

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL DO AÇO DIN 20NICRMO8 MOD¹

*Felipe Scherrer Escarabelin²
Mirian de Lourdes Noronha Mota Melo³*

Resumo

Este trabalho visa estudar a influência da taxa de resfriamento na formação da microestrutura do aço DIN 20NiCrMo8 MOD após conformação a quente. As propriedades dos aços podem ser modificadas através de diferentes tratamentos térmicos. No entanto a elevada temperabilidade do aço em estudo gera dificuldades técnicas na obtenção de algumas microestruturas diretamente do resfriamento. Foram testadas varias taxas de resfriamento e avaliadas as microestruturas resultantes em cada uma delas, estas microestruturas terão papel fundamental no desempenho de processos posteriores ao forjamento, como por exemplo, usinagem. Este trabalho demonstrou forte correlação com a microestrutura e a taxa de resfriamento. As taxas obtidas nos processos de resfriamento variaram entre 34 °C/s a 0,22 °C/s, e as microestruturas obtidas foram martensita com a taxa de 34°C/s, microestrutura bainita com a taxa de 0,83°C/s e microestrutura perlita + ferrita com a taxa de 0,22C°/s.

Palavras-chave: Microestrutura; Taxa de resfriamento; Conformação a quente.

USE OF THE TORSIONAL ASSAY HOT AND THE NUMERICAL SIMULATION FOR FORECAST OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL DIN 16MNCR5 MOD

Abstract

The lab assays frequently are used for the forecast of the mechanical properties of steel due the difficulty to use industrial equipment of high cost of acquisition, operation and maintenance. Lab assays are capable shape some local conditions, but they are incapable to describe the process as a whole. In industrial processes, the metallic alloys are always submitted to complex combination of temperature, time, strain and strain rate, which makes experimental inquiry of the influence of all changeable variables expensive and slow. The difficulty increases when the strain rate is more than, for example above of 80 s⁻¹. This work intends to demonstrate the use of lab assays, numerical simulation and empirical calculations to foresee the mechanical properties of steel DIN 16MnCr5 MOD with the use of commercial software MSC.Superform in industrial hot formed process and strain rate up to 90 s⁻¹.

Key words: Simulation; Hot formed; Mechanical properties; High strain rate; Industrial process.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico da Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda. Graduado em engenharia mecânica com ênfase automação e sistemas pela Universidade São Francisco.*

³ *Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade São Francisco; Doutora em Engenharia Mecânica com ênfase em Materiais Processos pela UNICAMP.*

INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas dos aços podem ser modificadas através de diversos fatores tais como composição química tamanho de grão austenítico, taxa de resfriamento, tratamento térmico, entre outros. Para muitas situações obter a microestrutura bainita ou perlita com ferrita é muito desejável.

Este trabalho consiste em verificar a influência da taxa de resfriamento na formação da microestrutura após o processo de conformação a quente do aço DIN 20NiCrMo8 MOD. Foram obtidas várias nas taxas de resfriamento, de modo a obter as microestruturas desejadas.

No entanto a elevada temperabilidade do aço DIN 20NiCrMo8 MOD. gera dificuldades técnicas na obtenção de algumas microestruturas diretamente do resfriamento das peças após conformação a quente.

O diagrama de equilíbrio ferro-carbono é sempre o ponto de partida para o estudo da constituição e estrutura de qualquer aço. Muitas das características principais do sistema ferro-carbono, Figura 1, influenciam o comportamento dos aços. A transformação ferro $\gamma \Rightarrow$ ferro α ocorre através de uma reação eutetóide que desempenha um papel preponderante nos tratamentos térmicos. A temperatura eutetóide é 723°C e a composição eutetóide é de 0,8% C.⁽¹⁾

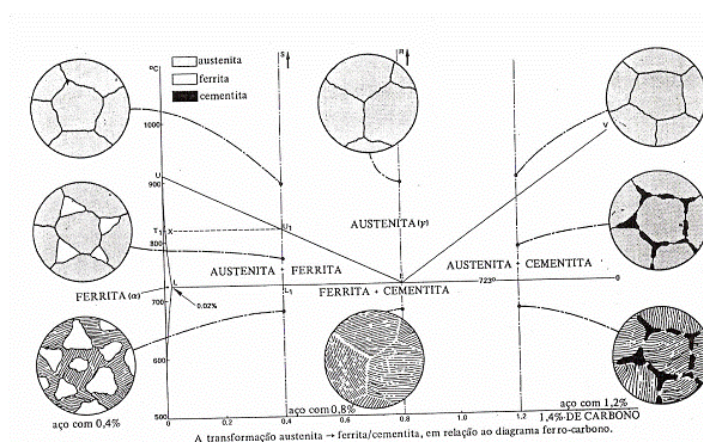


Figura 1 – Transformação Austenita em relação ao diagrama ferro-carbono (1)

É o constituinte formado por finas lamelas justapostas de ferrita e de cementita e que ocorre abaixo de 723°C nas ligas ferro-carbono. A espessura das lamelas é, em geral, da ordem de alguns décimos de micron e habitualmente só são visíveis com ampliação de mais de 200 vezes (Figura 2). As lamelas são mais ou menos paralelas podendo ser planas, curvas, ondeadas etc.⁽²⁾

Supõe-se que os átomos de carbono se aglomeram, formando um núcleo de cementita Figura 03. À medida que esses núcleos crescem para dentro dos grãos de austenita, esta fase torna-se menos rica em carbono. Com a formação destas camadas de ferrita, aumenta a concentração de carbono nas proximidades, possibilitando assim o surgimento de novos núcleos de cementita. Nestas condições, formam-se os grãos de perlita, consistindo de camadas alternadas de ferrita e cementita.⁽³⁾

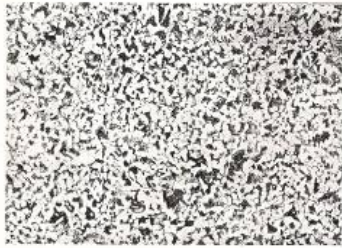


Figura 2 – Microestrutura perlita + ferrita de um aço com aproximadamente 0,8% de Carbono resfriado Lentamente. ⁽¹⁾

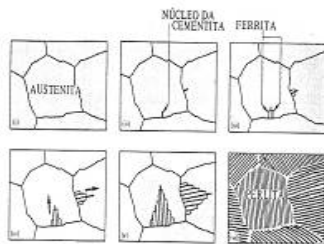


Figura 3 – Nucleação e crescimento da perlita neste caso, considera-se que o aço contém 0,8% de Carbono. ⁽³⁾

A velocidade de resfriamento requerida depende muito dos elementos de liga presentes no aço, sendo, em geral, tanto mais baixas quanto maior for a concentração total desses elementos. A reação martensítica é facilmente identificada pelo seu aspecto no microscópio ótico. Com um caráter cristalográfico evidente Figura 4. As ripas têm um plano de hábito bem definido (Figura 5) e ocorrem geralmente em diversas variantes desse plano, dentro da cada grão. A martensita é uma solução sólida supersaturada de carbono no ferro e tem uma estrutura tetragonal de corpo centrado (T.C.C.) (Figura 6), que é uma forma distorcida do ferro cúbico de corpo centrado (C.C.C.). ⁽¹⁾

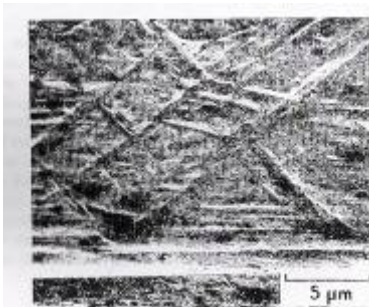


Figura 4 - Microestrutura martensita num aço com 4Ni 0,4C, com aumento de 3400x ⁽¹⁾

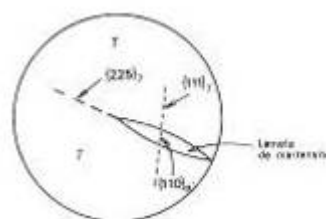


Figura 5 - Representação esquemática da cristalográfica típica duma lamela de martensita ⁽¹⁾

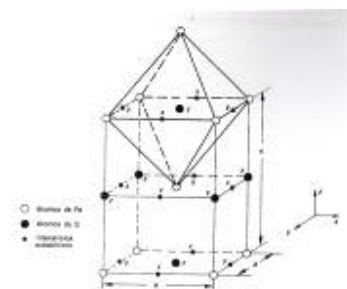


Figura 6 - Estrutura tetragonal de corpo centrado da martensita ⁽¹⁾

Se a transformação isotérmica ocorrer a uma temperatura inferior à do joelho da curva TTT, não se obtém perlita. Ao invés de se obter uma estrutura lamelar, a cementita fica finamente dispersa na matriz de ferrita, formando a microestrutura conhecida como bainita. ⁽⁴⁾

A natureza da bainita modifica-se à medida que diminui a temperatura de transformação. É costume distinguir duas formas principais: bainita superior e bainita inferior. Usando a técnica de microscopia ótica de duas superfícies é possível concluir claramente que, na bainita superior, a ferrita aparece em grupos de ripas finas e paralelas, com um hábito cristalográfico bem definido. ⁽¹⁾

Nos aços carbono é por vezes difícil separar a reação bainítica das reações ferrítica e perlítica, já que estas fases podem formar em condições próximas das que conduzem a bainita. Assim a curva TTT de um aço com 0,8%C é uma curva contínua, embora ocorra ambas as reações, de formação da perlita e da bainita. A Figura 7 mostra um destes diagramas TTT mais complexos, para um aço com 3% Cr-0,5C; pode verificar-se a separação, muito nítida, das reações perlítica e bainítica e a inter-relação entre a transformação bainítica e a temperatura M_s .⁽¹⁾

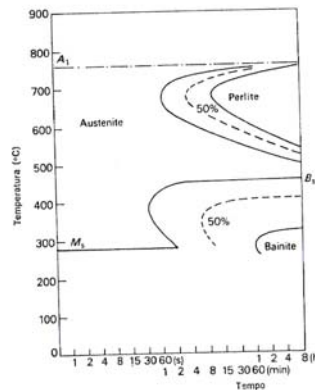


Figura 7 - Diagrama TTT para um aço com 3% de Cr 0,5C ⁽¹⁾

Os aços ligados são aços com adição de um ou mais elementos de liga, tais como, Níquel, Cromo, Molibdênio, Titânio, Vanádio, Boro, Chumbo, etc. As adições destes elementos conferem ao aço, em cada caso, propriedades mecânicas e físicas especialmente melhoradas, como resistência ao desgaste, resistência à corrosão, temperabilidade, ductilidade, tenacidade.⁽⁵⁾

Segue abaixo descrição dos elementos de liga mais comuns:

- **Cromo (Cr):** O cromo estimula a formação de carbonetos, aumentando a resistência ao desgaste, bem como a temperabilidade aos aços, reduz a velocidade crítica de resfriamento, de modo que a têmpera de aços com teores elevados de cromo seja feita preferencialmente em óleo ou ar. A adição de cromo torna mais fina a granulação dos aços, aumentando desse modo a sua resistência.

- **Molibdênio (Mo):** Influência favoravelmente a dureza, a resistência a quente, a fluência e a temperatura de crescimento de grão de austenita, além de melhorar a penetração da têmpera nos aços. É largamente empregado nos aços de construção mecânica para beneficiamento, pois forma partículas resistentes a abrasão e evita a fragilidade de revenimento. O molibdênio não é empregado sozinho, pois apresenta uma tendência de diminuir a tenacidade dos aços.

- **Níquel (Ni):** Diminui a velocidade crítica de resfriamento produzindo ótima penetração de têmpera. Possui a capacidade de tornar austeníticas as ligas Fe-Cr de alto teor de cromo. Influi diretamente na granulação, tornado-a mais fina, o que aumenta a tenacidade dos aços ferrítico-perlíticos e a resistência dos aços recozidos.

- **Vanádio (V):** Eleva a temperatura de crescimento do grão da austenita, promovendo o refino de grão. É excelente desoxidante. A adição de vanádio confere aos aços uma insensibilidade ao super-aquecimento, melhorando suas características de forjamento e usinagem. O emprego de teores elevados de vanádio deve ser acompanhado por um aumento do teor de carbono, devido à formação de carbonetos.⁽⁵⁾

O método mais comum de se alterar microestruturas é através dos vários tratamentos térmicos, cada qual destinado a produzir uma estrutura específica, conforme exemplos na Tabela 1.

Tabela 1– Representa os tipos de tratamento térmico, sua finalidade exemplos onde devemos utilizar e procedimento de utilização. ⁽⁴⁾

Tratamento	Exemplo	Finalidade	Procedimento
Recozimento	Metais trabalhados a Frio	Remover o encruamento e aumentar a ductilidade	Aquecer acima da temperatura de recristalização.
	Aço	Amolecer	Aquecer 30°C acima da temperatura máxima de estabilidade da ferrita e resfriar lentamente no forno.
Normalização	Aço	Homogeneização e alívio de tensões	Aquecer 60°C dentro do campo austenítico e resfriar ao ar.
Recozimento Subcrítico	Aço baixo carbono	Remover o encruamento e aumentar a ductilidade	Aquecer por um período curto, a uma temperatura logo abaixo da eutetóide.
Coalescimento	Aço alto carbono	Amolecer e Aumentar a Tenacidade	Aquecer por um tempo suficientemente longo, logo abaixo da temperatura eutetóide, a fim de coalescer os carbetos.
Têmpera	Aço	Endurecer	Resfriar bruscamente do campo austenítico para o martensítico (é seguido pelo revenido)
Revenido	Aço temperado	Aumentar a Tenacidade	Temperar. Aquecer em temperatura alta durante um período curto ou em temperatura baixa para começar a reação $M \rightarrow \alpha + \text{cementita}$.
Austêmpera	Aço	Endurecer sem formação de martensita frágil	Temperar do campo austenítico até uma temperatura abaixo do “joelho” da curva TTT mas, acima da de formação de martensita. Manter nessa temperatura até que a formação de bainita se complete.
Martempera (tempera interrompida)	Aço	Endurecer sem formação de trincas de têmpera	Temperar do campo austenítico até uma temperatura abaixo do “joelho” da curva TTT mas acima da de formação de martensita. Manter ai até homogenizar a temperatura. Resfriar lentamente até martensita. (É seguido pelo revenido)

Forjamento é o processo de conformação através do qual se obtém a forma desejada da peça por martelamento ou aplicação gradativa de uma pressão. Através da deformação plástica produzida pelo forjamento, podem-se conseguir dois efeitos: dar forma desejada à peça e melhorar as propriedades mecânicas do metal. ⁽⁶⁾

O forjamento pode ser definido em duas maneiras forjamento em matriz aberta Figura 8a ou forjamento livre e forjamento em matriz fechada Figura 9b. ⁽⁶⁾

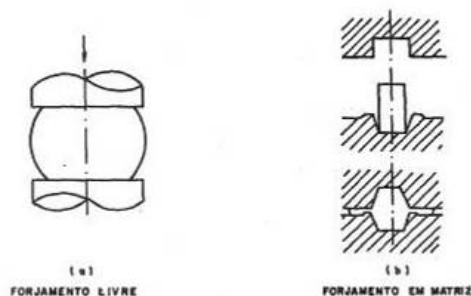


Figura 9 – (a) Forjamento Livre, (b) Forjamento em matriz fechada (6)

MATERIAIS E MÉTODOS

O aço empregado é o DIN 20NiCrMo8 MOD, cuja composição química segue na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química.

C	Si	Mn	P (máx)	S (máx)	Cr	Mo	Ni	Al
0,2103	0,0871	0,6920	0,0184	0,0257	0,8040	0,3670	1,8630	0,0266

A barra de aço foi aquecida a 1200°C aproximadamente através de aquecimento por indução magnética.

Foi forjado para uma geometria qualquer e resfriado conforme figura 10.

- Resfriamento:

As peças após conformação foram mergulhadas no meio de resfriamento escolhido e, foi cronometrado o tempo que a peça levou para atingir a temperatura ambiente.

Para conformação foi utilizada um prensa horizontal industrial que fornece 90s⁻¹ de taxa de deformação, localizada na planta da Neumayer Tekfor Automotive do Brasil (NTA)⁷ em Jundiaí-SP.

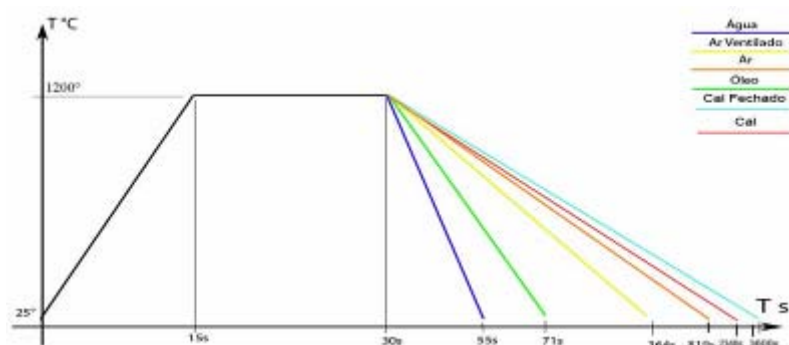


Figura 10 – Gráfico Temperatura/Tempo resfriamento das peças após conformação a Quente

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 mostra as taxas de resfriamento de cada meio utilizado.

Tabela 3 – Taxas de resfriamento

Meio de Resfriamento	Temperatura	Temperatura	Tempo de Resfriamento (s)	°C/s
	°C Inicial	°C Final		
Água	880	25	25	34,20
Óleo	880	60	41	20,00
Ar Ventilado	860	267	334	1,78
Ar (Ambiente)	902	250	789	0,83
Cal	980	180	2340	0,40
Cal Abafado	980	180	3600	0,22

Nas figuras abaixo estão demonstrando os resultados obtidos nos diversos meios de resfriamento.

Com o resfriamento em água reproduzimos 100% a microestrutura martensita após conformação a quente, Figura 11.



Figura 11 - Amostra resfriada em água após o forjamento.

Com o resfriamento em óleo reproduzimos 100% a microestrutura martensita após a conformação a quente, Figura 12.

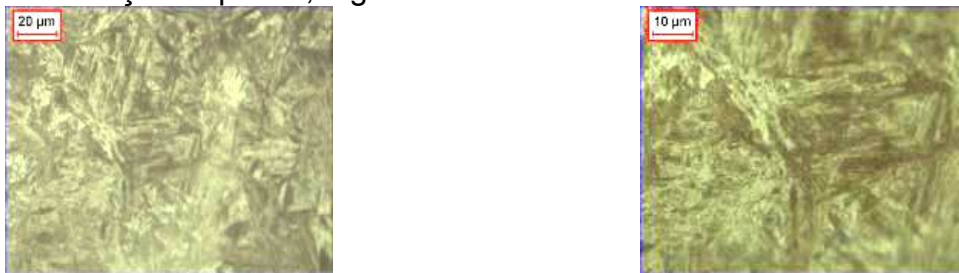


Figura 12 - Amostra resfriada em óleo após o forjamento

Com o resfriamento em ar ventilado reproduzimos a microestrutura bainita + martensita aproximadamente 25% de martensita e 75% de bainita, Figura 13.



Figura 13 - Amostra resfriada em ar ventilado após o forjamento.

Com o resfriamento em ar reproduzimos a microestrutura bainita + martensita aproximadamente 2% de martensita e 98% de bainita após conformação a quente, Figura 14.

Das três amostras que realizamos este tipo de resfriamento foram encontradas vestígios de microestrutura martensita. Com este resfriamento conseguimos reproduzir uma das microestruturas requerida.



Figura 14 - Amostra resfriada em ar após o forjamento

Com o resfriamento em cal aberto reproduzimos a microestrutura perlita + ferrita + bainita aproximadamente 10% de bainita e 90% de perlita + ferrita após conformação a quente, Figura 15.

Das três amostras que realizamos este tipo de resfriamento foram encontradas vestígios de microestrutura bainita.



Figura 15 - Amostra resfriada em cal após o forjamento

Com o resfriamento em cal fechado reproduzimos a microestrutura perlita + ferrita + bainita aproximadamente 3% de bainita e 97% de perlita + ferrita após conformação a quente, Figura 16.

Das três amostras que realizamos este tipo de resfriamento foram encontradas vestígios de microestrutura bainita. Com este resfriamento conseguimos reproduzir uma das microestruturas requerida.



Figura 16 - Amostra resfriada em cal fechado após o forjamento

A Tabela 4 apresenta os resultados de dureza para cada meio de resfriamento utilizado. Demonstrando que a dureza aumenta com a taxa de resfriamento imposta pelo meio utilizado para o resfriamento.

Tabela 4. Resultado da média das durezas para cada resfriamento utilizado.

Meio de Resfriamento	Dureza \bar{X} Hv	Desvio Padrão
Água	483,8	13,6
Óleo	458,9	14,8
Ar Ventilado	308,9	11,1
Ar	290,0	11,5
Cal	280,0	6,7
Cal Fechado	282,6	7,8

O gráfico conforme Figura 17, demonstra as microestruturas através das variações das taxas de resfriamento e respectivamente a dureza encontrada.

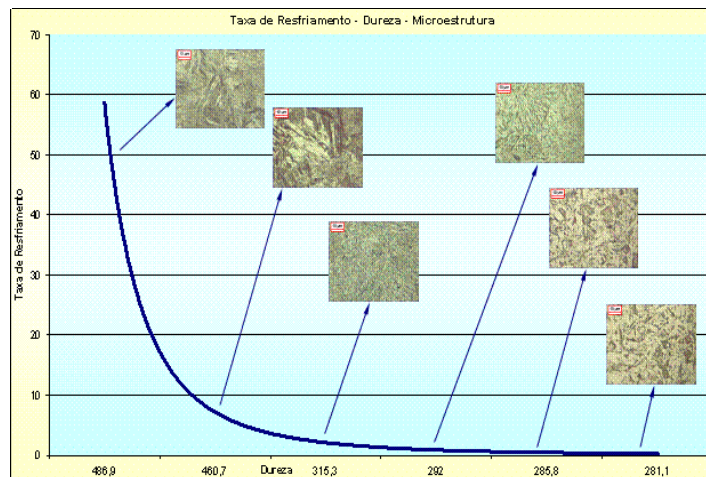


Figura 17 – Correlação da taxa de resfriamento, microestrutura e dureza

CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou forte correlação entre a microestrutura e a taxa de resfriamento após conformação a quente para o aço DIN 20NiCrMo8 MOD.. As taxas obtidas nos processos de resfriamento variam entre 34 °C/s (resfriamento em água) a 0,22 °C/s (resfriamento em cal fechado).

As microestruturas obtidas foram:

- Microestrutura Martensita com a taxa de 34°C/s resfriamento em água
- Microestrutura Martensita com a taxa de 20°C/s resfriamento em óleo

- Microestrutura Bainita + Martensita com a taxa de 1,78°C/s resfriamento com ar ventilado (ventilador)
- Microestrutura Bainita com a taxa de 0,83°C/s resfriamento ao ar
- Microestrutura Perlita + Ferrita + Bainita com a Taxa de 0,40C°/s resfriamento em cal aberto
- Microestrutura Perlita + Ferrita com a Taxa de 0,22C°/s resfriamento em cal fechado

Analisando a correlação da curva fornecida pelo fabricante do aço conseguimos verificar algumas divergências em aproximadamente 10% das microestruturas encontradas.

Agradecimento

A Neumayer pela disponibilidade de ensaios no Laboratório Metalográfico, especialmente aos: Engenheiro Fabio Petrilli e ao Técnico Valter Souza.

REFERÊNCIAS

- 1 HONEYCOMBE, R.W.K., Aços Microestrutura e Propriedades, Fundação Calourte Gulbenkain, 1982
- 2 COLPAERT, Humbertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns, Edgard Blücher, 3º edição, 1974
- 3 HIGGINS, R.A., Propriedades e Estruturas dos Materiais em Engenharia, DIFEL, 1982
- 4 VANVLACK, Lawrence H. Princípios de Ciências do Materiais, 9º Edição, Edgard Blücher, 1990
- 5 BRASIMET – Disponível em <<http://www.brasimet.com.br/artigos/SERIADAS.pdf>> Acesso em 29, outubro de 2006
- 6 BRESCIANI, Filho Ettore, Conformação Plástica dos Metais, 5º Edição, UNICAMP, 1997
- 7 NTA - NEUMAYER-TEKFOR - Disponível em: < <http://www.neumayer-tekfor.com.br> >. Acesso em 10 de janeiro de 2007.