



# ANÁLISE DE FALHA DE CHUMBADORES DE PRÉ-CONCRETAGEM<sup>1</sup>

*Maria Cristina Adami Gatti*<sup>2</sup>

*Omar Maluf*<sup>3</sup>

*Marcelo Tadeu Milan*<sup>4</sup>

*Antonio Alberto da Cunha Montefeltro*<sup>5</sup>

*José Carlos Fontes Barata*<sup>6</sup>

*José Ricardo Tarpani*<sup>7</sup>

## Resumo

Chumbadores de pré-concretagem em aço ASTM A36 dobrados a quente e a frio fraturaram durante a fabricação e montagem do componente. Determinou-se que os chumbadores falharam devido a uma sinergia entre o alto nível de encruamento do material, presença de tensões residuais trativas e fragilização causada pelo envelhecimento por deformação durante e após a operação de dobramento das barras cilíndricas originais. Recomendou-se dobrar as barras a frio e realizar um tratamento térmico de normalização para recristalizar a microestrutura e, conseqüentemente, reduzir a densidade de discordâncias e aliviar possíveis tensões residuais da peça final.

**Palavras-chave:** Análise de falha; Chumbadores; Envelhecimento por deformação.

## FAILURE ANALYSIS OF PRE-INSTALLED MECHANICAL ANCHORS

### Abstract

Cold and hot formed cast-in-place anchors made in ASTM A36 steel fractured during fabrication and assembly of the component. It has been determined that the anchors failed due to synergic effects of strain-hardening, residual tensile stresses and strain ageing embrittlement during and post-processing of original cylindrical bars. It has been recommended to cold form the bars followed by normalization heat treatment in order to recrystallize the microstructure and, consequently, reduce dislocation density as well as relief potential residual stresses.

**Key words:** Dynamic strain ageing; Failure analysis; Mechanical anchors.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Pós-doutoranda pelo Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP), Brasil, [mcgatti@sc.usp.br](mailto:mcgatti@sc.usp.br)

<sup>3</sup> Pós-doutorando pelo Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP), Brasil, [omarramo@sc.usp.br](mailto:omarramo@sc.usp.br)

<sup>4</sup> PhD em Engenharia de Materiais, Diretor Superintendente MIB - Materials Institute of Brazil, [milan@mib.eng.br](mailto:milan@mib.eng.br)

<sup>5</sup> Engenheiro Industrial, Gerente Industrial Caldema Equipamentos Industriais Ltda, [gicaldema@caldema.com.br](mailto:gicaldema@caldema.com.br)

<sup>6</sup> Engenheiro Mecânico, Gerente de Engenharia Caldema Equipamentos Industriais Ltda, [jbarata@caldema.com.br](mailto:jbarata@caldema.com.br)

<sup>7</sup> Professor Associado do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP), Brasil, [jrpan@sc.usp.br](mailto:jrpan@sc.usp.br)

## 1 OBJETIVO

Objetiva-se neste trabalho determinar as causas da falha de chumbadores mecânicos de pré-concretagem empregados em obras de arte da indústria da construção civil.

## 2 INTRODUÇÃO

Os sistemas de ancoragem para concreto podem ser classificados em duas grandes categorias: sistemas de pré-concretagem, que são posicionados na fôrma antes da concretagem, e os pós-concretagem, que são fixados através da perfuração do concreto já endurecido.

Cada um dos sistemas de ancoragem é apropriado para um tipo específico de aplicação. A escolha de um determinado tipo de ancoragem é baseada em critérios econômicos, arquitetônicos e de viabilidade técnica.

No caso dos sistemas de pré-concretagem, a carga é transmitida para o material base por meio da ancoragem mecânica e/ou por aderência. As forças atuantes nesse sistema são muitas vezes distribuídas para o concreto através de uma armadura convenientemente posicionada. Já nos sistemas pós-concretagem, o posicionamento da armadura apresenta muita dificuldade, tornando-se inviável. Em contrapartida, avanços na tecnologia de perfuração levam os sistemas posteriormente instalados a serem utilizados em larga escala em novas construções, bem como em projetos de recuperação e de reforço estrutural.

A maioria dos sistemas de ligação é composta basicamente pelos elementos de ligação, pelos chumbadores e pelo material base, conforme mostrados na Figura 1.

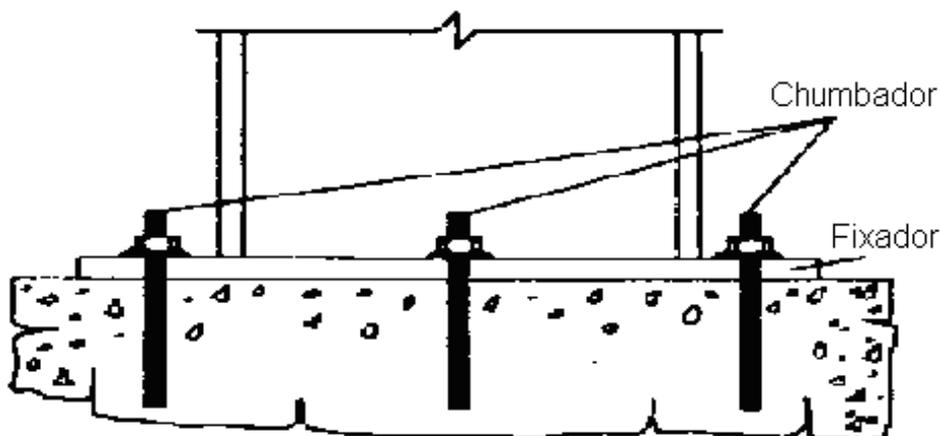


Figura 1. Elementos componentes de uma ancoragem padrão.

Na ancoragem padrão, a carga é transmitida do elemento de fixação para a placa de base, desta para os chumbadores, e destes para o concreto.

Os chumbadores de pré-concretagem (*cast-in-place anchors*) são elementos de ancoragem metálicos, posicionados antes da concretagem e somente submetidos a esforço após a concretagem e o endurecimento do concreto.

Com o passar do tempo, algumas classes de chumbadores podem apresentar alguns tipos de falha, podendo ocasionar até mesmo acidentes graves, pois são solicitados no emprego de obras de arte da indústria da construção civil. Portanto, este trabalho tem por finalidade principal determinar as causas da falha de alguns chumbadores mecânicos de pré-concretagem, e propor soluções preventivas.

### 3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

As barras que falharam inicialmente apresentaram fratura na região de dobramento, no momento que foram descarregadas no processamento ou durante a montagem do chumbador à estrutura, previamente à colocação do concreto. Nestes casos, pequenos impactos foram suficientes para fraturar as barras.

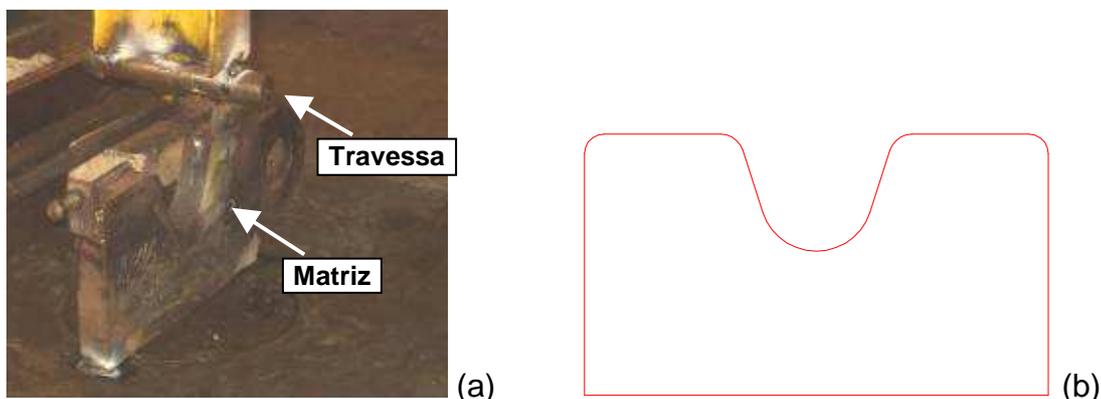
Visando solucionar o problema, as barras foram então trabalhadas a quente. O aquecimento foi realizado manualmente por meio de maçarico (Figura 2), porém sem o preciso controle da temperatura e do tempo de aquecimento. Medidas feitas com pirômetro manual registraram temperaturas acima de 500°C na superfície aquecida, mas, no momento do dobramento, a temperatura medida já havia caído para valor próximo de 250°C. Vale salientar que, na extremidade fria da barra, a temperatura não ultrapassou os 90°C e que, sempre após o dobramento, as barras foram cobertas com mantas térmicas para diminuir a taxa de resfriamento da peça. Barras de diversos diâmetros foram utilizadas na confecção dos chumbadores, porém as que mais comumente apresentam falhas possuíam diâmetros acima de 1 polegada. Tanto as barras dobradas a quente como as dobradas a frio apresentam casos de falhas prematuras, culminando na solicitação e execução da presente análise de falha.



**Figura 2.** Detalhe do aquecimento da barra imediatamente antes da operação de dobramento.

### 4 MATERIAL

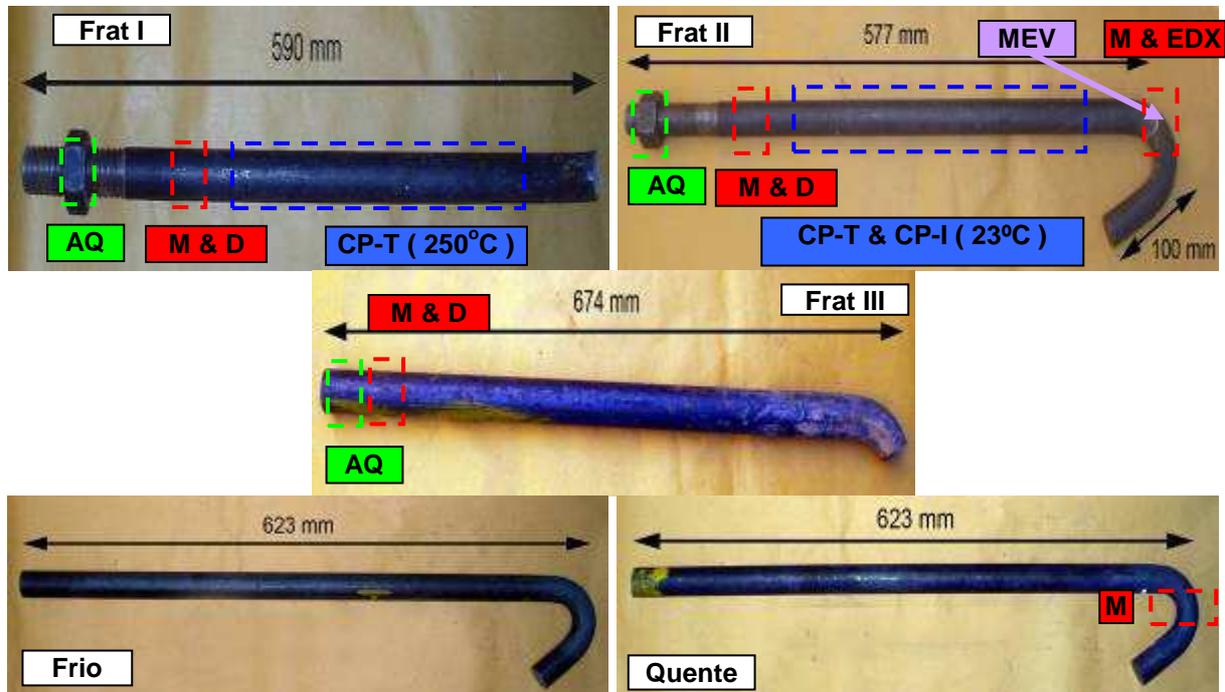
Os chumbadores foram fabricados a partir de barras cilíndricas de aço ASTM A36-08<sup>(1)</sup> laminadas a quente e resfriadas ao ar. Para conformá-los, as barras foram dobradas a quente ou a frio com o auxílio de uma prensa hidráulica e de uma matriz, conforme ilustrado na Figura 3.



**Figura 3.** (a) Sistema de dobramento dos chumbadores; (b) Perfil da matriz.

## 5 EXPERIMENTAL

Cinco amostras foram analisadas e identificadas conforme mostra a Figura 4. Três delas apresentam fratura na região de dobramento e as outras duas foram analisadas intactas, das quais uma delas foi dobrada a quente e outra dobrada a frio.



**Figura 4.** Análise e identificação dos corpos-de-prova avaliados. As imagens mostram as regiões de onde foram removidas amostras para análise química (AQ), metalografia (M), determinação de dureza (D), microscopia eletrônica da varredura (MEV), microsonda analítica (EDX), e para a usinagem de corpos-de-prova de tração (CP-T) e de impacto (CP-I).

Os diversos procedimentos empregados no estudo são descritos brevemente a seguir.

### 5.1 Análise Química por Espectrometria de Emissão Óptica (AQ)

As análises via espectrometria foram realizadas em um Espectrômetro de Emissão Óptica modelo 34000, e efetuadas nas amostras Frat I, Frat II e Frat III.

### 5.2 Ensaio de Dureza (D)

Nos ensaios de dureza foram utilizadas medidas aleatórias de macrodureza Rockwell B (HRB) empregando-se carga de 100 kg e esfera de 1/16.

As análises foram realizadas em planos transversais das amostras retiradas remotamente do local onde ocorreu a fratura das barras Frat I, Frat II e Frat III.



### **5.3 Análises Macrográfica (M), Microscopia Óptica (M), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microsonda Analítica (EDX)**

O procedimento de preparação das amostras para análises macro- e micrográfica consistiu na retirada da amostra do material base, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico para revelar a microestrutura com Nital 2%.

### **5.4 Inspeção por Líquido Penetrante**

Empregou-se na inspeção não-destrutiva das barras material fornecido pela Metal Chek<sup>®</sup>, composto por líquido penetrante (solúvel em água) e revelador não aquoso. As amostras analisadas por líquido penetrante foram às amostras intactas, dobradas respectivamente a quente e a frio.

### **5.5 Ensaio de impacto à temperatura ambiente**

Os ensaios de impacto Charpy com entalhe “V” foram realizados utilizando-se uma máquina TIME JB-300B, seguindo as diretrizes da norma ASTM E23-07.<sup>(2)</sup> Foram ensaiados corpos-de-prova padrão tipo-A com dimensões nominais de 5x10x55mm<sup>3</sup>. Os resultados foram fornecidos em termos da energia total absorvida pelos espécimes rompidos ao ar, à temperatura ambiente.

### **5.6 Ensaio de tração**

Os ensaios de tração foram conduzidos em um sistema eletromecânico Instron modelo 2382<sup>®</sup>, com célula de carga de 100 KN, sob controle de deslocamento do travessão a uma velocidade constante de 5 mm/min, empregando-se corpos-de-prova com seção transversal circular segundo diretrizes da ASTM E8-04.<sup>(3)</sup> Ensaios de tração foram executados à temperatura ambiente e a 250°C em amostras retiradas das regiões não deformadas dos componentes, respectivamente denominadas Frat II e Frat I.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 Análise Química por Espectrometria de Emissão Óptica**

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise química por espectrometria de emissão óptica efetuada respectivamente nas amostras Frat I, Frat II e Frat III. De acordo com os resultados, a composição química dos materiais avaliados encontra-se dentro dos valores estabelecidos pela norma ASTM A36-08,<sup>(1)</sup> considerando-se as barras com diâmetros entre 3/4 e 1 ½ polegadas.

**Tabela 1.** Análise química\* das amostras Frat I, Frat II e Frat III (% em peso)

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
<b>Frat I</b>	0,23	0,19	0,63	0,012	0,030	0,04	0,07	0,02
<b>Frat II</b>	0,22	0,19	0,62	0,012	0,029	0,04	0,07	0,02
<b>Frat III</b>	0,14	0,21	0,64	0,027	0,021	-	0,02	0,01
<b>ASTM A36<sup>#</sup></b>	0,27 máx	0,40 máx	0,60-0,90	0,04 máx	0,05 máx	-	-	-
<b>SAE 1020</b>	0,18-0,23	-	0,30-0,60	0,04 máx	0,05 máx	-	-	-
	<b>Cu</b>	<b>Al</b>	<b>V</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>	<b>B</b>
<b>Frat I</b>	0,17	0,005	-	-	-	-	0,001	0,0008
<b>Frat II</b>	0,16	0,004	-	-	-	-	0,001	0,0007
<b>Frat III</b>	0,02	0,003	-	-	-	-	-	0,0005
<b>ASTM A36<sup>#</sup></b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SAE 1020</b>	-	-	-	-	-	-	-	-

\* Média de 3 análises; # Barras entre ¾ e 1 ½ polegadas

## 6.2 Ensaio de dureza

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos em ensaios de dureza realizados em amostras extraídas das barras denominadas Frat I, Frat II e Frat III.

**Tabela 2.** Análise de dureza Rockwell B (HRB) das barras Frat I, Frat II e Frat III

Amostra	Medidas de dureza (HRB)				Média em HRB	Média em HB (Brinell)
	1	2	3	4		
<b>Frat I</b>	78,0	79,0	77,0	77,0	<b>77,8</b>	<b>142,0</b>
<b>Frat II</b>	78,5	78,0	77,0	77,0	<b>77,6</b>	<b>142,0</b>
<b>Frat III</b>	67,0	66,0	68,0	68,0	<b>67,3</b>	<b>115,0</b>

Conforme mostram os resultados da Tabela 2, a amostra Frat III apresenta a menor dureza, o que é plenamente concordante com o menor teor de carbono da mesma.

## 6.3 Análises Macrográfica e por Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 5 apresenta os resultados da análise macrográfica das amostras intactas (dobradas, respectivamente, a frio e a quente), evidenciando as marcas provocadas pela pressão de contato exercida pela travessa durante a operação de dobramento.



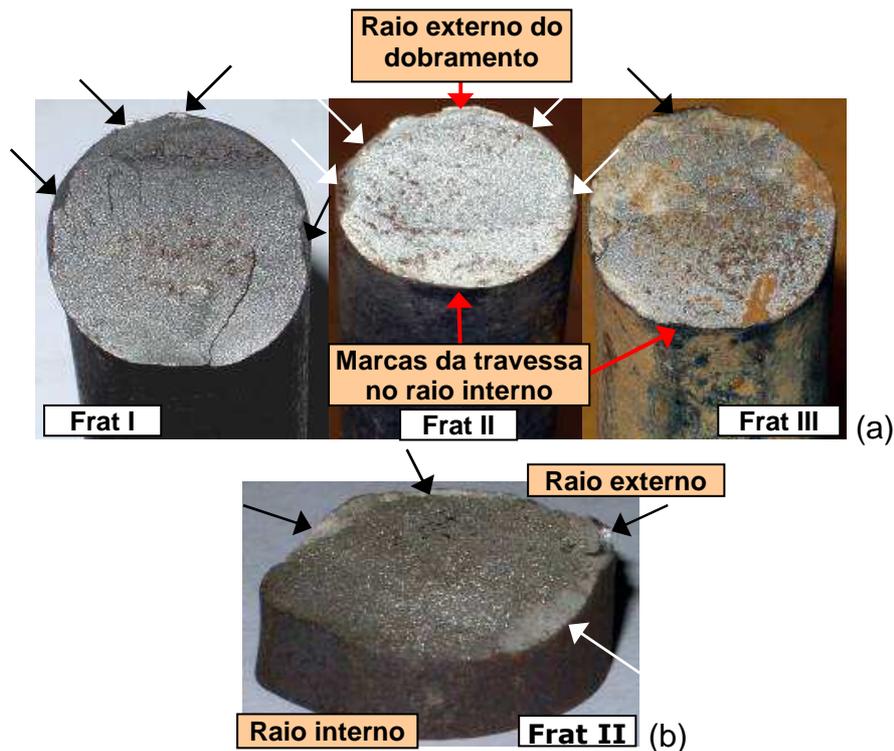
**Figura 5.** Marcas provocadas pelo contato da travessa de dobramento.

A análise macrográfica das superfícies de fratura (Figura 6) das amostras Frat I, Frat II e Frat III sugere fortemente a presença de um modo de fratura frágil devido às seguintes e notáveis características:<sup>(4)</sup>

- pouca ou nenhuma deformação plástica: há apenas algumas pequenas regiões de cisalhamento (45°) junto à superfície das barras;
- a superfície de fratura é perpendicular à direção das tensões trativas principais;

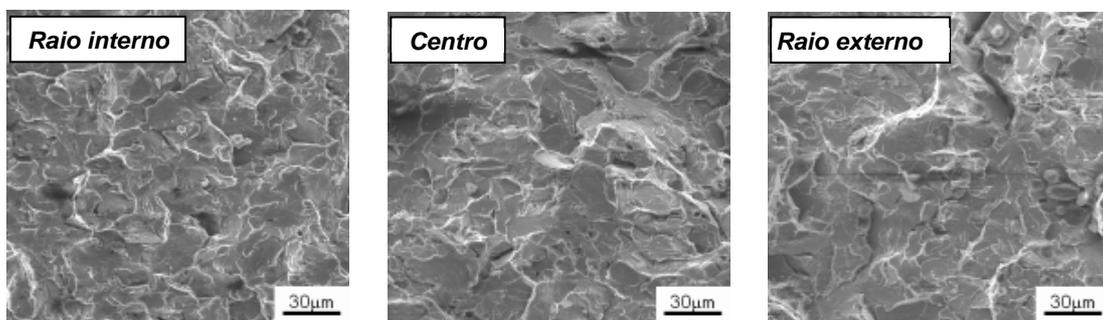


- o aspecto brilhante das superfícies é indicativo de um modo de fratura frágil, que ocorre transgranularmente (por clivagem de planos cristalográficos) ou intergranularmente. Em ambos os casos, formam-se facetas na superfície que refletem facilmente a luz, dando à fratura um aspecto refletivo;
- marcas radiais: há evidências, apesar de bastante sutis, de marcas radiais que apontam para o sítio de nucleação da trinca no raio interno de dobramento, ou seja, coincide com as marcas de deformação impostas pela travessa durante o processo de dobramento.



**Figura 6.** (a) Análise macrográfica das superfícies de fratura das amostras Frat I, Frat II e Frat III. As setas indicam pequenas regiões de cisalhamento; (b) Vista em perspectiva da superfície de fratura da amostra Frat II, mostrando as bordas cisalhadas e o aspecto brilhante da superfície.

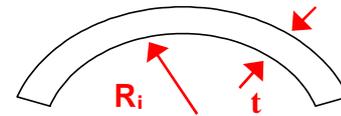
A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de fratura da barra Frat II, mostrada na Figura 7, revela um modo de fratura predominantemente frágil, transgranular, por clivagem de planos cristalográficos, indicando que na região de dobramento o material encontra-se deveras fragilizado.



**Figura 7.** Análise por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura da amostra Frat II em três regiões: próximo ao raio interno, centro e próximo ao raio externo.

Conhecendo-se o raio interno de dobramento,  $R_i$ , é possível estimar-se a deformação convencional, ou de engenharia, imposta às fibras mais externas e internas de uma barra de seção simétrica, por meio da Equação 1:

$$e = \frac{t}{2R_i + t} \quad (1)$$



Para a barra de 1 polegada de diâmetro, o diâmetro interno de dobramento é de 1,25 polegadas. Assim sendo, a deformação na fibra mais externa (em tração) é de 44,4%. O mesmo valor foi aplicado à fibra mais interna, porém com sinal negativo (compressão). Deve-se salientar que o valor de deformação obtido não leva em conta a redução de diâmetro da barra e nem o estado de tensão imposto pela compressão exercida pela travessa à barra contra a matriz de dobramento. Porém, o valor calculado é uma boa aproximação do nível máximo de deformação atingido, e mostra que o material pode alcançar altos níveis de encruamento durante o dobramento. O encruamento aumenta a resistência do material e diminui sua tenacidade, incrementando a probabilidade de falhas por impacto.

Após o processo de dobramento, surgem tensões residuais de natureza trativa na região do raio interno, enquanto na região do raio externo surgem tensões compressivas. As tensões residuais trativas facilitam a nucleação de trincas pela diminuição da tensão aplicada necessária para provocar a falha por fratura.

#### 6.4 Inspeção por Líquido Penetrante

Observa-se na Figura 8 que a barra dobrada a frio não apresentou nenhuma trinca em sua superfície que pudesse comprometer seu desempenho. Entretanto, aquela dobrada a quente apresentou uma grande quantidade de micro-fissuras na região de dobramento, tal como pode ser observado na Figura 9.



**Figura 8.** Análise por líquido penetrante dos raios externo e interno da barra dobrada a frio.

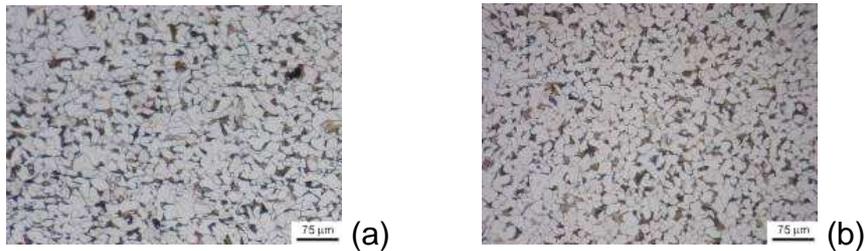


**Figura 9.** Análise por líquido penetrante dos raios externo e interno da barra dobrada a quente.

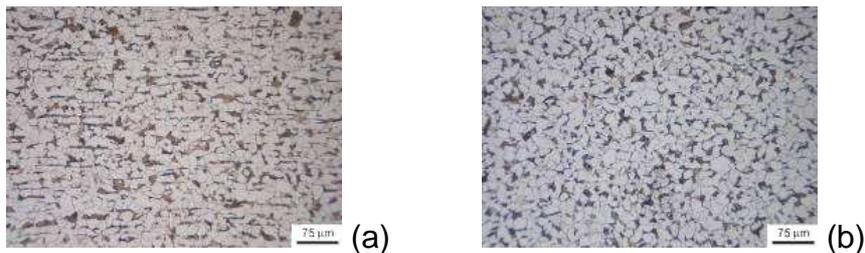
#### 5.5 Análise Micrográfica e por Microsonda Analítica

De acordo com análises micrográficas de amostras removidas de posições remotas da região de fratura das barras Frat I, Frat II e Frat III (Figuras 10-12),

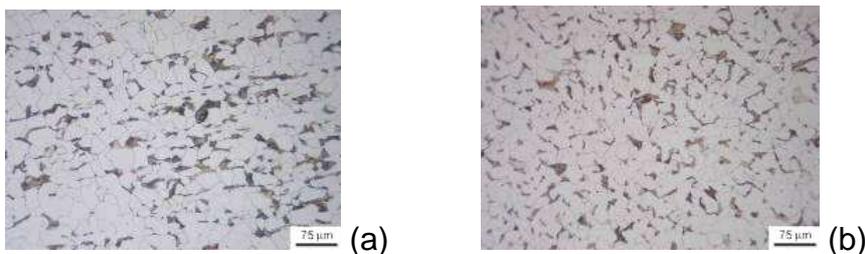
microestruturas típicas de ferrita e perlita resultaram do processo de laminação a quente.



**Figura 10.** Micrografia da amostra Frat I: (a) Longitudinal e (b) Transversal.

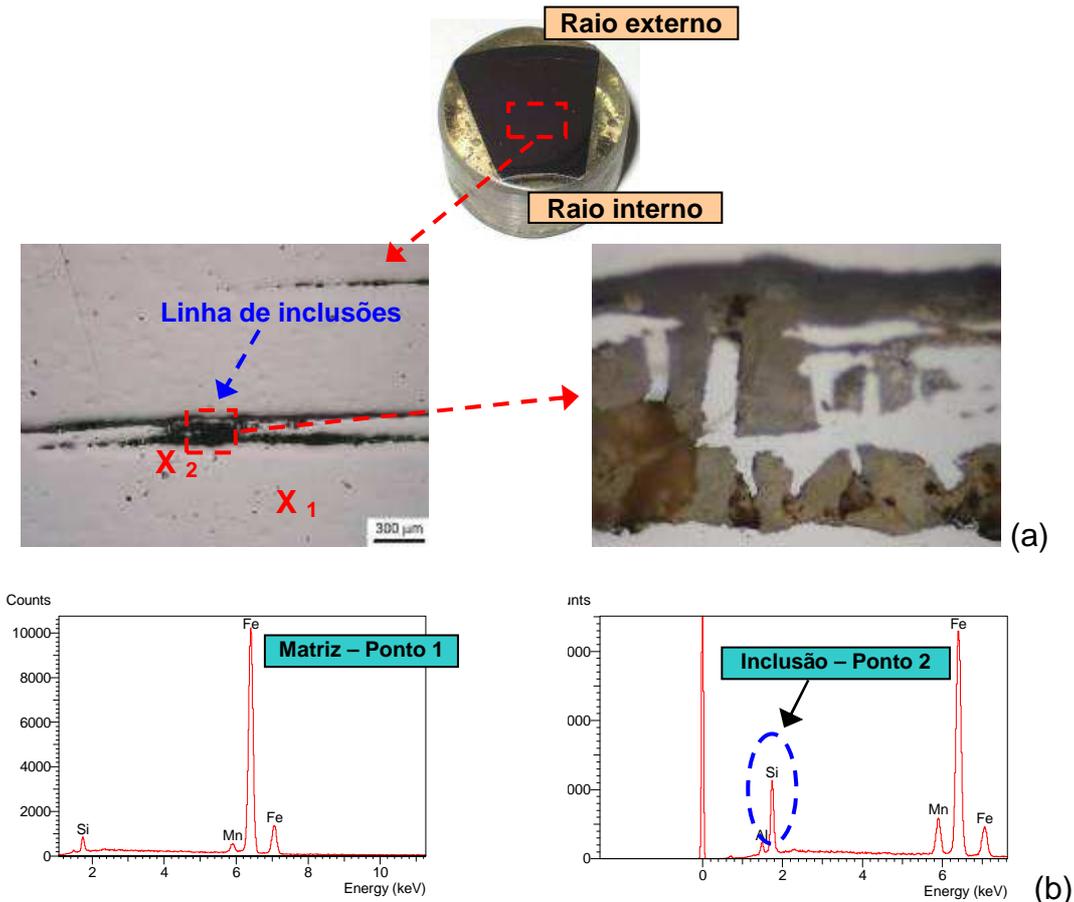


**Figura 11.** Micrografia da amostra Frat II: (a) Longitudinal e (b) Transversal.

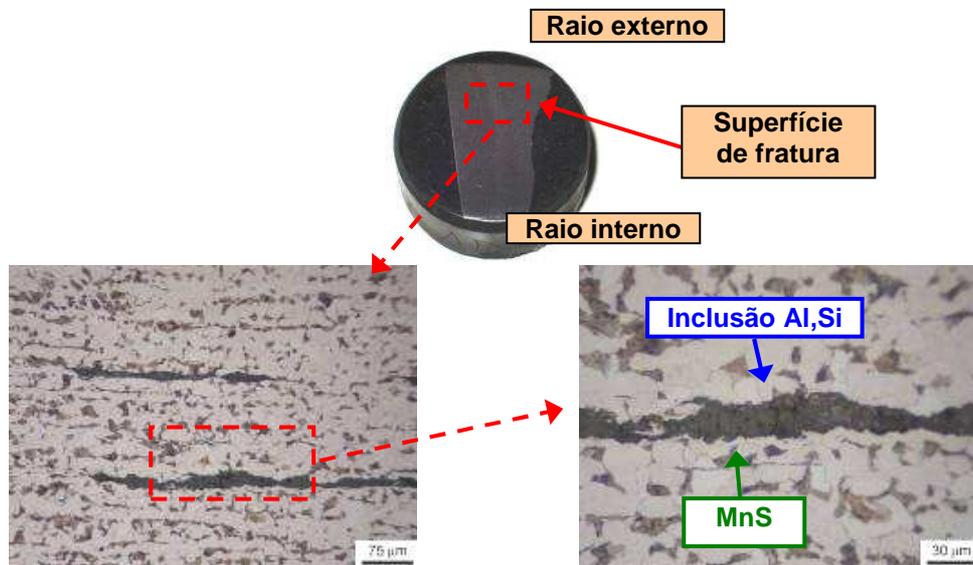


**Figura 12.** Micrografia da amostra Frat III: (a) Longitudinal e (b) Transversal.

Em uma das amostras retirada da região de dobramento da barra deformada a quente verificou-se uma grande linha de inclusões, conforme pode ser visto na Figura 13. A análise por EDX indicou a presença de Si e Al, sugerindo que a linha de inclusão é de alumino-silicato, proveniente de escória. Apesar de indicar má qualidade do material, este defeito não é a causa das falhas por fratura das barras, visto se encontrar perpendicular à superfície de fratura. Estas inclusões foram também detectadas ao lado de inclusões alongadas de MnS, perto da região de fratura da amostra Frat II (Figura 14).



**Figura 13.** Análise micrográfica da amostra deformada a quente, na região de dobramento. (a) Sem ataque químico; (b) Análise pontual por EDX da matriz e da inclusão.



**Figura 14.** Análise micrográfica da amostra Frat II, na região de dobramento, próximo à superfície de fratura. Ataque Nital 2%.

## 6.6 Ensaios de impacto e de tração

Ensaios de impacto foram executados à temperatura ambiente em amostras retiradas da região não deformada do componente Frat II. Os resultados apresentados na Tabela 3 e Figura 15 são compatíveis com esta classe de material, e não indicam

que o material esteja fragilizado antes do dobramento. Entretanto, o espalhamento de dados sugere fortemente a falta de homogeneidade da matéria-prima metálica.

**Tabela 3.** Resultados dos ensaios de impacto em corpos-de-prova usinados da amostra Frat II

CDP	E (J)
CP1	99,5
CP2	92,0
CP3	140,0
<b>Média</b>	<b>110,5</b>



**Figura 15.** Corpos-de-prova de impacto pós-ensaio.

Os resultados apresentados na Figura 16 e Tabela 4 mostram que o material atende os requisitos mínimos de resistência mecânica e ductilidade de acordo com a norma ASTM A36<sup>(1)</sup> para ensaios executados à temperatura ambiente. Entretanto, para os ensaios executados a 250°C, ocorre um aumento do limite de resistência à tração e queda na ductilidade, apesar da temperatura mais alta, indicando claramente uma fragilização do material.



**Figura 16.** Corpos-de-prova pós-ensaio de tração.

**Tabela 4.** Resultados dos ensaios de tração efetuados em corpos-de-prova usinados a partir das amostras Frat II (temperatura ambiente) e Frat I (250°C)

Temperatura	Corpo-de-prova	E (GPa)	S <sub>e</sub> (MPa)	S <sub>r</sub> (MPa)	A (%)	RA (%)
Ambiente	CP1 - Frat II	200,8	325,6	501,0	28,8	59,9
	CP2 - Frat II	210,2	335,0	500,2	25,2	60,5
	<b>Média</b>	<b>205,5</b>	<b>330,3</b>	<b>500,6</b>	<b>26,7</b>	<b>60,2</b>
250°C	CP1 - Frat I	-	298,0	672,7	18,8	43,9
	CP2 - Frat I	205,0	302,0	672,4	19,8	45,8
	<b>Média</b>	<b>205,0</b>	<b>300,0</b>	<b>672,6</b>	<b>19,3</b>	<b>44,9</b>
Especificado	ASTM A36		250 mín	400-550	23 mín	-

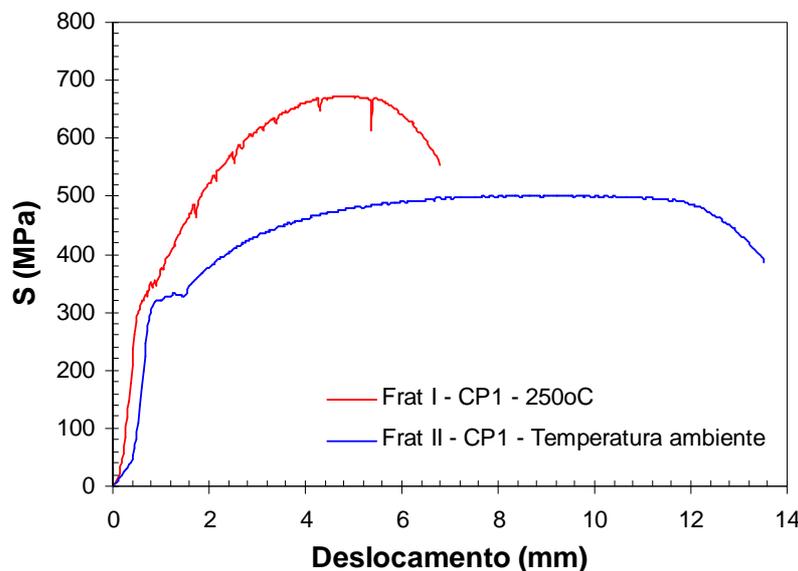
Onde: E é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young; S<sub>e</sub> é o limite de escoamento convencional a 0,2%; S<sub>r</sub> é o limite de resistência à tração convencional; A é o alongamento total medido em 25 mm; RA é a redução de área na fratura.

Aços baixo carbono comuns são suscetíveis ao processo de fragilização denominado envelhecimento por deformação quando submetidos a altos níveis de deformação a frio ou a temperaturas moderadas (até ~350°C).<sup>(5)</sup> O processo de deformação gera uma grande quantidade de discordâncias na microestrutura do material, e, se houver tempo e/ou temperatura suficientes, os átomos de carbono (e



nitrogênio) intersticiais migram para as linhas de discordância, ancorando-as. Como consequência, há um aumento de resistência mecânica e uma queda na ductilidade do material.

Para a barra deformada a frio, e mantida posteriormente à temperatura ambiente, são necessários vários dias para que o processo de envelhecimento por deformação ocorra. Para a barra deformada a quente, o processo de envelhecimento por deformação ocorre de maneira dinâmica durante o próprio processo de deformação, pois o aquecimento aumenta sensivelmente a mobilidade dos átomos de carbono. Como consequência, quando as discordâncias se libertam da “nuvem” de átomos de carbono intersticiais, há uma queda na tensão; porém, como a mobilidade atômica é alta, logo outros átomos ancoram as discordâncias, aumentando a tensão novamente, e assim sucessivamente, provocando um serrilhado característico na curva tensão-deformação, o qual é conhecido por efeito Portevin-Le Chatelier, o qual é ilustrado na Figura 17. Deve-se lembrar que, mesmo depois de cessada a aplicação da deformação, os átomos continuam a migrar rapidamente para as linhas de discordância devido ao fato da barra ainda estar quente, acelerando o processo de fragilização.



**Figura 17.** Efeito Portevin-Le Chatelier, ou envelhecimento dinâmico por deformação, observado na curva tensão-deformação de corpo-de-prova retirado da barra Frat I e ensaiado a 250°C. A curva do corpo-de-prova retirado da amostra Frat II, ensaiado à temperatura ambiente, é plotada para efeito comparativo.

## 7 CONCLUSÕES

As barras de chumbadores falharam devido a uma sinergia entre o alto nível de encruamento do material, presença de tensões residuais trativas e fragilização causada pelo envelhecimento por deformação durante e após o dobramento das mesmas.

Nas barras dobradas a frio, o processo de envelhecimento por deformação ocorre lentamente após o dobramento, durante o período de armazenamento dos chumbadores, portanto antes da sua utilização. Nas barras dobradas a quente, o envelhecimento ocorre inicialmente de maneira dinâmica, durante o próprio dobramento, continuando nas etapas de resfriamento e armazenamento das barras. O aquecimento das barras acelera o processo de fragilização.

A utilização de mantas para diminuir a taxa de resfriamento, tal como realizada pelo fabricante das barras, prolonga o efeito da temperatura sobre a mobilidade dos átomos intersticiais, facilitando o ancoramento das discordâncias.

## 8 RECOMENDAÇÕES

De modo a evitarem-se futuramente os problemas ora reportados, recomendou-se ao fabricante do componente estrutural dobrar as barras a frio e, posteriormente, realizar um tratamento térmico de normalização de modo a recristalizar a microestrutura e, conseqüentemente, reduzir a densidade de discordâncias e aliviar possíveis tensões residuais da peça final.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASTM A36, 2008 *Standard Specification for Carbon Structural Steel*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvania.
- 2 ASTM E8, 2004 *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvania
- 3 ASTM E23, 2007 *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvania.
- 4 Wulpi D.J., *Understanding How Components Fail*, 2<sup>nd</sup> edition, Chapter 4: Single-Load Fracture of Ductile and Brittle Metals, ASM International, Materials Park (1999).
- 5 Dieter G.E., *Mechanical Metallurgy*, 3<sup>rd</sup> edition, Chapter 3: Strengthening Mechanisms, McGraw-Hill, New York (1986).