						
Lote	Bitola nominal (mm)	Peso Linear (kg/m)	T.E. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R./T.E.	Along.(%)
CA 50	10,0	0,620	59,5	73,4	1,23	13
CA 50	12,5	0,960	58,5	70,7	1,21	16

Obs.: As amostras foram aprovadas no ensaio de dobramento a 180°.

Tabela 3.2 - Análises químicas fabricante "A"

Análises químicas						
Bitola nominal (mm)	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%C.E.
10,0	0,31	0,16	0,64	0,04	0,03	0,42
12,5	0,26	0,11	0,57	0,04	0,02	0,36

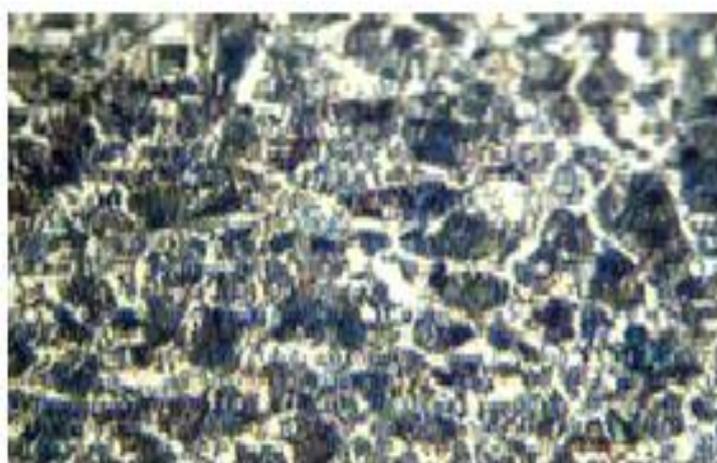


Figura 3.12 - Metalografia do centro da amostra fabricante "A" Ø 10,0mm – 400X(CEFET, 2008).

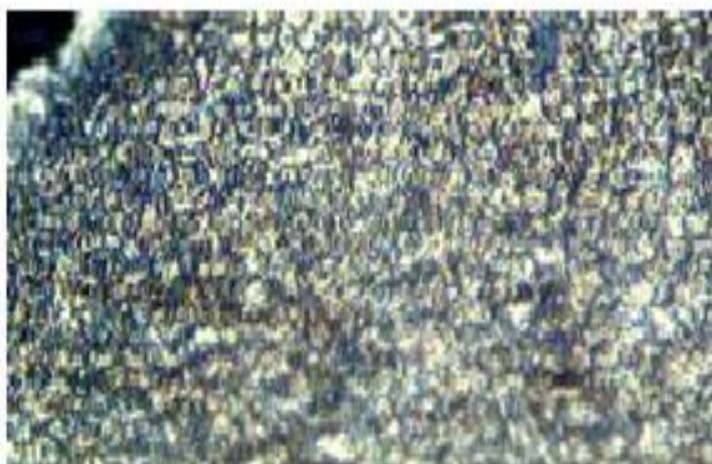


Figura 3.13- Metalografia da superfície da amostra fabricante "A" Ø 10,0mm – 400X(CEFET, 2008).

Tabela 3.3 – Ensaios físicos fabricante “B”

Ensaios Físicos						
Lote	Bitola nominal (mm)	Peso Linear (kg/m)	T.E. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R./T.E.	Along.(%)
CA 50	10,0	0,620	59,6	73,8	1,24	16
CA 50	12,5	0,950	61,0	76,6	1,26	14

Obs.: As amostras foram aprovadas no ensaio de dobramento a 180°.

Tabela 3.4 - Análises químicas fabricante "B"

Análises químicas						
Bitola nominal (mm)	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%C.E.
10,0	0,25	0,13	0,56	0,02	0,02	0,34
12,5	0,19	0,14	0,65	0,02	0,02	0,30

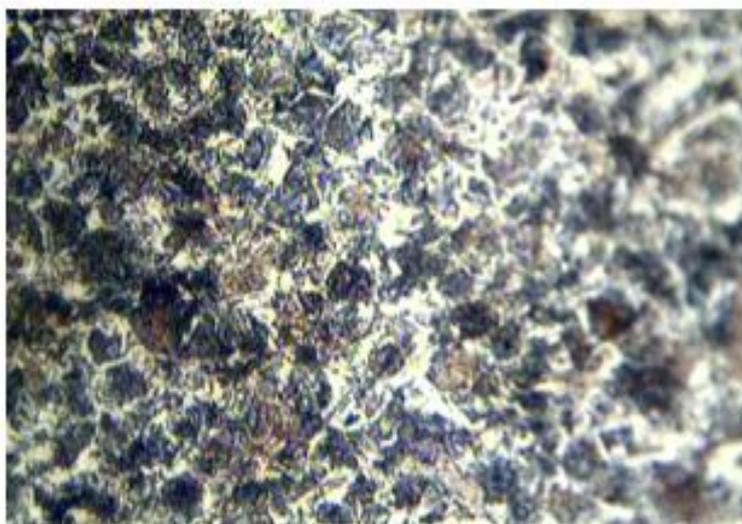


Figura 3.14 - Metalografia do centro da amostra fabricante “B” Ø 10,0mm – 400X (CEFET, 2008).

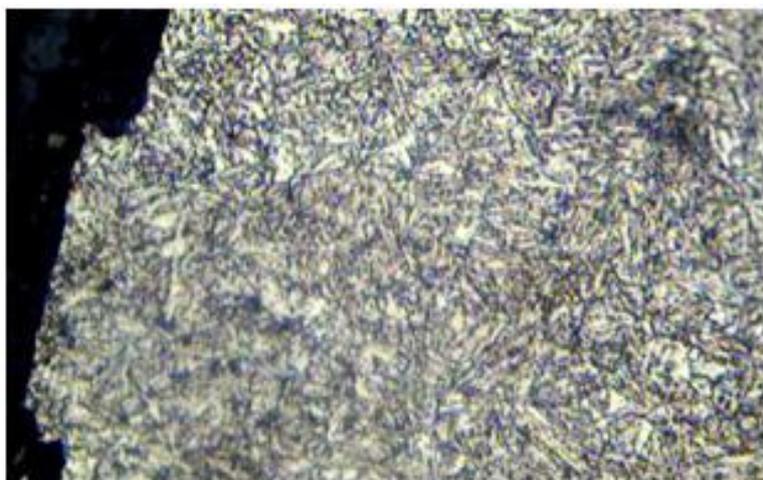


Figura 3.15 - Metalografia da superfície da amostra fabricante “B” Ø 10,0mm – 400X (CEFET, 2008).

b) Durante todo o período de realização dos experimentos, com o resfriamento das barras, (abril a outubro de 2008), foram compilados todos os dados dos ensaios físicos e das respectivas análises químicas, dos lotes de vergalhões produzidos, sem a aplicação de resfriamento.

O total de amostras ensaiadas foi de 800 exemplares e os resultados médios das análises químicas e dos ensaios que serão utilizados para comparação com as barras resfriadas, produzidas nos experimentos, estão mostrados na tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Médias das análises químicas e dos ensaios físicos das 800 amostras produzidas sem resfriamento

Valores médios das corridas produzidas sem resfriamento						
%C	%Mn	%C.E.	T.E. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R./T.E.	Along.(%)
0,46	0,95	0,62	54,0	75,6	1,40	18,4

Obs.: As amostras foram aprovadas no ensaio de dobramento a 180°.

A partir destes dados foi obtido o gráfico que relaciona o C.E. com a resistência de escoamento e com o alongamento (%), para barras não resfriadas mostrada na figura 3.15.

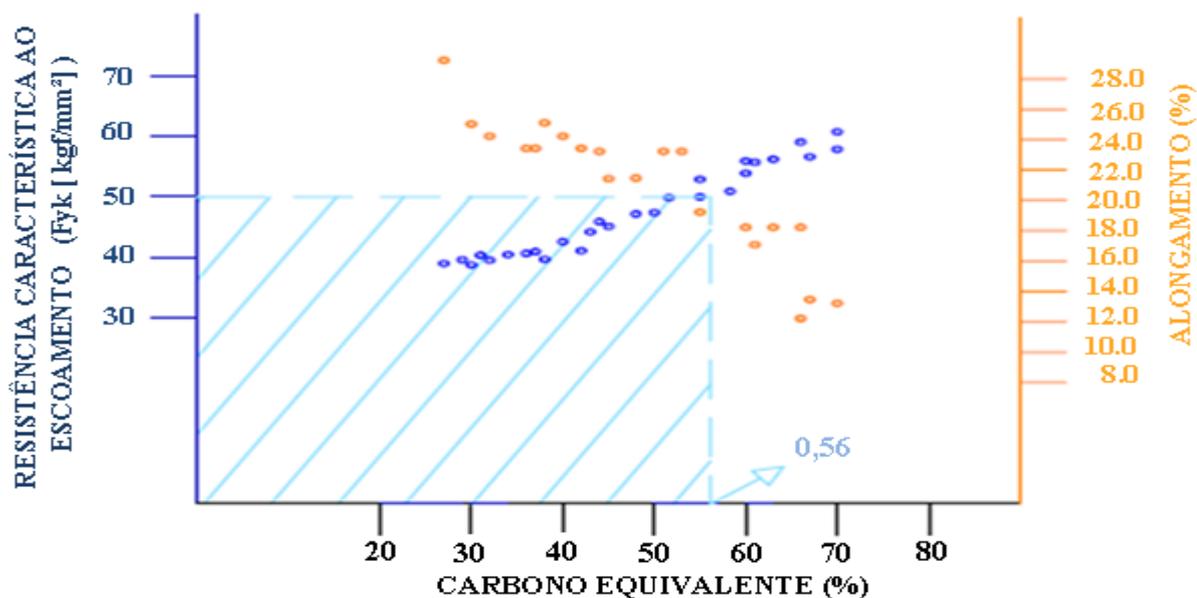


Figura 3.16 – Relação entre resistência característica ao escoamento, alongamento (%) e carbono equivalente em vergalhões bitola 10mm, em 800 amostras não resfriadas.

c) Para a limitação dos tempos de resfriamento das barras, foi usado como referência o diagrama CCT da Figura 2.11, tendo-se como meta um tempo máximo de 10 segundos.

### 3.2. EXPERIMENTOS REALIZADOS

#### a) Recursos Humanos

Para a realização de todos os experimentos houve a participação efetiva de um Grupo de técnicos do Departamento da Qualidade da COPALA e colaboradores das diversas unidades operacionais da Empresa.( Figura 3.17).

A referida equipe executou, basicamente, as seguintes atividades: medição de temperaturas em vários momentos da laminação; medição dos tempos mais importantes para o experimento, tais como: velocidade de laminação, tempo de aplicação do resfriamento; aplicação do resfriamento com as bombas lavadoras de alta pressão e registro dos dados.



Figura 3.17 – Parte da equipe participante dos experimentos

Na Figura 3.18 é mostrado um aspecto geral do forno de reaquecimento dos lingotes na laminação e o momento da retirada dos lingotes e a medição da temperatura destes, através de um pirômetro ótico



Figura 3.18 - Desenformamento dos lingotes e medição de temperatura

Na Figura 3.19 é mostrado um momento do início de laminação dos lingotes no trem de desbaste



Figura 3.19 - Início da laminação dos Lingotes (trem de desbaste)

A Figura 3.20 registra a medição da temperatura das barras antes do trem acabador.



Figura 3.20 - Medição de temperatura antes do trem de desbaste

A passagem das barras pelo último estágio de laminação (trem acabador) é exibida na figura 3.21.



Figura 3.21 - Passagem dos lingotes pelo ultimo estágio de laminação (trem acabador)

A medição da temperatura antes do resfriamento, por pirômetro ótico é evidenciada na figura 3.22.



Figura 3.22- Medição de temperatura antes do resfriamento

A utilização das bombas lavadoras de alta pressão para o resfriamento brusco das barras, após o trem acabador é observada na figura 3.23.



Figura 3.23 - Resfriamento brusco das barras (após trem acabador)

A medição da temperatura após o resfriamento esta constatada na figura 3.24.



Figura 3.24 - Medição de temperatura após o resfriamento

O registro dos tempos envolvidos nos experimentos, encontra-se ilustrado na Figura 3.25.

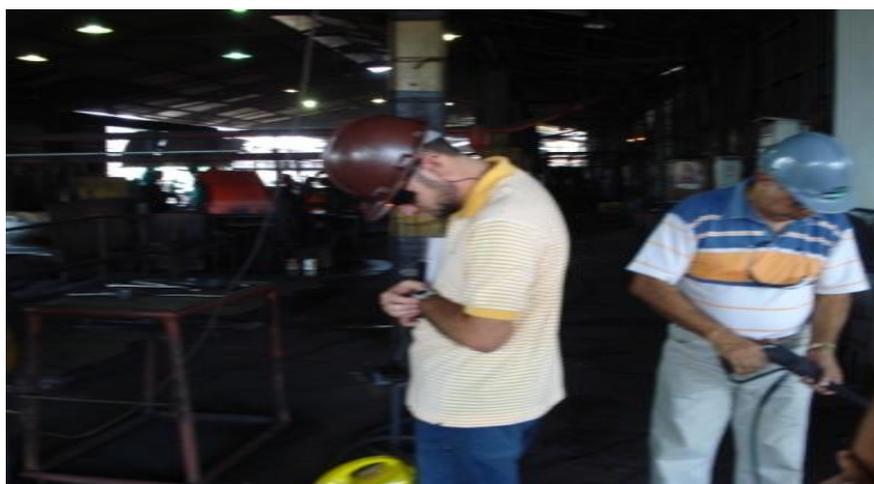


Figura 3.25 - Registro de tempo

O dados compilados no experimento foram registrados conforme pode-se observar na Figura 3.26



Figura 3.26 – Registro dos dados.

#### b) Descrição dos experimentos

A fase experimental aconteceu em 4 etapas, conforme segue:

b.1) Em 19/05/08, foi realizado, no laboratório químico, um teste de resfriamento controlado numa barra 50 cm da corrida TESTE/10mm-50cm. Para a austenitização da amostra, foi utilizado um forno que é empregado para a análise do teor de carbono em amostras de aços.

O forno foi aquecido até uma temperatura de 950 °C e a barra foi mantida em seu interior por 1 hora. Logo a seguir, a barra foi imediatamente colocada no recipiente de resfriamento.

A barra foi resfriada por um jato d'água, com uma bomba de alta pressão, de uma temperatura inicial de 950°C até 400°C, dentro do recipiente, por 4 segundos. Portanto foi aplicada uma taxa de resfriamento de aproximadamente 138°C/s. Após a sua retirada do recipiente, ela foi resfriada ao ar, a partir de uma temperatura de 400 °C, a qual chegou a 50°C em 6 minutos.

Foi cortado 1 cm da extremidade da barra para o encaminhamento para os ensaios metalográficos no CEFET, e o restante foi então levado ao Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, para a realização dos ensaios mecânicos.

b.2) Em 25/07/08, foi realizado o segundo experimento. Foram selecionadas amostras das corridas 1302 e 1311.

O aquecimento do material para a austenitização foi realizado no forno de reaquecimento de lingotes da laminação (Figura 3.27).



Figura 3.27 - Forno de reaquecimento de lingotes na laminação

O resfriamento foi aplicado por uma lavadora de alta pressão, na saída do último cilindro do trem acabador da laminação(fig. 3.28), logo após a saída da tesoura de corte das barras(fig. 3.29),no leito de resfriamento. (fig. 3.30).



Figura 3.28 - Cilindro do trem acabador



Figura 3.29 - Tesoura de corte das barras



Figura 3.30 – Resfriamento das barras

b.3) Em 06/08/2008, aconteceu o terceiro experimento. Desta vez o resfriamento foi aplicado em 4 amostras da corrida 1563.

b.4) Em 01/10/2008, no quarto experimento, foram resfriadas 5 barras da corrida identificada como “TESTE COP”. Neste experimento, foi aplicado um resfriamento rápido, em apenas uma das extremidades de cada barra, e, para efeito comparativo, foram realizados ensaios mecânicos tanto na parte resfriada da barra como na extremidade não resfriada.

Tanto no terceiro quanto no quarto experimento, para o resfriamento das barras, foram usadas duas bombas de alta pressão e foram observados os seguintes parâmetros operacionais:

Temperatura do forno de reaquecimento de lingotes: média de 1200°C.

Tempo de permanência dos lingotes no forno de reaquecimento: 1h.

Temperatura média após o cilindro acabador: 890°C.

Temperatura média no leito de resfriamento: 870°C.

Temperatura após o resfriamento (no revenimento): de aprox. 650°C.

Temperatura na superfície da barra logo após o resfriamento 250°C.

Vazão nominal da lavadora de alta pressão: 420 l/h.

Pressão de alimentação da água (psi/bar): 14,5/1.

Tempo médio de resfriamento das barras: 10s.

Velocidade média de resfriamento de: 64°C/s

Obs.: Para a definição de alguns destes parâmetros como, por exemplo: tempos, temperaturas e velocidades de resfriamento, foi usado como referência o diagrama CCT, mostrado na Figura 2.7

### 3.3. EQUIPAMENTOS E METODOLOGIAS

#### Equipamentos

Para o resfriamento das barras na laminação da COPALA, foram utilizadas duas lavadoras de alta pressão, sendo uma delas de fabricação Eletrolux electra 1600 EAS axial e a outra da marca Lavor. (Figura 3.31)



Figura 3.31 – Lavadoras de alta pressão

Para a medição das temperaturas, nos diversos locais da laminação e nos laboratórios foram utilizados os seguintes pirômetros ópticos: Raynger modelo 3i Series, fabricado pela Raytek e o outro, Modelo TI-920 fabricado pela Intrutherm.(Figuras 3.24 e 3.32).

Para o ajuste dos fatores de emissividade destes pirômetros, foram realizadas comparações com um pirômetro de imersão marca Eletronite utilizado para medições de temperaturas do aço produzido na aciaria da COPALA.

Este é um dos procedimentos recomendados pelo fabricante no “Appendix B.” Object Emissivity– How to Determine, Object Emmissivity– página b-1 do “Raynger 3i Series Operator’s Manual”.

Para a realização dos primeiros testes, foi utilizado um forno do laboratório químico da COPALA, normalmente empregado para análise de carbono, como fonte para o aquecimento das amostras (austenitização), antes do resfriamento das barras. (Figura 3.32).



Figura 3.32 - Pirômetros óticos e forno usado para austenitização das amostras do primeiro experimento

### 3.3.1. Análises químicas

Para a realização das análises químicas foi utilizado um espectrômetro de emissão ótica, modelo Spectromax, fabricado pela Spectro (Figura 3.33), e a rotina da execução da análise segue as recomendações do procedimento operacional interno – PRO n° 11 – laboratório químico de análises da COPALA.



Figura 3.33 – Espectrômetro Ótico

### 3.3.2. Ensaio de propriedades mecânicas

a) Para a realização destes ensaios foram utilizados os equipamentos, mostrados nas Figuras 3.34, 3.35, 3.36 e 3.37.



Figura 3.34 - Máquina universal de ensaios – Amsler  
capacidade 100 t

Determinação da resistência característica ao escoamento e limite de resistência.



Figura 3.35 – Balança para a pesagem das barras para a determinação da densidade linear de massa.  
(peso por metro).



Figura 3.36 – Equipamento para a marcação preliminar para a determinação do alongamento % após a ruptura em 10 Ø.



Figura 3.37 – Máquina universal de ensaios - Pino aplicado para a realização do ensaio de dobramento a 180°

## b) Metodologia

Para a realização dos ensaios de resistência mecânica, foram adotados os procedimentos estabelecidos pelas seguintes normas:

ABNT NBR 6153, Produtos Metálicos – Ensaio de Dobramento Semi-guiado – Método de Ensaio.

ABNT NBR ISO 6892, Materiais Metálicos – Ensaio de Tração à temperatura ambiente.

ISO 15630-1, Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test Methods – part 1: Reinforcement bars wire rod and wire.

### 3.3.3. Ensaios metalográficos

#### a) Preparação dos corpos-de-prova:

Os corpos de prova foram cortados na oficina de usinagem da COPALA e as operações de embutimento das amostras, lixamento e polimento foram realizados no laboratório do CEFET-PA e, nestas atividades, foram obedecidos os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 13284 da ABNT – Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica.

#### b) Materiais e Equipamentos

Para a preparação e observação metalográfica dos corpos-de-prova foram utilizados os seguintes equipamentos:

*b.1* – Maquinários: Prensa de embutimento, Disco de Corte, Politriz, Microscópio ótico (Fig. 3.38) e Secador.

*b.2* – Materiais: Baquelite, Lixas e Nital.



Figura 3.38 – Microscópio ótico

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. RESULTADOS

Os resultados obtidos, através da realização das análises químicas nas amostras usadas nos quatro experimentos são apresentadas a seguir:

#### 4.1.1 Análises químicas

Tabela 4.1 – Análise química da corrida TESTE -1º experimento

Amostras do primeiro experimento (TESTE).					
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%C.E.
0,26	0,65	0,04	0,04	0,14	0,37

Tabela 4.2 – Análise química da corrida 1302 -2º experimento

Amostras do segundo experimento.					
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%C.E.
0.30	0,7	0,03	0,03	0,09	0,42

Tabela 4.3 – Análise química da corrida 1311 -2º experimento

Amostras do segundo experimento.					
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%C.E.
0,26	0,71	0,04	0,04	0,12	0,38

Tabela 4.4 – Análise química da corrida 1563 – 3º experimento

Amostras do terceiro experimento da corrida 1563(valores médios)  
das 4 amostras

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%C.E.
0,40	0,95	0,05	0,03	0,013	0,56

Tabela 4.5 – Análise química da corrida “TESTE COP”

Amostra do quarto experimento da corrida “TESTE COP”

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%C.E.
0,23	0,49	0,01	0,02	0,36	0,32

#### 4.1.2 Ensaio de propriedades mecânicas

Nas tabelas seguintes são apresentados os resultados dos ensaios físicos realizados nas amostras nos quatro experimentos para os seguintes parâmetros:

Tabela 4.6 – Ensaio físico da corrida TESTE -1º experimento

Amostras do primeiro experimento (TESTE/10mm -50cm)			
T.E. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R./T.E.	Along.(%)
39,3	53,8	1,37	15

Obs.: A amostra foi aprovada no ensaio de dobramento a 180°.

Tabela 4.7 – Ensaio físico da corrida 1302 -2º experimento

Amostras do segundo experimento			
T.E. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R./T.E.	Along.(%)
46,9	62,7	1,34	20

Obs.: A amostra foi aprovada no ensaio de dobramento a 180°.

Tabela 4.8 – Ensaio físico da corrida 1311 -2º experimento

Amostras do segundo experimento			
T.E. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R./T.E.	Along.(%)
47,7	59,7	1,25	18

Obs.: A amostra foi aprovada no ensaio de dobramento a 180°.

Tabela 4.9 – Ensaio físico da corrida 1563 – 3º experimento

Amostras do terceiro experimento da corrida 1563(valores médios)			
T.E. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R./T.E.	Along.(%)
59,6	82,1	1,38	15

Obs.: A amostra foi aprovada no ensaio de dobramento a 180°.

Estes resultados representam a média das quatro (4) amostras usadas no experimento. Uma delas apresentou uma não conformidade no ensaio de dobramento, por quebrar num ângulo de

aproximadamente 60°, apesar de ser das quatro, aquela que se esperava uma melhor ductilidade, por ter o menor valor para limite de resistência.

Entendemos que o que tenha acontecido, provavelmente, foi a ocorrência do fenômeno chamado de "fragilização" pela transição da estrutura dúctil-frágil, devido à falta de homogeneização no resfriamento da superfície externa da barra, conforme mencionado no item 2.3.3 – "Transformações metalúrgicas" - Figura 2.14.

Na Tabela 4.10 são apresentados os resultados dos ensaios físicos das cinco amostras do quarto experimento.

Identificação das amostras	T.E. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R./T.E.	Along.(%)
AM 1 resfriada	46,7	57,0	1,22	18,6
AM 2 resfriada	46,9	56,7	1,19	18,8
AM 3 resfriada	47,3	57,7	1,22	18,7
AM 4 resfriada	46,5	58,1	1,25	19,5
AM 5 resfriada	49,3	58,3	1,18	19,9
AM 1 não resfriada	37,4	51,6	1,38	24,3
AM 2 não resfriada	38,0	51,7	1,36	26,9
AM 3 não resfriada	40,4	53,7	1,28	26,7
AM 4 não resfriada	41,9	53,7	1,28	25,3
AM 5 não resfriada	38,2	52,2	1,37	25,7

Obs.: Todas as amostras foram aprovadas no ensaio de dobramento a 180°.

Na Tabela 4.11 é apresentado o resumo das médias dos ensaios físicos das cinco amostras usadas no quarto experimento.

	T.E. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.R./T.E.	Along.(%)
Amostras resfriadas	47,3	57,6	1,22	19
Amostras não resfriadas	39,2	52,5	1,34	25

Obs.: Todas as amostras foram aprovadas no ensaio de dobramento a 180°.

Nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, são apresentados gráficos comparativos das propriedades físicas entre as extremidades resfriadas e não resfriadas das 5 amostras do experimento 4.

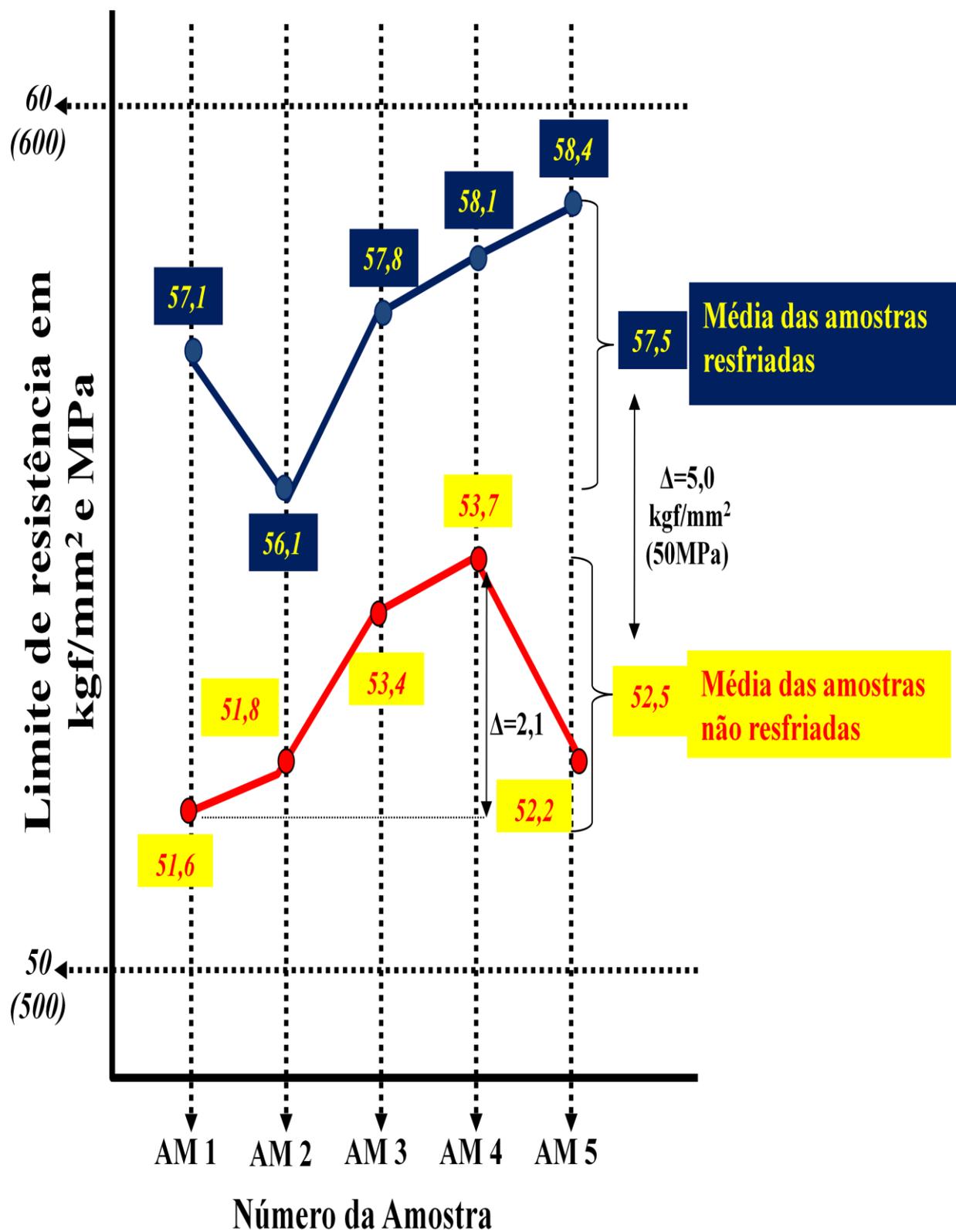


Figura 4.1 - Gráfico - variação do limite de resistência – barras do 4º experimento

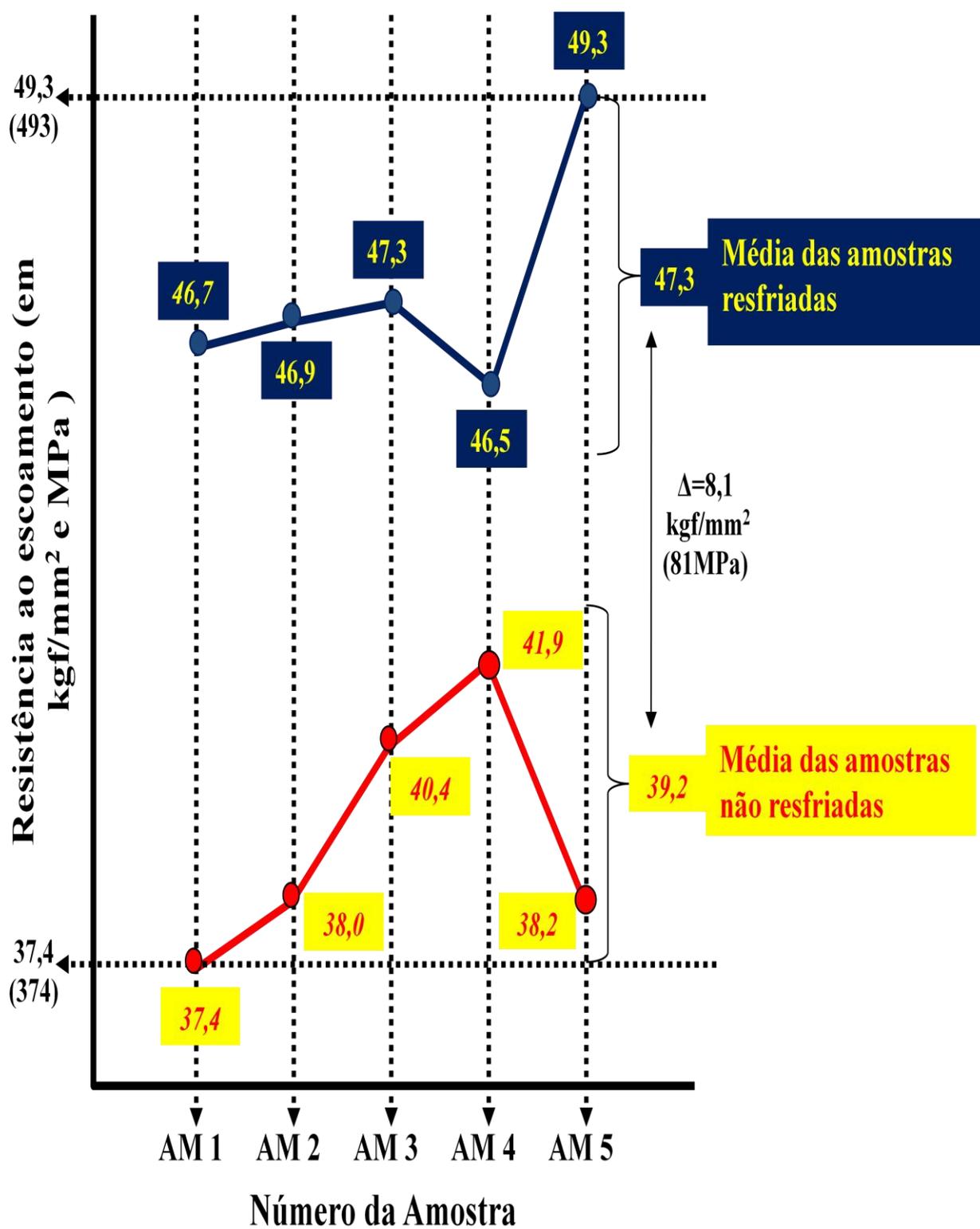


Figura 4.2 – Gráfico – variação da resistência ao limite de escoamento – barras do 4º experimento

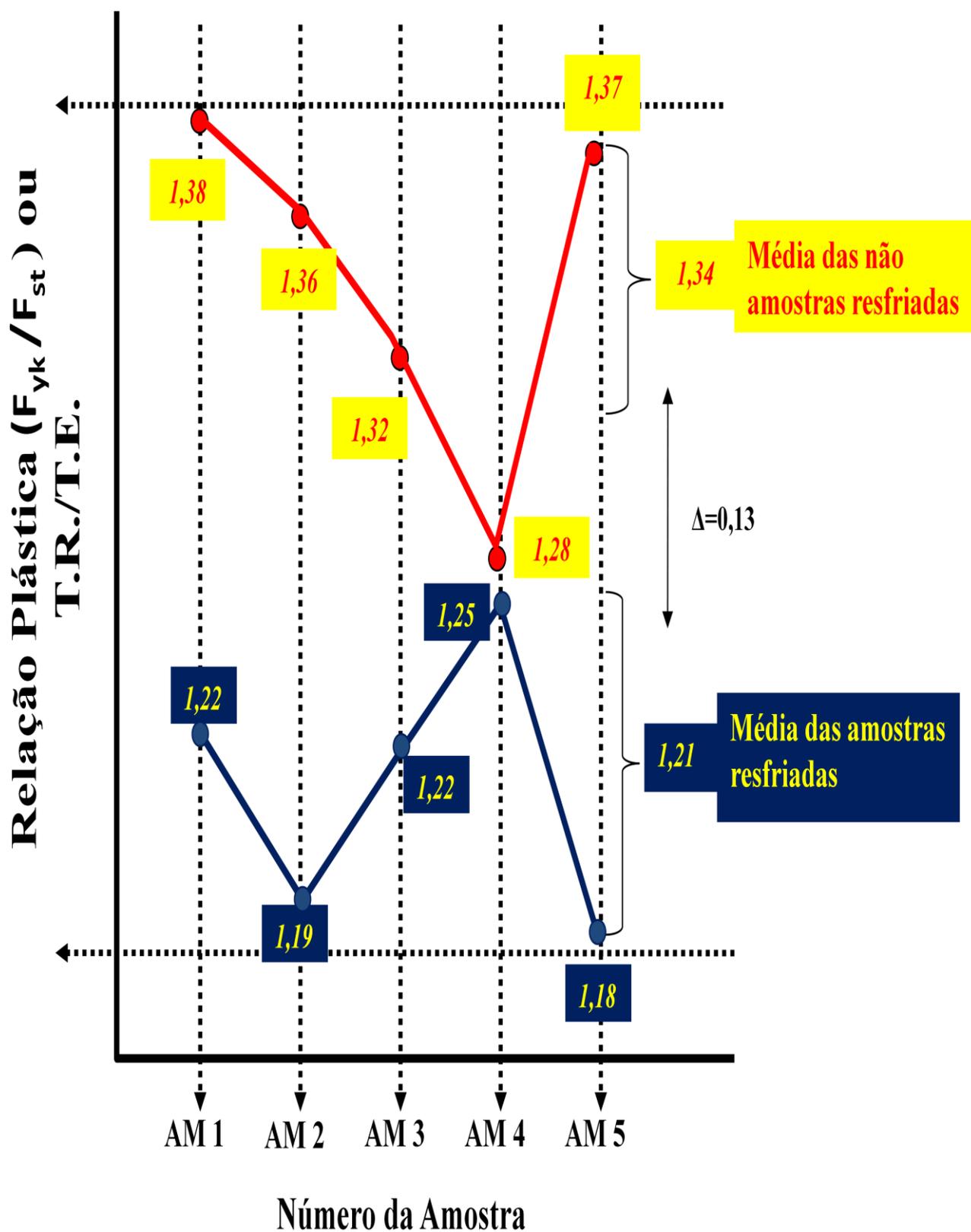


Figura 4.3 – Gráfico – variação da relação limite de resistência/ resistência ao escoamento – barras do 4º experimento

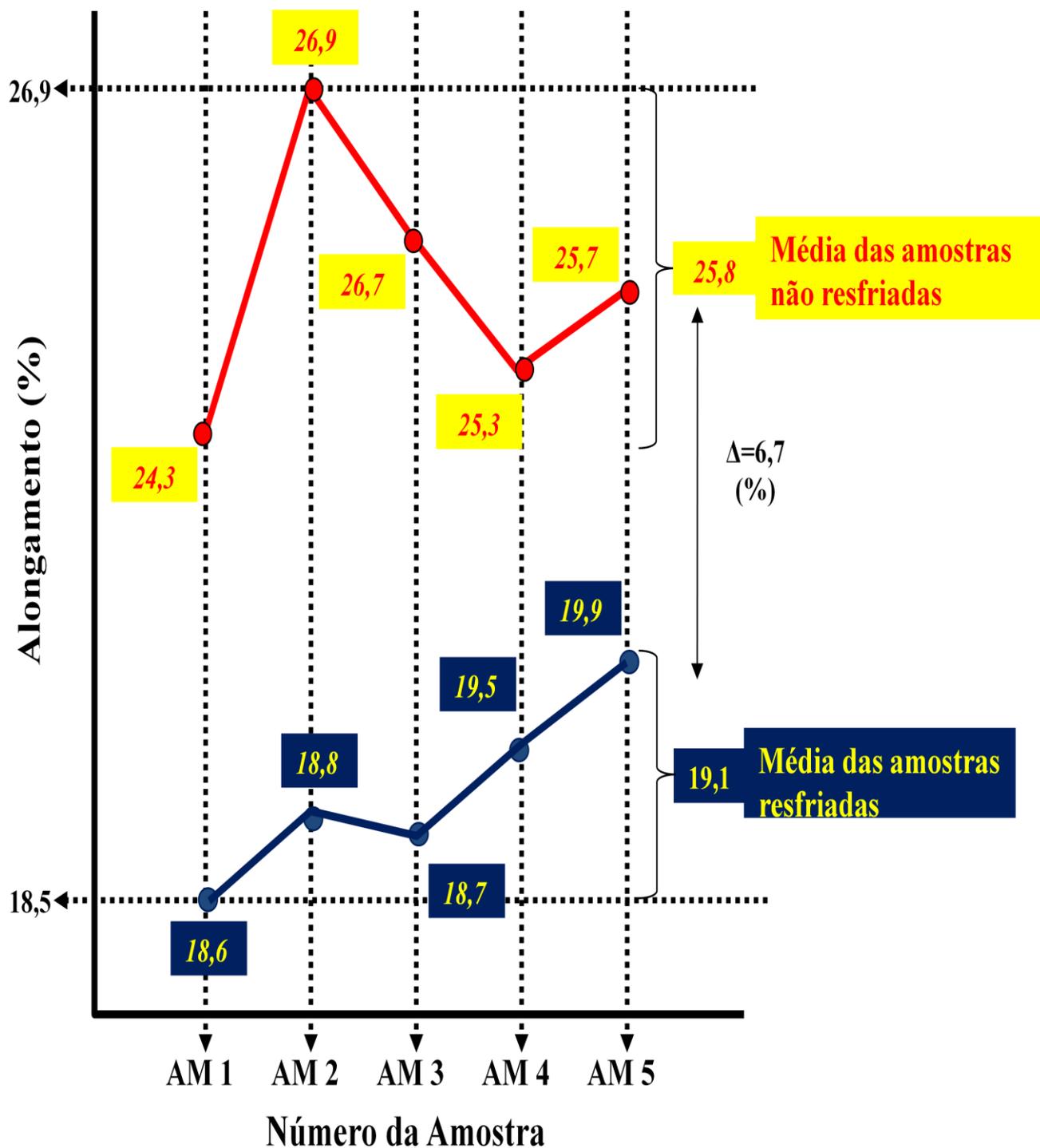


Figura 4.4 – Gráfico – variação de alongamento % – barras do 4º experimento

Na Figura 4.5 são mostradas fotografias das estricções nas secções de ruptura, após o ensaio de tração de 5 amostras resfriadas e 5 não resfriadas.

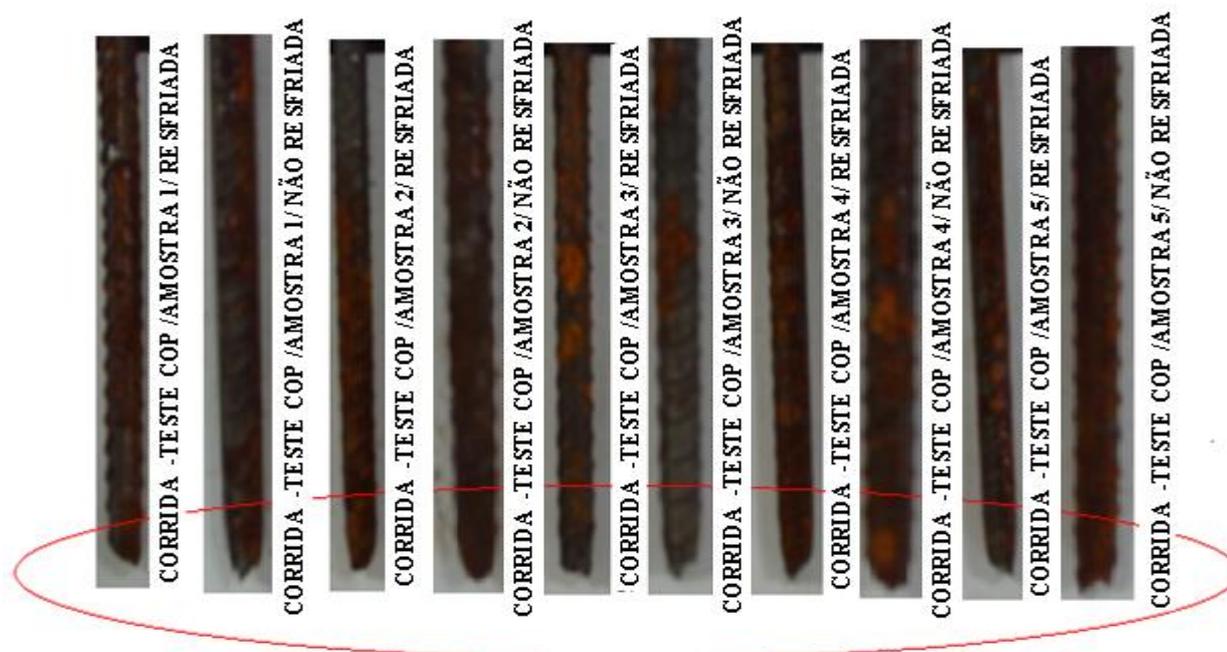


Figura 4.5 – Fotografias das estricções nas rupturas das amostras do experimento 4

As tabelas 4.12 e 4.13 mostram os valores obtidos para os percentuais de reduções das seções transversais das amostras (estricções) ,após a realização do ensaio de tração, nas rupturas de cada uma delas. Como referência, também são apresentados os respectivos valores dos alongamentos percentuais de cada uma das amostras.

Tabela 4.12 - Valores de reduções nas áreas transversais das barras na ruptura com resfriamento (estricção)

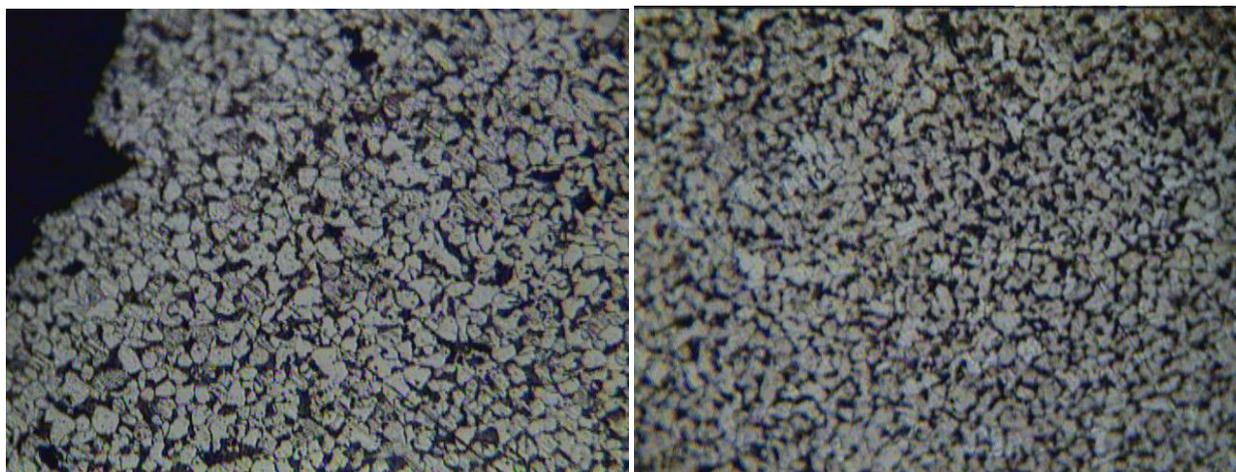
AMOSTRAS RESFRIADAS					
	resf. 1	resf. 2	resf. 3	resf. 4	resf. 5
<b>Diâmetro médio após ruptura (mm)</b>	6,77	6,72	6,87	6,46	6,24
<b>Área na estricção (mm<sup>2</sup>)</b>	36,00	35,47	37,07	32,77	30,58
<b>Área inicial (mm<sup>2</sup>)</b>	77,07	76,69	76,18	77,45	77,07
<b>Redução da área após estricção (%)</b>	53,29	53,75	51,34	57,68	60,32
<b>Média de redução (estricção) na área de ruptura das 5 amostras(%)</b>			55,28		
<b>Alongamento (%)</b>	18,6	18,8	18,7	19,5	19,9

Tabela 4.13 - Valores de reduções nas áreas transversais das barras na ruptura com resfriamento (estricção)

AMOSTRAS NÃO RESFRIADAS					
	ñ resf. 1	ñ resf. 2	ñ resf. 3	ñ resf. 4	ñ resf. 5
Diâmetro médio após ruptura (mm)	6,49	6,59	6,36	6,79	6,71
Área na estricção (mm <sup>2</sup> )	33,08	34,11	31,77	36,21	35,36
Área inicial (mm <sup>2</sup> )	77,45	76,31	76,82	76,31	78,47
Redução da área após estricção (%)	57,29	55,3	58,65	52,55	54,94
Média de redução (estricção) na área de ruptura das 5 amostras(%)			55,75		
Alongamento (%)	24,3	26,9	26,7	25,3	25,7

#### 4.1.3. Ensaio metalográfico

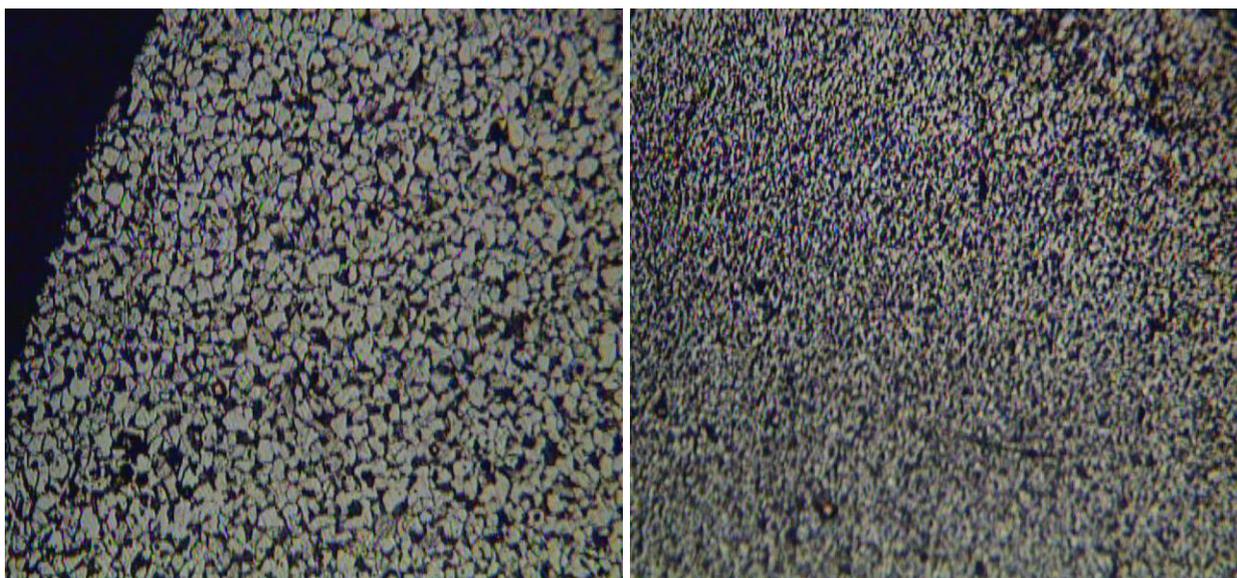
Para esta avaliação foram selecionadas 4 amostras do 4º experimento, pois dos quatro testes este foi o mais representativo, haja vista que foram feitas comparações entre extremidades de uma mesma barra, sendo uma resfriada e a outra não, e o material foi obtido de uma corrida com o menor C.E de todos os quatro experimentos (C.E. = 0,32%). Nas Figuras 4.6 e 4.7 são mostradas as imagens metalográficas das amostras nº 2 e 5, respectivamente, com e sem resfriamento.



**Amostra 2 - Superfície Não Resfriada – 400 X**

**Amostra 2 - Superfície Resfriada 400 X**

Figura 4.6 – Metalografia da amostra 2 - Corrida TESTE COP



**Amostra 5 - Superfície Não  
Resfriada – 400X**

**Amostra 5 - Superfície  
Resfriada – 400X**

Figura 4.7 – Metalografia da amostra 5 Corrida TESTE COP

## 4.2 DISCUSSÕES

Para a avaliação dos resultados destes ensaios foram levadas em consideração as seguintes referências:

- as condições operacionais de realização dos resfriamentos nos quatro experimentos;
- os resultados dos ensaios dos experimentos;
- as características físico-químicas dos vergalhões produzidos, sem resfriamento com água
- os resultados dos ensaios físicos das amostras de referência produzidas pelos fabricantes “A” e “B”.

### Condições de Resfriamento

Nos dois primeiros experimentos foi usada apenas uma lavadora de alta pressão e nos dois últimos foram empregadas duas, ou seja, no terceiro e quarto teste foi possível aplicar uma maior taxa de resfriamento, de aproximadamente 64° C/s.

Por esta razão, foram observados aumentos mais significativos na resistência ao escoamento (T.E.) e no limite de resistência (T.R.) nas amostras dos dois últimos.

Para os níveis de carbono equivalente empregados para este tipo de produto, são recomendados taxas de resfriamento de aproximadamente 100°C/s. (Figura 2.11).

### Resistência ao Escoamento

Em relação à resistência ao escoamento, foram feitas as seguintes constatações:

A amostra do primeiro teste, com um C.E. de 0,37% teve um aumento de 2,7 kgf/mm<sup>2</sup> (27 MPa), em relação as que não foram resfriadas, conforme mostrado na Figura 3.15

No segundo teste, as duas amostras com C.Es. de 0,42% e 0,38% apresentaram um aumento de 3,8 kgf/mm<sup>2</sup> (38 MPa) e 5,7 kgf/mm<sup>2</sup> 57(MPa), respectivamente, também em relação às não resfriadas.

Os experimentos 3 e 4, tiveram resfriamento mais drástico, pela ação conjunta das duas lavadoras de pressão, e isto resultou em aumentos mais significativos na resistência ao escoamento conforme segue:

- a amostra do 3º experimento, com C.E. de 0,56% apresentou um aumento de 7,6 kgf/mm<sup>2</sup> (76MPa), em relação às amostras com mesmo C.E., não resfriadas.

Esta amostra apresentou para resistência ao escoamento (T.E.) um valor absoluto de 59,6 kgf/mm<sup>2</sup> (596MPa), portanto, superior a 50,0 kgf/mm<sup>2</sup> (500 MPa) , que é o mínimo exigido para a categoria CA 50 da NBR ABNT 7480.

O quarto experimento foi bastante importante, para efeito de avaliação, uma vez que a comparação pode ser feita entre uma extremidade resfriada e a outra não resfriada, de uma mesma barra, num total de cinco(5) vergalhões laminados.

As amostras foram obtidas de uma corrida com C.E. de 0,32% e foi de 8,1 kgf/mm<sup>2</sup> (81 MPa) o aumento médio da resistência ao escoamento (T.E.) entre as extremidades resfriadas e não resfriadas.

O valor absoluto de T.E. das extremidades resfriadas foi de 47,3 kgf/mm<sup>2</sup> (473 MPa), isto é, já bastante próximo do valor mínimo de T.E. 50 kgf/mm<sup>2</sup> (500 MPa) , estabelecido pela norma ABNT NBR 7480.

A partir dos resultados de resistência ao escoamento das 800 amostras produzidas normalmente, resfriadas ao ar, isto é, sem resfriamento brusco com água; das amostras dos

experimentos 3 e 4, e das amostras de referência dos “A” e “B”, plotamos o gráfico, mostrado na Figura 4.8 que relaciona a resistência ao escoamento com o carbono equivalente (C.E.).

A Figura 4.8 representa de forma gráfica e simplificada os resultados mais importantes e significativos obtidos deste trabalho, pois a partir dele, podemos concluir e evidenciar os seguintes dados e fatos:

Para um mesmo C.E., as amostras dos experimentos 3 e 4 apresentaram um aumento médio na resistência ao escoamento de  $7,8 \text{ kgf/mm}^2$  (78 MPa), em relação as amostras produzidas, sem resfriamento brusco com água.

Ainda para um mesmo C.E. a amostra do fabricante “A” apresenta, em relação à média dos experimentos 3 e 4, um valor de resistência ao escoamento em torno de  $7\text{kgf/mm}^2$ (70MPa), superior aos mesmos.

Usando o mesmo critério dedutivo aplicado ao fabricante “A”, pode-se constatar que o fabricante “B”, apresenta, para um mesmo C.E., um valor de resistência ao escoamento em torno de  $11\text{kgf/mm}^2$  (110MPa), superior aos experimentos 3 e 4.

Que o fabricante “B” tem uma maior eficiência no seu processo de resfriamento controlado que o fabricante “A”, haja vista que, a mesma resistência ao escoamento, de  $59,6 \text{ kgf/mm}^2$  (596 MPa), foi obtida pela o fabricante “B” com um C.E. de 0.34%, sendo que o fabricante “A” precisou de um C.E. 0,42% para atingir esta mesma resistência.

Que, apesar dos experimentos 3 e 4 terem apresentado melhorias importantes de resistência de escoamento (T.E) e de limite de resistência (T.R.), quando comparadas com os dados de resistência mecânica dos fabricantes “A” e “B”, para um mesmo C.E., observa-se que ainda há oportunidades para melhorias significativas, se forem aplicadas em estudos futuros, sistema de resfriamento mais homogêneo, que provavelmente resultará em modificações estruturais mais drásticas nos produtos

#### Limite de resistência

As amostras do experimento 4, evidenciaram, claramente, que houve um aumento no limite de resistência, pela aplicação do resfriamento nas barras laminadas.

O aumento médio foi de  $5,0 \text{ kgf/mm}^2$  (50MPa) entre as extremidades resfriadas –  $57,5 \text{ kgf/mm}^2$  (575MPa) e as não resfriadas –  $52,5 \text{ kgf/mm}^2$  (525MPa), conforme apresentado na figura 4.1.

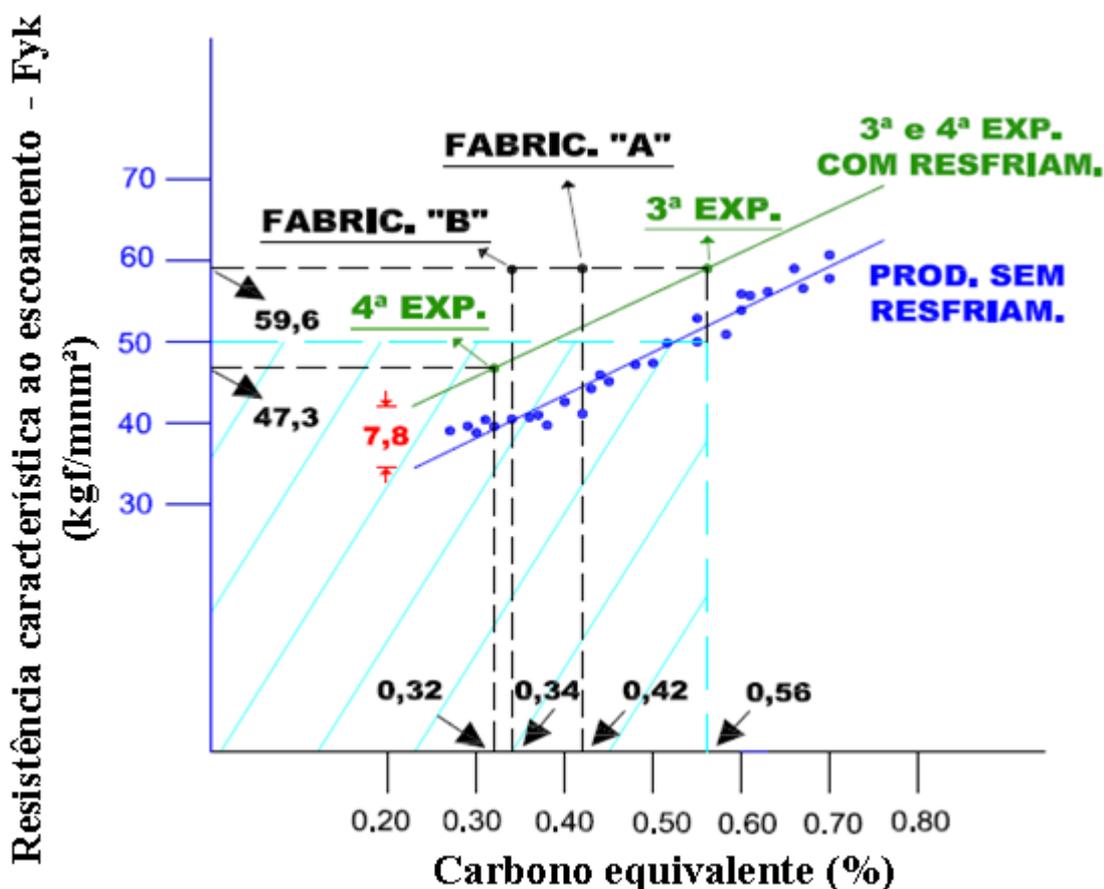


Figura 4.8 – Relação entre resistência de escoamento e carbono equivalente nas amostras dos experimentos 3 e 4, das 800 amostras da produção, sem resfriamento, e os dados das amostras de referência dos fabricantes “A” e “B”.

#### Relação plástica

Ainda, tomando-se como referência as amostras do 4º experimento, observou-se que a relação entre o limite de resistência e a resistência ao escoamento – TR/TE diminuiu de 1,34, nas amostras não resfriadas, para 1,22 nas resfriadas (tabela 4.11), porém ainda assim atendendo, com folga, à exigência da norma NBR 7480 da ABNT para a categoria CA 50 que é de 1,08 (tabela 2.2). A redução na relação plástica observada deve-se aos seguintes fatores: as amostras não resfriadas são barras com baixo teor de carbono, resfriadas lentamente após o processo de laminação a quente, nas quais houve a formação de uma estrutura mista de ferrita e perlita; porém, a ferrita domina as propriedades mecânicas por ser a matriz mais contínua deste tipo de aço, cuja característica é uma elevada relação plástica T.R./T.E.(ver Fig. 2.12). As barras resfriadas após a laminação produziram uma estrutura martensítica que, após o revenimento, gerou uma estrutura

formada por cementita e ferrita, a qual, devido às características de dureza da cementita, resulta numa estrutura com uma relação plástica menor.(ver Fig. 2.14).

### Alongamento

A norma NBR 7480 (tabela 2.2) estabelece 8% como valor mínimo para o alongamento da categoria CA 50.

Todas as amostras dos 4 experimentos atenderam a este requisito, sendo que até mesmo as barras do 3º teste ,com o teor de C.E. mais elevado de todas (C.E. = 0,56%), tiveram alongamento de 15% (o mais baixo de todos os testes), o qual, ainda assim, atende plenamente à exigência da NBR 7480.

Conforme era esperado, as amostras resfriadas apresentaram valores para alongamento (%) inferiores aos das barras não resfriadas.

Este ponto ficou bastante evidenciado nas cinco amostras do 4º experimento, no qual houve uma redução média de 6,7% no alongamento das barras resfriadas, em relação às não resfriadas (figura 4.3 – gráfico - alongamento %).

### Estricção

Esta é uma outra forma de avaliação da ductilidade das barras, além do alongamento percentual. Na figura 4.5 observa-se que, aparentemente, as amostras 2, 4 e 5, mesmo com a aplicação de resfriamento, têm maior redução da área de seção transversal (estricção) do que as não resfriadas.

Das tabelas 4.12 e 4.13, conclui-se que, em média, as amostras resfriadas tiveram uma redução de área de 55,28%, um pouco inferior ao valor de 55,75% obtido nas amostras não resfriadas. Porém, cumpre mencionar as duas exceções observadas nas amostras 4 e 5, que, apesar de resfriadas, tiveram estricções de 57,68% e 60,32%, respectivamente, maiores que as estricções verificadas nas amostras não resfriadas que foram de 52,55% e 54,95%, respectivamente.

### Dobramento

Todas as amostras exceto uma do experimento 3, foram aprovadas no ensaio de dobramento, realizado conforme metodologia estabelecida pela norma ABNT NBR 6153.

Esta exceção, foi devido à uma quebra de uma das 4 amostras deste teste, que aconteceu durante a realização do ensaio, causada, provavelmente, pela ocorrência do fenômeno denominado

de “fragilização” pela transição dúctil-frágil, provocado pela falta de homogeneização no resfriamento da superfície externa da barra. (ver item 2.3.3 e figura 2.16.)

#### Observações metalográficas

Pelo exame das micrografias das amostras dos testes de resfriamento, especialmente as amostras 2 e 5 do 4º experimento, observa-se que houve uma grande redução no tamanho dos grãos das amostras, provocada pelo resfriamento.(Figuras 4.6 e 4.7).

Este efeito de refino de grão foi mais acentuado na amostra nº 5.

Entendemos que este experimento foi realizado em diversas condições favoráveis a um acentuado refino do tamanho dos grãos, tais como:

Com a deformação aplicada pelos cilindros da laminação, a energia gerada propicia condições para a ocorrência de recristalização, com a nucleação dinâmica de novos grãos (Figura 2.22.( PADILHA, 2005).

Este efeito ficou mais acentuado com a aplicação de resfriamento, logo após a passagem pelo último passe do laminador.

Hashimoto e Nakamura (2006) apresentam trabalhos que demonstram significativa redução no tamanho de grãos, em função do aumento das taxas de resfriamento, Figura 2.19.

Para um aço com 0,25%C e 1,19%Mn, estes autores constataram redução de aproximadamente 10,5 µm para 7,0 µm no tamanho dos grãos, para uma taxa de resfriamento de 40 °C/s, (Figura 2.19); isto é, houve uma redução de 33,3% no tamanho dos grãos.

Estes pesquisadores também demonstram que há uma importante influência da taxa de resfriamento e, conseqüentemente, do refino de grãos, no aumento na resistência de escoamento (Figura 2.17) e no limite de resistência (Figura 2.18).

O resfriamento brusco provoca a formação de uma estrutura martensítica ,na superfície externa das barras que, posteriormente, passam por um processo de revenimento, que resulta na precipitação de uma cementita de granulação fina, que se dispersa na matriz ferrítica (ASKELAND, 2006) (FIGURA 2.15); (TEPCORE; TATA TISCOM, 2007) (figura 2.1).

Vilar e Balancin (2007) demonstraram que a recristalização dinâmica da ferrita e a precipitação da cementita são responsáveis pelo intenso refino de grãos, uma vez que os contornos formados por estas duas fases atuam como barreiras que inibem crescimento dos mesmos.

Nos experimentos realizados, este efeito de refino de grãos é evidenciado especialmente na micrografia da amostra 5 do 4º teste (Figura 4.7).

Esta amostra teve grande representatividade nesta série de experimentos. Foi aquela que teve, dentre as cinco que foram avaliadas neste 4º teste, os maiores valores para resistência ao escoamento (49,3 kgf/mm<sup>2</sup>), para limite de resistência (58,4 kgf/mm<sup>2</sup>) e para alongamento (19,9%), ou seja, foi a que também teve maior ductilidade, apesar de ser a de maior resistência mecânica deste grupo de amostras.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. CONCLUSÕES

As composições químicas dos aços empregados em todos os quatro experimentos, foram adequadas, se comparadas com os dados da bibliografia pesquisada, das normas existentes e das amostras dos fabricantes “A” e “B”, usadas como referência.

A faixa de variação do carbono equivalente (C.E.) das amostras tratadas nos testes esteve entre 0,32% e 0,56%. Para a definição da composição química, dentre outras mencionadas, foram adotadas as seguintes referências :

- a) Fabricante “A” – C.E. de 0,42% para diâmetro 10,0 mm e 0,36% para diâmetro 12,5mm. (tabela 3.2)
- b) Fabricante “B” – C.E. de 0,30% para diâmetro 12,5 mm e 0,34% para diâmetro 10,0 mm. (tabela 3.4)
- c) Norma ABNT – NBR 6118 – C.E. máximo de 0,55%, para barras soldáveis.

Foi aplicado um drástico resfriamento às barras, durante a laminação, logo após a saída do trem acabador, promovendo um tratamento térmico, com a formação de uma estrutura martensítica na superfície externa das mesmas, a qual foi revenida, pela ação do calor remanescente no núcleo das barras. Posteriormente, no leito de resfriamento, aconteceu a equalização da temperatura de toda a seção transversal das barras.

O resfriamento rápido, associado à energia de deformação provocada pelos cilindros da laminação, promoveu a recristalização, que resultou na formação de muitos e pequenos grãos.

O revenimento, resultou na precipitação de cementita, finamente dispersa, numa matriz ferrítica, gerando uma estrutura denominada “martensita revenida”.

A observação metalográfica, especialmente na 5ª amostra do 4º experimento, revelou uma significativa mudança na sua microestrutura, em consequência do tratamento térmico aplicado, que resultou no intenso refino de grão, cujo efeito foi evidenciado pelos resultados dos ensaios físicos, através dos quais observou-se um aumento importante na resistência mecânica das barras.

Comparando-se os resultados dos ensaios das partes resfriadas e não resfriadas das 5 barras do 4º experimento, evidenciaram-se as seguintes melhorias (valores médios):

A resistência ao escoamento aumentou em 8,1 kgf/mm<sup>2</sup> (81MPa).

O limite de resistência aumentou em 5,0 kgf/mm<sup>2</sup> (50MPa).

O alongamento diminuiu em 6,7%, mas, ainda assim, o valor obtido nas cinco amostras resfriadas, de 19,1%, é bastante superior ao mínimo exigido pela norma que é de 8,0%.

A relação plástica foi reduzida em 0,13 (T.R./T.E.), porém, o valor médio, obtido nas extremidades resfriadas, que foi de 1,21, atende, plenamente, ao mínimo estabelecido pela norma NBR 7480 da ABNT que é de 1.08.

A produção de vergalhões através de resfriamento controlado permite uma redução nos custos operacionais, pelo fato de empregar, na composição das barras menores teores de carbonos e de manganês, resultando numa economia nas quantidades dos materiais, tais como o pó de carbono e das ferro-ligas atualmente empregadas, para o ajuste da composição química. Além, disso, este processo proporciona uma maior tolerância na composição química a ser utilizada, devido à flexibilidade proporcionada pelo processo de resfriamento.

## 5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, recomendamos, para o futuro, o desenvolvimento de linhas de pesquisa com os seguintes objetivos:

- Produção de barras retas de vergalhões, com baixos níveis de C.Es, através de resfriamento controlado, nas seguintes bitolas (em mm): 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 25,0 e 32,0;

- Produção de vergalhões com baixos níveis de C.E. e de alta resistência, microligados ou não, em rolos, através de laminação com resfriamento controlado.

- Desenvolvimento de estudos, em relação à soldabilidade, dos vergalhões produzidos a partir de baixos níveis de C.E. e com elevada resistência, através de laminação com resfriamento controlado.

- Desenvolvimento de novos produtos estruturais, como, por exemplo: treliças e tapetes de aço, a partir de aços com composições químicas adequadas à aplicação de processos simplificados de soldagem.

- Aprimoramento de técnicas de metalografia colorida, para a melhoria da identificação das microestruturas formadas nos tratamentos térmicos, promovidos pela laminação de vergalhões, com resfriamento controlado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, A. J. et. al. Otimização das propriedades mecânicas de um aço ARBL através de tratamentos térmicos. São Paulo: **ANAIS DO CONGRESSO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES – IBEROMET IX**, Havana, Cuba, 2006.

ALVES FILHO, Cláudio H. M. **Análise da influência da taxa de resfriamento no gradiente microestrutural de barras laminadas a quente tratadas termicamente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Ciências Exatas de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2004.

ANDRADE, José L. M.; SECCO, Arnaldo M. R. **Emendas com solda: cuidados e procedimentos básicos na confecção de emendas**, Piracicaba, São Paulo, Cia Belgo Mineira, 2007.

ARTURO RUIZ, Aparicio. **Evolution of microstructure in Nb-Bearing microalloyed steels produced by the compact strip production process**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Engenharia) - Universidade Nacional Autônoma do México, 2000.

ARAÚJO, Luiz Antônio. **Manual da siderurgia**. São Paulo, Arte e Ciência, 1997.

ASKELAND, Donald R. **The science and engineering of materials**. Pradeep P. Phule, 4<sup>th</sup> Ed., capítulo 12.[s.d.]

BAPTÍSTA, A. L. B.; SOARES, A. S. Ensaio metalográfico no controle da qualidade. UFF. Rio de Janeiro.[s.d.]

BAPTISTA, A.L.B. et. al. A utilização da metalografia colorida na identificação dos microconstituintes de solda em aço microligado.; 56 CONGRESSO ABM; 2001; 56; Único; 582; 589; 56 CONGRESSO ABM; Belo Horizonte; BRASIL; Português; ; Meio digital; ; Projeto REENGE/PRODINE/PIBIC/UFF: Desenvolvimento e caracterização de materiais para emprego na indústria metalúrgica.

BARINOV, N.; LANDA, A. **Metalurgia y metalografía**. Moscou, MIR.[s.d.]

BATISTA. A. **Desenvolvimento de vergalhões soldáveis e armaduras soldadas no Brasil**. Engenharia civil, 2007. Belo Horizonte. Belgo.

Disponível em: [www.brasilestrogenharia.com.br](http://www.brasilestrogenharia.com.br)

BAYER, John. **Steel bars for automotive applications**, Advanced Materials & Process, Michigan, Jackson, 2003.

BELGO 50 E BELGO 60. Belgo Siderurgia S.A. Belo Horizonte.[s.d]

[http://pcc2339.pcc.usp.br/Arquivos2004/Apostila%20B%C3%A1sica%20CA%20Belgo50\\_60.pdf](http://pcc2339.pcc.usp.br/Arquivos2004/Apostila%20B%C3%A1sica%20CA%20Belgo50_60.pdf)  
acesso em: 28 jun 2007.

BIRO, George T. Steelcrete, **Reinforcing news**, Canadian and American codes for reinforcing bars, rebar material and welding are similar, Steelcrete, Canadá. 2005.

BHADESHIA, H.K.D.H., CAHN, R.W. University of Cambridge, U.K., 1996, **Phase transformations, nondiffusive**, chapter 16, Cambridge, Elsevier Science Publishers, 1996.

BLAIN, Paul. **Laminação e forjamento dos aços**. São Paulo, Associação Brasileira de Metais, 1964.

BORDIGNON, B. et. al. Usos e usuários finais de nióbio. defesa@ net[s.d.]

BRIANT, C.L.; BANERJI, S.K. **Physical metallurgy**. Editado por CAHN, Robert W. e HAASEN, Peter. Elsevier Science. Holanda, 1996. International metallurgy, rev.23, 1978.

CAHN, R. W.; HAASEN, P. **Physical metallurgy**. Fourth, Revised and enhanced edition, Elsevier science B.V. Holanda, 1996.

CALLISTER Jr., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ªed., Rio de Janeiro, LTC, 2002.

CASCUDO, Oswaldo; HELENE, Paulo R. L. **Produção e obtenção de barras e fios de aço para concreto armado**, Boletim Técnico, USP, Departamento de Engenharia de construção civil, São Paulo, 2000.

CHEN, S. J.; TSENG, A. A. Spray and jet cooling in steel rolling. **International Journal Heat and Fluid Flow**, vol. 13, No. 4, December 1992.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**, Volume 2, 2ªed., São Paulo, Makron Books, 1986

CHIAVERINI, Vicente **Aços-carbono e aços-liga** 2º ed., São Paulo, Associação Brasileira de Metais, 1965

COSTA E SILVA, André L. V. da; MEI, Paulo R. **Aços e ligas especiais**. 2ªed., São Paulo, Edgard Blücher, 2006.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO A. D.; SILVA, V. D. Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas. **Sustentabilidade, arquitetura e desenho urbano . Seminário Internacional**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

DANIELI GROUP **Danieli Minimill: a winning concept also for the new millennium**, DaNews, Itália,2004

DEPARTMENT OF BUILDING AND HOUSING, **Report on grade 500E steel reinforcement**. Wellington: New Zealand, 2005.

DONG, Han; SUN, Xinjun; Qingyou, Liu. **Deformation induced ferrite transformation in low carbon steels**. Relatório de pesquisa Central Iron and Steel Research Institute. Beijing [s.d.]

Disponível em :<http://www.sciencedirect.com/science?> Acesso em: 28 jun 2007.

DREWES, J.; E.F. WALKER. **Niobium bearing steels in the automotive industry**. Thyssen Krupp Stahl, Dortmund, Germany.[s.d.]

EGHBALI, B.; ABDOLLAH-ZADEH, A. **The influence of thermomechanical parameters in ferrite grain refinement in a low carbon Nb-microalloyed steel**[s.d.]

Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science?> Acesso em: 28 jun 2007.

EL-BITAR, T. et. al. **Model for prediction of microstructural events during rod hot rolling of austenitic stainless steel**. Canadá, Canadian Institute of mining metallurgy and petroleum. 2002.

EUROPEAN COMMISSION. **Integrated pollution prevention and control (IPPC)reference document on best available techniques in the ferrous metals processing industry**, 2001.

FENG-PUC. **Metalurgia da soldagem**. Departamento de engenharia mecânica. Rio Grande do Sul.[s.d.]

FERRAZ HENRIQUE. Aço na construção Civil; **Revista eletrônica de ciências** [s.d.]

[www.cdcc.sc.usp.br/ciencia/artigos/art\\_22/aco.html](http://www.cdcc.sc.usp.br/ciencia/artigos/art_22/aco.html) - 44k acesso em:01 mar. 2008

FERREIRA, Sérgio Gonçalves. **Ação de incêndio nas estruturas de aço**: Conseqüências e recuperação. São Paulo, 1998.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues. **Aços para concreto armado**, especificações. São Paulo 1998.

GALLEGO Juno; MORALES V. Eduardo; KESTENBACH. H. Jürgen. Estudo quantitativo do endurecimento por precipitação em aços microligados ao vanádio, 57° CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL. São Paulo, 2004.

GALLEGO Juno, KESTENBACH H. Jürgen. Interação entre os mecanismos de endurecimento nos aços microligados. XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DE MATERIAIS. Porto Alegre, 2004.

GARCIA, Amauri. **Solidificação**, São Paulo, Editora da UNICAMP, 2001.

GERDAU, Dados estatísticos, **4° SEMINÁRIO SETORIAL DE MINERAÇÃO E SIDERURGIA**, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2006.

GORNI, Antônio A., SILVEIRA H.D. José. Interação entre as demandas das aplicações e as características e especificações de chapas grossas. 60° CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS - ABM, Belo Horizonte, 2005.

GORNI, Antônio A. et. al. Desenvolvimento de aços alternativos aos materiais temperados e revenidos com limite de resistência de 600 a 800 MPa. 54° CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. São Paulo, 1999.

GORNI, Antônio A.; VALLIN, Pedro S. da Silva. Efeito da composição química na resistência à deformação a quente de aços de baixo carbono, 59° CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, São Paulo, ABM, 2004.

GORNI, Antônio A.; CAVALCANTI, Celso G. Efeito dos elementos de liga sobre a resistência à deformação a quente de aços ao carbono e microligados, 2º CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, São Paulo, ABM, 2004.

GORNI, Antônio A. et al. Efeito da temperatura de acabamento na microestrutura e propriedades mecânicas de chapas grossas de aço microligado, 59º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, São Paulo, ABM, 2004

GORNI, Antônio A.; VALLIN, Pedro S. da Silva. Efeito da recristalização dinâmica na resistência à deformação de aços processados no laminador de tiras a quente, 40º SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO - PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, Vitória, ABM, 2003.

GORNI, Antônio A. Modelamento matemático da laminação: de ficção científica a ferramenta para a capacitação industrial, 60º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, Belo Horizonte, ABM, 2005.

GORNI, Antônio A.; GORNI, Regina Z. Uso de simulações matemáticas de processos no ensino de engenharia de materiais, 3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND COMPUTER, EDUCATION, São Paulo, ICECE, 2003.

GORNI, Antônio A. **Steel forming and heat treating handbook**, 2007.

GUY, Albert. **Physical metallurgy for engineers**. Ed. 2ª Addison Wesley publishing company, Tokyo, 1966.

HASHIMOTO Shunichi, NAKAMURA Morifumi. **Effects of microalloying elements on mechanical properties of reinforcing bars**, Japão, ISIJ international, vol.46, 2006.

HUTCHISON, T.S.; Baird, D.C. **The physics of engineering solids**. John Wiley. 2ªed. New York 1968.

INFOMET, **GAZETA MERCANTIL**, 29 de Jan. 2008.

KOMATSU, A., **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 2008.

KORCHYNSKY, M. **A new role for microalloyed steel – adding economic value**. Pennsylvania. U.S. Vanadium Corporation., 2001.

KOU, S. **Welding Metallurgy**, 2ªed. Wiscconsin. A John Wiley & Sons, Inc., publication. New Jersey.[s.d.]

KUC, D.; Niewelski, G.; Cwajana, J. **Influence of deformation parameters and initial grain size on the microstructure of austenitic steels after hot-working processes**. Elsevier. Poland. 2005.

LAMBDA, Maxwell. **Cálculo das frações transformadas por processos de difusão**. PUC, Rio de Janeiro.[s.d.]

[www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-)

LAKHTIN, Y. **Engineering physical metallurgy**, 2ª Ed. MIR, Moscou. [s.d.]

LANDI, Francisco Romeu et al. **Projeto de edifícios e comportamento dos materiais com relação à incêndio**. São Paulo, 1977.

LIBERTO, R. C. N. **Vida em fadiga de aços carbono com estrutura bifásica ferrita-martensita**, Relatório Final, LabMat, FEI, FCA, 2001.

MACAU, Decreto Lei, **Norma de aço para armaduras ordinárias**, Imprensa Oficial.1996.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2005.

MEFOS - METALLURGICAL RESEARCH INSTITUTE AB, Suécia, 2008.

MEYRICK, G. **Physical metallurgy of steel**. MSE Department. Ohio University, 2001.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos aços transformáveis**, 2004. 71f. Trabalho acadêmico – Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais. Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, 2006.

MORALES, R. D.; LOPEZ, A. G.; OLIVARES, I. M. **Heat transfer analisys during water spray cooling of steel rods**. ISIJ International. Departmentof Metallurgy, Instituto Politécnico Nacional, Puebla, México, 1989.

NAGASAKA, Y.; et. al. **Mathematical model of phase transformations and elastoplastic stress in the water quenching of steel bars**. Metallurgy transactions, 1993.

NETO S. V. Otávio, BALANCIN Oscar. **Deformação a morno no campo subcrítico e refino de grão de um aço 0,16C**. Proceed. CONAMET/SAM, 2004.

NEVES . O Frederico, REGONE, Wiliam, BUTTON, T. Sérgio Análise numérica do comportamento termomecânico e estrutural de um aço microligado ao V-Ti em processo análogo ao forjamento a quente VI CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO (XXII SENAFOR), 2002.

ONE STEEL REINFORCING, **Application of 500plus reinforcing bars supplied by one steel reinforcing** pty limited. Austrália, 2003.

ONE STEEL REINFORCING, **Rebar Solutions, Reiventing reinforcing**, Austrália 2003.

PADILHA, Fernando A.; SICILIANO, Júnior. F., **Encruamento, recristalização, crescimento de grãos e textura**. São Paulo, Editora ABM, 2005.

PATEL, Jiteandra; KLINKENBERG, Christian ; HULKA, Klaus. **Hot rolled hsla strip steels for automotive and construction applications**, Niobium Products Company GmbH. Düsseldorf, Germany.[s.d.]

PETRUCCI, Eladio Gerardo Requião. **Materiais de construção**. 3ª ed. Editora Globo. Porto Alegre , 1978.

PFEIL, Walter. **Estruturas de aço: Propriedades – Métodos de cálculo – ligações – esforços normais**. Volume 1, 5ª ed., Rio de Janeiro, Interciência, 1992.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. 2006. 191f. Monografia (Especialização em Avaliação e Perícia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2006.

RAYTEK. **Operator's Manual Raynger 3i Series**.1ª ed. Brasil. 1997.

REID CONSTRUCTION SYSTEMS, **Reinforcing features and benefits**, New Zealand, 2005.

ROTHER, H. **Temperature controlled rolling of wire rod and bar**. Alemanha, 2005.

SAHA. Jayanta, SINGH. R.K.P. **Steel long products - expectations of construction sector**, Kolkata, IIM Metal News, volume 9, Índia, 2006.

SANTINE, Carlos Roberto. **Projeto de construção de lajes pré-moldadas de concreto armado**, 2006. 146f. Dissertação (Mestrado em construção civil – área de concentração: Sistemas Construtivos de Edificações) - Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, 2005.

SANTOS, Rezende G. **Transformações de fases em materiais metálicos**, 1ª ed. Editora UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2006.

SHACKELFORD, James F. **Introduction to materials science for engineers**,6ªed., New Jersey, Pearson Prentice Hall, 2004.

SICILIANO, Fulvio; MARINI, Osvaldo; BRUNA, Roberto G. **The effect of chemical composition on the hot-deformation resistance during hot strip rolling of microalloyed steels processed at the Sidor hot strip mill**, 2005.

SILVA, A. L.V. da Costa; MEI, Paulo R. **Aços e ligas especiais**, São Paulo, 1ª Ed. Edgar Blücher, 2006.

SMITH, William F. **Princípios de ciência e engenharia dos materiais**, Lisboa, 3ªed., Mcgraw-Hill, 1998.

SONG, R. et. al. **Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels**. Department of metallurgy and materials engineering, Colorado school of mines, golden, co 80401, USA. [s .d.]

SUN Xinjun, LIU Qingyou, DONG Han. **Deformation induced ferrite transformation and grain refinement in low carbon steel.** Beijing, China.

[www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2005/LINK/35.pdf](http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2005/LINK/35.pdf)

acesso em :01 out.2007

TAMM, 2003.

TEPCORE - Centre de Recherches Metallurgiques (C.R.M. – Liege, Bélgica, 1975)

THERMEX from H&K Thermex500 bars for seismic zones[s. d.]

THERMEX Quenching Technology Hennigsdorfer Stahl Engineering, Alemanha.[s.d.]

VLACK, V. Lawrence H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais.** Rio de Janeiro, Elsevier, 1984.

V FRAINER. **Diagrama de equilíbrio ferro-carbono** [s.d.]

[www2.furg.br/.../Vitor/Aula/Transparencias/Diagramas%20de%20Equilibrio/Diagramas%20de%20Equilibrio1.pdf](http://www2.furg.br/.../Vitor/Aula/Transparencias/Diagramas%20de%20Equilibrio/Diagramas%20de%20Equilibrio1.pdf) -

acesso em:01 mar.2008

VILLAR, O. e BALANCIN, O. Efeito da precipitação de cementita na formação de contornos de alto ângulo e refino de grão ferrítico em aço baixo carbono **Acta Microscopica.** São Paulo. Departamento de Engenharia e Materiais de São Carlos. Vol. 16, No. 1–2, 2007,

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION **Process for the production of grain oriented electrical steel strips**[s.d.]

[www.patentoffice.nic.in/.../journal\\_archieve/journal\\_2006/pat\\_arch\\_062006/official\\_journal\\_02062006.pdf](http://www.patentoffice.nic.in/.../journal_archieve/journal_2006/pat_arch_062006/official_journal_02062006.pdf) acesso em:13 fev.2008

## NORMAS TÉCNICAS UTILIZADAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NM 146-1: Materiais metálicos – dureza Rockwell– parte 1: Medição da dureza Rockwell (escalas A,B,C,D,E,F,G,H e K) e Rockwell superficial (escalas 15N, 30N, 45N, 15T, 30T e 45T)**. Rio de Janeiro, 2002.

**Objetivo:** Esta norma mercosul especifica o método para determinação de dureza Rockwell e Rockwell superficial para materiais metálicos.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN, **NM 188-1:99 Materiais metálicos dureza Vickers**. Montevideú, 1999.

**Objetivo:** Esta norma especifica o método de medição da dureza Vickers para as três diferentes faixas de força de medição para materiais metálicos.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN, **NM 259: Aço – Determinação da temperabilidade (Jominy)**. Montevideú, 2001.

**Objetivo:** Esta norma estabelece o método de determinação da temperabilidade do aço, por tempera na extremidade (ensaio Jominy).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6023: Informação e documentação – referência – elaboração**. Rio de Janeiro, 2002.

**Objetivo:** Esta norma fixa a ordem dos elementos das referências e estabelece convenções para transcrição e apresentação da informação originada do documento e/ou outras fontes de informação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6024: Informação e documentação – numeração progressiva das seções de um documento escrito – apresentação elaboração**. Rio de Janeiro, 2003.

**Objetivo:** Esta norma estabelece um sistema de numeração progressiva das seções de documentos escritos, de modo a expor numa seqüência lógica o inter-relacionamento da matéria e a permitir sua localização.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.

**Objetivo:** Esta norma fixa os requisitos básicos exigíveis para projetos de estrutura de concreto simples, armado e protendido, excluídas aquelas em que se empregam concreto leve, pesado ou especiais.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6153: Produtos metálicos – ensaio de dobramento semi-guiado**. Rio de Janeiro, 1988.

**Objetivo:** Esta norma prescreve o método para o ensaio de dobramento semi-guiado, de produtos metálicos. Aplica-se a todos os produtos planos ou não, com espessura ou diâmetro igual ou superior a 0,2 mm.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6215: Produtos siderúrgicos – terminologia – apresentação elaboração.** Rio de Janeiro, 1986.

**Objetivo:** Esta norma define os termos aplicáveis aos produtos siderúrgicos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6339: Aço – Determinação da temperabilidade (Jominy) – método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1989.

**Objetivo:** Esta norma prescreve o método de determinação da temperabilidade do aço, pelo ensaio Jominy.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT/NBR/NM/ISO 6507-1: Materiais metálicos – ensaio de Dureza Vickers parte 1: métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2008.

**Escopo:** Esta parte da NMISO 6507, especifica o método de ensaio de dureza Vickers para as três faixas de força de ensaio para materiais metálicos. O ensaio de dureza Vickers é especificado nesta parte da NMISO 6507 para comprimento da diagonais da impressão entre 0,020mm e 1,400mm.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR ISO 6892: Materiais metálicos - ensaio de tração à temperatura ambiente.** Rio de Janeiro, 2002.

**Objetivo:** Esta norma especifica o método de ensaio de tração em materiais metálicos e define as propriedades mecânicas que podem ser determinadas à temperatura ambiente.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO 7438: Metallic materials – bend test – apresentação elaboração.** Genebra, Suíça, 2005.

**Objetivo:** This International Standard specifies a method for determining the ability of metallic material to undergo plastic deformation in bending.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7477: Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado.** Rio de Janeiro, 1982.

**Objetivo:** Esta norma prescreve os procedimentos necessários para a determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – especificação.** Rio de Janeiro, 2008.

**Escopo:** Esta norma estabelece os requisitos exigidos para encomenda, fabricação e fornecimento de barras e fios de aço destinados a armaduras para estrutura de concreto armado, com ou sem revestimento superficial.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7481: Tela de aço soldada - armadura para concreto - especificação**. Rio de Janeiro, 1990.

**Objetivo:** Esta norma fixa as condições exigíveis pra encomenda, fabricação e fornecimento de telas de aço soldadas, destinadas a armadura para concreto e tubos de concreto.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM – ISO 7500-1: Materiais metálicos - calibração de ensaio estático uniaxial – parte 1: máquinas de ensaio de tração/compressão - calibração do sistema de medição da força – elaboração**. Rio de Janeiro, 2002.

**Objetivo:** Esta norma especifica a calibração da máquina de ensaio à tração/compressão.

A calibração consiste em:

- inspeção geral da máquina de ensaio incluindo seus acessórios para aplicação de força;
- calibração do sistema de medição da força.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8548: Barras de aço destinadas a armaduras para concreto armado com emenda mecânica ou por solda determinação de resistência à tração – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1984.

**Objetivo:** Esta norma prescreve o método de determinação da resistência à tração em barras de aços destinadas a armadura para concreto armado, com emenda mecânica ou por solda.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8965: Barras de aço CA-42 S com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado**. Rio de Janeiro, 1985.

**Objetivo:** Esta norma fixa as condições exigíveis para encomenda, fabricação e fornecimento de barras de aço CA-42 S laminadas a quente, com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado. Esta norma não se aplica a barras obtidas por deformação a frio.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9062: Projetos e execução de estruturas de concreto pré-moldado – apresentação elaboração**. Rio de Janeiro, 2006.

**Objetivo:** Esta norma estabelece os requisitos exigíveis para o projeto, execução e controle de estruturas pré-moldadas de concreto armado ou protendido, excluídas aquelas em que se empreguem concreto leve ou outros especiais.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 11919: Verificação de emendas metálicas de barras para concreto armado**, Rio de Janeiro, 1978.

**Objetivo:** Prescreve método para ensaiar barras emendadas para concreto armado.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 14147: Aço – Determinação e verificação da profundidade de endurecimento por têmpera superficial - apresentação elaboração**. Rio de Janeiro, 1988.

**Objetivo:** Esta norma prescreve o método para a determinação e verificação da profundidade de endurecimento por têmpera superficial.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 14724: Informação e documentação – trabalhos acadêmicos – apresentação.** Rio de Janeiro, 2005

**Objetivo:** Esta norma especifica os princípios gerais para a elaboração de trabalhos acadêmicos (teses, dissertações e outros), visando sua apresentação à instituição (banca, comissão examinadora de professores, especialistas designados e/ou outros).

Esta norma aplica-se, no que couber, aos trabalhos intra e extraclasse da graduação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 14862: Armaduras treliçadas eletrossoldadas – requisitos.** Rio de Janeiro, 2002.

**Objetivo:** Esta norma fixa os requisitos para especificação, fabricação, fornecimento e recebimento de armaduras treliçadas eletrossoldadas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – procedimento.** Rio de Janeiro, 2004.

**Objetivo:** Esta norma estabelece os requisitos gerais para a execução de estruturas de concreto. Em particular, esta norma define requisitos detalhados para a execução de obras de concreto, cujos projetos foram elaborados de acordo com a ABNT NBR 6118.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15200: Projeto de estrutura de concreto em situação de incêndio.** Rio de Janeiro, 2004.

**Objetivo:** Esta norma estabelece os critérios de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio e a forma de demonstrar o seu atendimento.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismos – procedimento.** Rio de Janeiro, 2006.

**Objetivo:** Esta norma fixa os requisitos exigíveis para verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil relativamente às ações de sismos e os critérios de quantificação destas ações e das resistências a serem consideradas no projeto das estruturas de edificações, relativamente a estas ações, quaisquer que sejam sua classe e destino, salvo caso previsto em Normas Brasileiras específicas.

INTERNATIONAL STANDARD ISO (The International Organization for Standardization) **15630: Aço para armadura e concreto protendido – métodos de testes**

**Objetivo:** Especifica os métodos de testes aplicáveis a barra, fio-máquina e arames para concreto.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)