

**ESCOLA POLITÉCNICA  
DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

---

**DEPTO. ENGENHARIA METALÚRGICA**

TRABALHO DE FORMATURA – PMT 596

ESTUDO DE ATAQUES POTENCIOSTÁTICOS  
METALOGRAFÍCOS EM ELETRÓLITO DE ACETATO DE  
CHUMBO PARA O AÇO RÁPIDO AISI M2

SETEMBRO DE 1999

**ALUNO: MARCELO SARKIS CURY**  
**ORIENTADORA: PROF. DRA. NEUSA ALONSO-FALLEIROS**

## RESUMO

O presente trabalho baseou-se no estudo do comportamento eletroquímico do aço rápido AISI M2 em um eletrólito ácido de acetato de chumbo, 5% em peso, ou pH = 6, para duas condições de tratamento térmico: recozida e temperada.

O levantamento de curvas de polarização potenciodinâmica e potencioestáticas formam a base do presente trabalho, assim como a análise metalográfica após os ensaios. As curvas de polarização potencioestática visaram o ataque aos microconstituintes do aço AISI M2. Todas as curvas foram levantadas com tempo de imersão nulo.

Ataques potencioestáticos em potenciais próximos de 1000 mV,ECS revelaram a microestrutura do aço AISI M2 tanto na condição temperada quanto na recozida. A matriz, nos dois casos, ficou recoberta por uma película colorida enquanto os carbonetos podiam ser observados sem ataque. A investigação sobre o tempo necessário para o ataque mostrou que tempos de 2 minutos são suficientes para revelar a microestrutura nestes potenciais.

# SUMÁRIO

SUMÁRIO	1
1 INTRODUÇÃO	3
2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 ASPECTOS ELETROQUÍMICOS	6
3.1.1 Os exames metalográficos	6
3.1.2 Os ataques e alguns princípios eletroquímicos	6
3.1.3 Um aparato experimental adequado para ataques potencioestáticos	8
3.1.4 Curvas de polarização potenciodinâmicas	9
3.1.5 Ataques potencioestáticos	11
3.2 OS AÇOS RÁPIDOS	16
3.2.1 Introdução geral	16
3.2.2 Os dois grupos de aços rápidos	19
3.2.2.1 Grupo T	19
3.2.2.2 Grupo M	20
3.2.3 Os carbonetos presentes	21
3.2.3.1 Carbonetos primários	21
3.2.3.2 Carbonetos secundários	21
3.2.3.3 Caracterização dos carbonetos	22
3.2.4 Os principais efeitos dos elementos de liga	24
3.2.4.1 Carbono	24
3.2.4.2 Tungstênio	25
3.2.4.3 Molibdênio	26
3.2.4.4 Vanádio	27
3.2.4.5 Cromo	28
3.2.4.6 Cobalto	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 MATERIAL EM ESTUDO	31
4.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS	31
4.3 DUREZA	32
4.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	33
4.5 EXAME METALOGRAFICO	33
4.6 PREPARAÇÃO DO ELETRÓLITO DE ACETATO DE CHUMBO	33
4.7 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS	34
4.7.1 Ensaios Potenciodinâmicos	34
4.7.2 Ensaios Potencioestáticos	35
4.8 LIMPEZA DOS CORPOS-DE-PROVA APÓS ENSAIOS ELETROQUÍMICOS	35
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	36
5.1 MEDIDAS DE DUREZA	36
5.2 EXAME METALOGRAFICO	36
5.3 CARACTERIZAÇÃO DO ELETRÓLITO	38
5.4 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS POTENCIODINÂMICOS	38
5.4.1 Resultado das Amostras Recozidas após Polarização potenciodinâmica	38
5.4.2 Resultado das Amostras Temperadas após Polarização potenciodinâmica	42
5.5 ATAQUES POTENCIOESTÁTICOS	44
5.5.1 Resultado para as amostras recozidas a $1150\text{mV}_{\text{ECS}}$ por dois minutos	45
5.5.2 Resultado para as amostras temperadas a $1150\text{mV}_{\text{ECS}}$ por dois minutos	46
5.5.3 Resultado para as amostras recozidas a $700\text{mV}_{\text{ECS}}$ por 10 minutos	48
5.5.4 Resultado para as amostras temperadas a $700\text{mV}_{\text{ECS}}$ por 10 minutos	49
6 DISCUSSÃO	50
6.1 TRATAMENTO TÉRMICO E DUREZA	50
6.2 OS ENSAIOS POTENCIODINÂMICOS	50

		2
6.3	Os ENSAIOS POTENCIOSTÁTICOS	51
7	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>53</b>
8	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>54</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os ataques potencioestáticos permitem o ataque seletivo de fases microconstituíntes de um metal a um potencial constante. Esse ataque seletivo pode ser colorido, em que se revelam as diferentes fases, ou algumas delas. Ou mesmo pelo ataque a uma única fase preferencialmente.

Por esses motivos, o ataque potencioestático torna-se uma ferramenta importante em exames metalográficos mais concisos, sob o ponto de vista analítico e quantitativo.

No presente trabalho o aço AISI M2 será objeto de estudo quanto a ocorrência de ataques metalográficos potencioestáticos no eletrólito de acetato de chumbo, 5% em peso.

## 2 – OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O presente trabalho tem como objetivo o levantamento de curvas de polarização potenciodinâmicas para o aço-ferramenta AISI M2 em eletrólito ácido de acetato de chumbo, 5% em peso, pH de valor 6, levantar potenciais de máxima densidade de corrente e verificar o ataque aos seus microconstituintes seletivamente quando submetidos a esses potenciais em ensaios potencioestáticos.

A solução de acetato de chumbo foi utilizada com sucesso em ataques potencioestáticos seletivos e coloridos de outros aços [WORC94], e por isso foi escolhida para o desenvolvimento do presente trabalho.

Existem ainda muitos ataques metalográficos os quais permitem estudar a micrografia do metal ou liga. Dentre os tipos de ataque existem os físicos, os químicos e os eletrolíticos. Os químicos são os mais comumente utilizados devido a gama de reagentes que existem para atacar a superfície do corpo-de-prova metálico, além de serem práticos sob o ponto de vista laboratorial.

No entanto, a corrosão do material é generalizada, isto é, há uma grande dificuldade de se revelar microconstituintes específicos do material, dificultando a análise quantitativa. Para contornar essa corrosão generalizada, os ataques eletrolíticos, primordialmente os potencioestáticos, tem se mostrado úteis no ataque a determinados microconstituintes do material, promovendo um contraste de cores no metal ou liga, melhorando assim a análise metalográfica quantitativa.

Logo, o ataque seletivo de microconstituintes é uma ferramenta útil para no estudo do desempenho e na elaboração de novas ligas, bem como no avanço de tratamentos térmicos de aços rápidos. Pois, permite a visualização da morfologia de carbonetos, de tamanhos de grão, de tipos de carbonetos, de fases presentes e as frações volumétricas desses microconstituintes seletivamente na matriz.

Indispensável porém para realizarem-se os ataques metalográficos potencioestáticos é o levantamento das curvas de polarização potenciodinâmicas. Estas foram levantadas e a partir de então definiram-se os parâmetros para as curvas

potenciostáticas, em seguida analisando os resultados quanto a um possível ataque potenciostático.

## 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Aspectos eletroquímicos

#### 3.1.1 Os exames metalográficos

O exame metalográfico dos metais e suas ligas por meio da microscopia ótica, permite que a granulação do material, a quantidade, a natureza, a distribuição e forma dos diversos constituintes, certas inclusões, e etc sejam observadas, [COLP69] conferindo ao metalurgista informações importantes para que ele as relacione com os tratamentos térmicos realizados para a manufatura do material e com as propriedades mecânicas deste.

No entanto, essas informações só são obtidas se as diferenças de refletibilidade, a partir da luz incidida na secção plana e polida do corpo-de-prova metalográfico, forem superiores a 10%. Logo, somente os poros, pites, trincas, e inclusões não-metálicas podem ser vistos sem que um ataque metalográfico seja feito ao material [PETZ78].

Dentre os ataques metalográficos, os eletroquímicos (químicos e eletrolíticos) são os mais utilizados. Durante esses ataques ocorrem reações de oxi-redução na superfície do corpo-de-prova metálico, promovendo uma superfície contendo irregularidades e ou películas interferentes. Outros métodos, além dos ataques em soluções químicas aquosas, são os em atmosferas oxidantes a altas temperaturas (*heat tinting*), e o ataque colorido (*tint etching*) [STAN90].

#### 3.1.2 Os ataques e alguns princípios eletroquímicos

Em 1903, Whitney propôs que a corrosão dos metais em soluções aquosas (eletrólitos) era regida por processos eletroquímicos [SIEB85]. Sabe-se hoje que nestes eletrólitos a dissolução anódica (perda de elétrons, oxidação, ou corrosão) ocorre espontaneamente, sustentada por reações catódicas (com ganho de elétrons) das espécies químicas presentes na solução de ataque [STAN90].

As características oxidantes da solução de ataque estabelecem com o metal ou liga um potencial eletroquímico no qual ocorrerá as reações de oxidação do material. O potencial existente e a composição do eletrólito empregada determinarão a taxa de oxidação (corrosão) e o modo do ataque [STAN90, PETZ78].

O potencial é, então, influente, pois os microconstituintes apresentam diferentes potenciais eletroquímicos. Desta forma, a velocidade do ataque fica diferente em diversas regiões da superfície do material, gerando as "microregiões" catódicas e anódicas. Essas "microcélulas" eletroquímicas originam-se devido a diferença na composição das fases, e também pelas irregularidades na estrutura cristalina (contornos de grão) e por outras heterogeneidades como [PETZ78]:

- a) regiões encruadas, as quais são menos resistentes ao ataque do que o material não deformado;
- b) diferenças no conteúdo de oxigênio no eletrólito, e
- c) diferenças na formação de películas de óxidos (áreas polidas são menos resistentes).

Os elementos presentes na solução de ataque são importantes, pois a agressividade do ataque é, principalmente, determinada pelo grau de dissociação e condutividade elétrica da solução [PETZ78].

Os metais em contato com os eletrólitos sofrem um processo de dissolução, originando íons que permanecem dissolvidos no eletrólito, ou que reagem com elementos não metálicos para formarem películas sobre a superfície [STAN90]. A observação da microestrutura é, então, possível pois criou-se irregularidades e ou películas que permitem o exame metalográfico.

Os ataques eletroquímicos, onde a dissolução anódica ocorre com a imersão do corpo-de-prova metálico na solução de ataque (eletrólito) sem a utilização de um circuito externo, chama-se de ataque químico [STAN90]. Já os ataques eletroquímicos, em que a dissolução anódica é controlada por um circuito externo, são denominados eletrolíticos e podem ser divididos em [MAGN94]:

- a) *convencionais*: imergi-se o corpo-de-prova (anodo) junto com um contra-eletrodo (cátodo, platina ou aço inoxidável) num eletrólito, e submete-se o

corpo-de-prova a um determinado potencial através de um circuito externo.

- b) *potenciostáticos*: mesmo princípio que os ataques eletrolíticos convencionais, contudo, o potencial é controlado por um eletrodo de referência e um potenciostato. Tal sistema possibilita um controle mais apurado do potencial aplicado.

### 3.1.3 Um aparato experimental adequado para ataques potenciostáticos

O modo de ataque é muito sensível a composição da solução de ataque e, mais importante, é que o tipo das reações que ocorrem na interface metal (ou liga) / solução dependem do potencial eletroquímico. E, para se estabelecer um controle sobre esse potencial com grande precisão, o uso do potenciostato é indispensável.

O aparato experimental no qual o potenciostato (que deve possuir alta impedância entre a amostra e o eletrodo de referência) faz parte, está desenhado na Figura 1.

O corpo-de-prova (eletrodo de trabalho - ET), devidamente embutido e polido, é mergulhado no eletrólito que está numa célula eletrolítica, e é ligado ao potenciostato. Um contra-eletrodo (CE) inerte, que pode ser de platina ou grafite, permite que a corrente passe do, ou, para o corpo-de-prova através do eletrólito. O potencial entre o corpo-de-prova e o eletrólito é medido por um eletrodo de referência (ER) colocado a uma distância de 1 a 2 mm da amostra [WOLY94, HACK85]. Esse eletrodo de referência pode ser o de prata/cloreto de prata, ou o de cobre/sulfato de cobre, ou o mais comum, que é o de calomelano saturado ( $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ) [HACK85]. Esse eletrodo é colocado num capilar de Luggin, contendo em seu interior uma ponte salina de KCl saturado que permite a transferência das cargas elétricas para o eletrodo e ao mesmo tempo esse aparato evita a contaminação do eletrodo pela solução [STAN90].

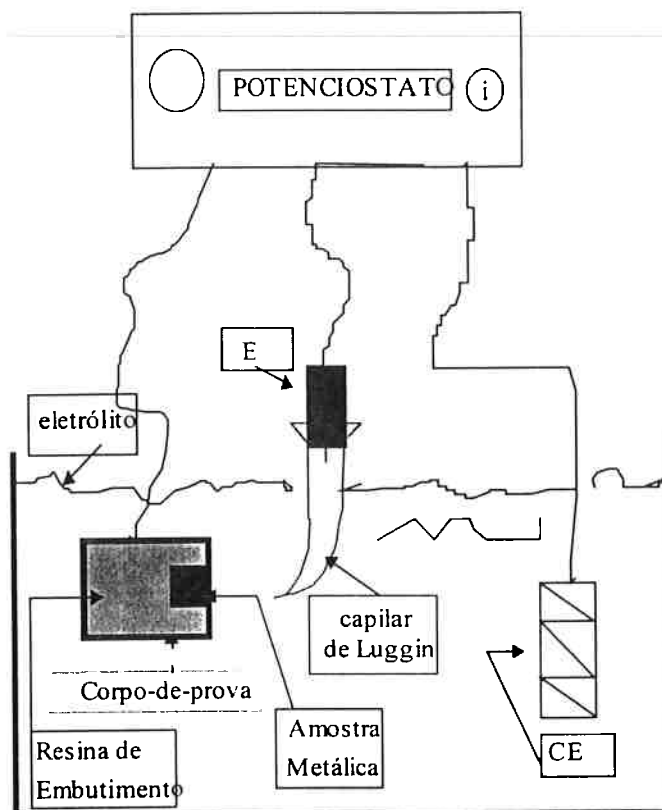


Figura 1 - Aparato experimental para ataques potencioestáticos.

### 3.1.4 Curvas de polarização potenciodinâmicas

O potencial eletroquímico estabelecido entre o metal e o eletrólito está associado a uma densidade de corrente a qual mede a taxa de ataque do metal. Desta forma a dependência da taxa de dissolução anódica do metal ou liga é dada pelas curvas de polarização potenciodinâmicas [STAN90] determinadas experimentalmente.

Estas curvas varrem uma faixa desejada de potenciais normalmente a partir da região catódica ou a partir do potencial de corrosão, registrado pelo potenciostato ao se iniciar o ensaio, até potenciais da região transpassiva. A velocidade de varrimento dos potenciais é linear e a uma velocidade de 6V/h [STAN90], que pode ser variada conforme desejado em outro ensaio.

As diversas regiões das curvas de polarização estão mostradas na Figura 2, a página seguinte. São elas: a catódica, a anódica ativa, a anódica passiva e a transpassiva.

Na região catódica predomina o efeito da redução dos íons hidrogênio a gás hidrogênio na superfície da amostra, devido ao fluxo de elétrons para esta [STAN90]. Ao se encontrarem as curvas catódica e anódica a corrente registrada pelo potenciostato é nula, e o potencial em que isso ocorre é denominado potencial de corrosão. Acima do potencial de corrosão até o primeiro pico de máxima densidade de corrente tem-se a região anódica ativa, onde a velocidade de corrosão aumenta conforme se aumenta o potencial. Um ataque na amostra pode ocorrer mas não se forma nenhum tipo de película [STAN90].

O pico de máxima densidade de corrente indica que a partir do potencial correspondente, está se formando sobre a superfície da amostra uma película, o que reduz a densidade de corrente até que uma película de óxido aderente característica do estado passivo se defina.

Aumentando o potencial na região anódica passiva, a densidade de corrente mantém-se praticamente constante, até que a película se torne instável e se dissolva na solução [STAN90]. Dá-se, assim, o início da região transpassiva na qual claramente se percebe um aumento contínuo na densidade de corrente.

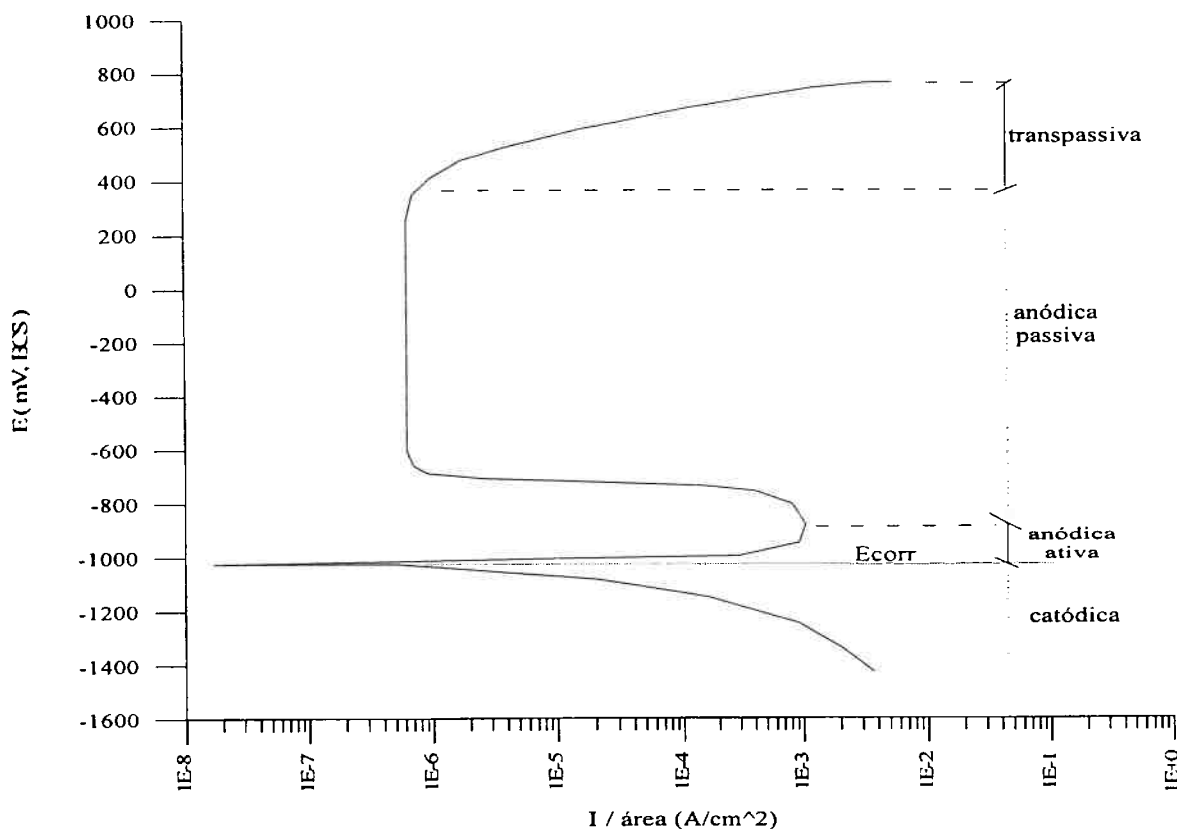


Figura 2 - Esquema de uma curva de polarização potenciodinâmica simples.

As curvas de polarização potenciodinâmicas indicam faixas de potenciais de dissolução, com ou sem a formação de películas, o que indica uma provável contaminação da solução de ataque [STAN90]. Por este e outros motivos deve-se evitar a reutilização da mesma solução.

Contudo, as curvas de polarização (potenciodinâmica ou potenciostática) apresentam como principais limitações os fatos de serem dependentes [WOLY94]:

- a) do sentido em que é feito o levantamento, e
- b) da velocidade de varrimento no método potenciodinâmico, e do tempo e do incremento de potencial no método potenciostático.

### 3.1.5 Ataques potenciostáticos

O ataque metalográfico potenciostático é a corrosão de um ou mais microconstituintes do metal ou liga polido, que consta em manter o material a ser atacado num eletrólito adequado, sob um potencial controlado em relação a um eletrodo de referência [STAN90].

O princípio em que esse método se baseia é o de que os produtos das reações de dissolução eletroquímica, e a velocidade com que esses produtos se formam para um determinado eletrólito são função do potencial aplicado ao metal ou liga mantendo-o constante em relação ao eletrodo de referência [STAN90].

Nestes ataques deseja-se obter informações de como se comporta a resposta do corpo-de-prova ao ataque nos diversos potenciais escolhidos. Ataques a contornos de grão, pites de ataque, "faceting", e uma dissolução preferencial de fases e de grãos acontecem nos potenciais da região anódica ativa e transpassiva, onde a formação de películas na superfície da amostra não ocorre [STAN90].

Nos potenciais em que há formação de películas, estas causam contraste de cor relacionados aos efeitos interferentes ligados a espessura da película, da estrutura desta (monocristalina, policristalina, ou amorfa) e a outras características óticas, como sensibilidade a luz polarizada [STAN90].

Como uma topologia na superfície da amostra, com ou sem película, é indispensável para o contraste de cores durante a micrografia, o ataque potencioestático é um eficiente recurso para se obter tal superfície.

Sua aplicação para o ataque a aços a fim de se diferenciar a bainita e a martensita, e atacar diferentes tipos de carbonetos já foi confirmada em 1969 [LICH69]. Neste mesmo ano, publicou-se um artigo [GRÜT69], o qual mostra resultados de ataques coloridos na matriz de três tipos de aços inoxidáveis pelo método potencioestático. Tal método também possibilitou ataques a carbonetos com diferenciação de cores em aços rápidos e outros aços-ferramenta [LICH75]. Contudo, o sucesso do ataque potencioestático depende tanto do potencial aplicado, como do tempo de ataque e da solução escolhida para atuar como eletrólito.

O potencial pode ser definido por três métodos:

- a) Através da comparação de curvas de polarização de corpos-de-prova unifásicos podem ser identificados máximos de corrente anódica para cada uma das fases. A existência de potenciais afastados pode permitir um ataque seletivo da amostra polifásica [HABR68];
- b) Obtida a curva de polarização de uma determinada amostra, procede-se o estudo exploratório dos potenciais capazes de produzir ataque na amostra: máximos de densidade de corrente anódica, potenciais da região transpassiva e, no caso de materiais que formam películas aderentes como produtos de corrosão, potenciais da região passiva [HERB78, WORC94, MAGN94], e
- c) Levantar curvas de densidade de corrente vs tempo de ataque em determinados potenciais, observando a resposta metalográfica da amostra e associando-a a curva de densidade de corrente vs tempo correspondente [GRÜT69].

O tempo determina quando o ataque já é o suficiente para que se revele a microestrutura, assim como, se foram desenvolvidas condições óticas para o contraste de cores.

Já para a solução a ser utilizada como eletrólito deve-se levar em conta as variáveis: pH, natureza dos componentes, e aditivos por ventura utilizados (pois estes aumentam a densidade de corrente, encurtando o tempo de ataque), por exemplo, KCNS [STAN90].

Segundo, Grützner e Schüller, a solução eletrólito deve conter outras propriedades, sendo elas [GRÜT69]:

- a) transparência:
- b) alta solubilidade dos íons formadores de películas nos valores de menor valência, e de pouca solubilidade dos íons de maior valência:
- c) o corpo-de-prova não deve ser atacado pelo eletrólito, e
- d) apresentar o maior intervalo de polarização na região anódica passiva possível, pois assim a taxa de formação das películas pode ser regulada potencioestaticamente numa larga faixa.

Finalizando, a metalografia colorida, produzindo contraste de cores entre os microconstituintes da amostra, possibilita uma análise metalográfica quantitativa mais apropriada e sua prática tem-se mostrado possível pelos ataques potencioestáticos.

No entanto, o uso do potencioestado pode ser estendido para auxiliar na construção de diagramas de fases[EDEL57], estudos para proteção catódica e para corrosão: intergranular, galvânica, por fadiga, atmosférica, por pite e por fresta[HACK85].

Um exemplo de ataque potencioestático foi o realizado a um aço Cr-Ni-Co [HABR68], que apresenta um grande intervalo de passivação na sua curva de polarização.

Obteve-se, separadamente, as curvas de polarização para as fases ferrita  $\delta$  e austenita, utilizando matrizes de dois aços diferentes da liga em questão, e que só apresentavam, um deles ferrita  $\delta$  e o outro austenita.

A partir destas curvas, determinou-se os potenciais que promoveriam uma maior taxa de ataque para cada uma dessas fases.

O ataque conseguiu revelar separadamente na liga que apresentava na matriz as duas fases, uma das fases em potenciais distintos. Veja Figura 3, na página seguinte.

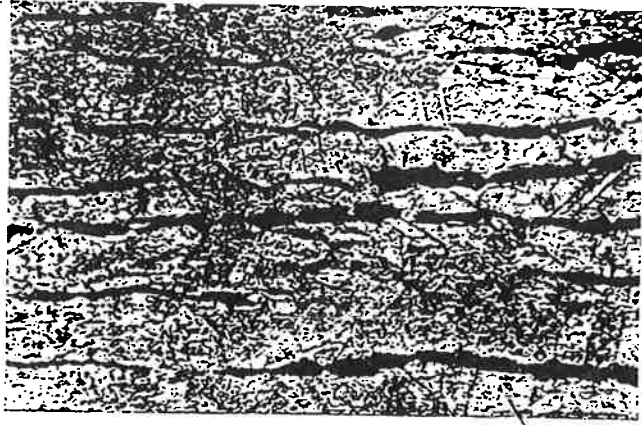
---

**Legenda da Figura 3 da página seguinte** - Ataque potencioestático ao aço contendo 0,05% C, 22,1% Cr, 7,8% Ni e 7,1% Co, num eletrólito de 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> contendo 0,1g de tiocianato de amônio. Fotos:

*foto 1:* ataque a -0,23V, por 30 segundos. Neste potencial a ferrita  $\delta$  (regiões pretas) é "ativa", dissolvendo-se rapidamente e contrasta com a austenita (região clara) não atacada.

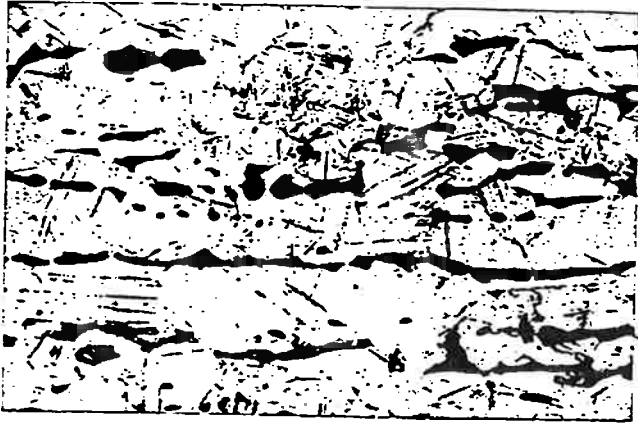
*foto 2:* ataque a -0,06V por 30 segundos. A matriz de austenita agora se dissolve. Surgem pites alinhados em relação a orientação do reticulado cristalino da matriz. Acredita-se ser resultante do encruamento da superfície devido ao polimento.

*foto 3:* mesmo ataque representado pela foto 2, no entanto o tempo de ataque foi aumentado para 30 segundos.



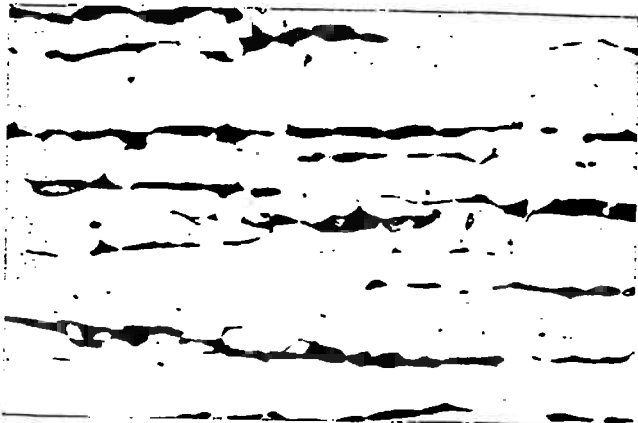
3

500:1



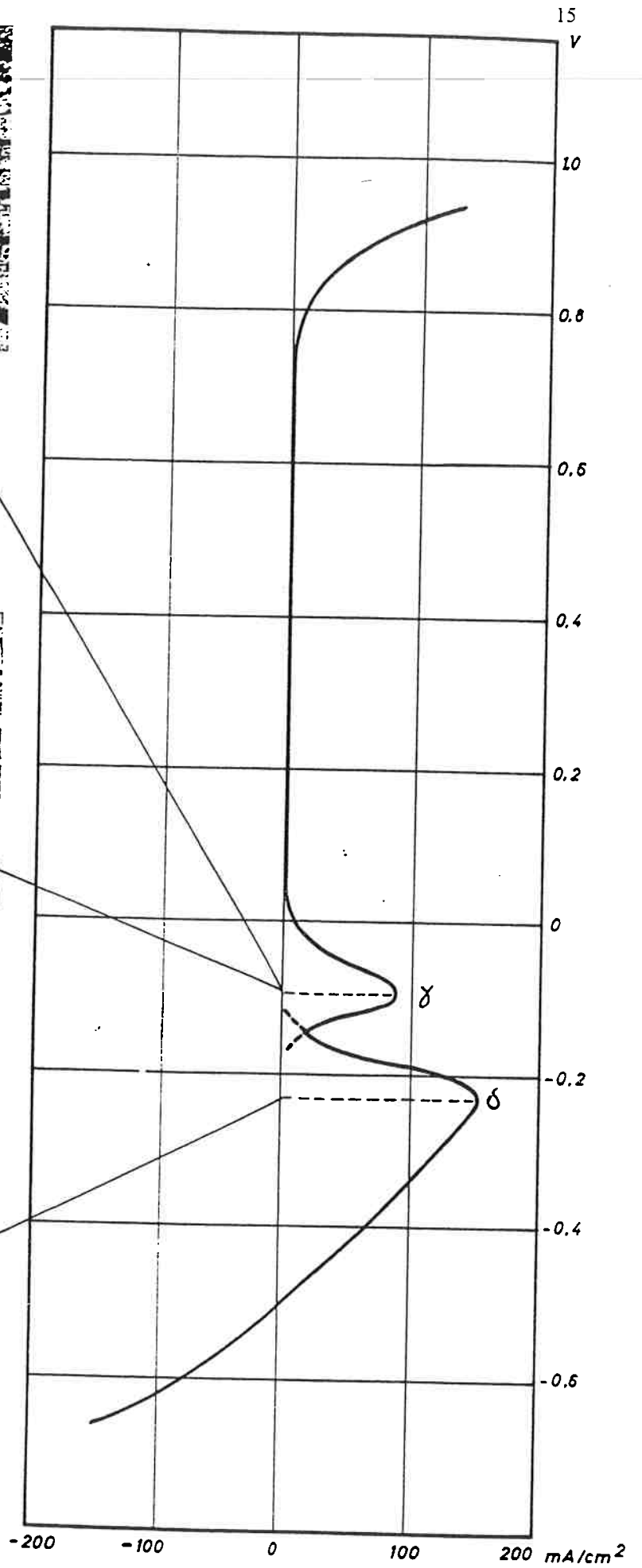
2

500:1



1

500:1



## 3.2 Os aços rápidos

### 3.2.1 Introdução geral

Os aços rápidos são aços produzidos, principalmente, para a confecção de ferramentas de corte utilizadas em operações de alta velocidade.

A origem do aço rápido parece ter sido uma descoberta acidental de Robert F. Mushet em 1868, quando um aço contendo 2% de carbono, 7% de tungstênio e 2,5% de manganês, foi temperado ao ar de uma temperatura da qual muitos aços precisariam ser temperados em água para sofrerem o mesmo endurecimento, dotando esse aço de um desempenho de corte muito melhor que os aços utilizados até então [CESC91].

Na década seguinte, o manganês foi substituído pelo cromo e os aços temperáveis ao ar do tipo tungstênio-cromo passaram a predominar. No entanto, todas as habilidades deste tipo de aço não foram percebidas até posteriores experimentos feitos por Taylor e White, da Bethlen Steel, datados de 1898 [HOYL88], os quais revelaram que certos aços com mais de 14% W, aproximadamente 4% Cr e 0,3% V, exibiam a chamada "red hardness", isto é, resistência ao amolecimento a temperaturas suficientemente altas em que o aço emite radiação na parte vermelha do espectro visível [MET80]. Como resultado do trabalho de Taylor e White desenvolveu-se, parcialmente, o aço rápido ao tungstênio conhecido comercialmente como AISI T1, que em 1910 teve sua composição definida pela Crucible Steel Company, contendo 18% W, 4% Cr, 1% V e 0,68% C. O teor de carbono no aço T1 foi aumentado gradualmente por um período de 30 anos até atingir o presente teor de 0,75% [META90].

A possibilidade de substituição de tungstênio por molibdênio já era conhecida no início do século e o próprio Taylor experimentou-a na proporção de 2:1. Os resultados obtidos foram heterogêneos e atribuídos a uma maior dificuldade na têmpera desses aços [CESC91], pelo fato de o aço só ao molibdênio possuir muitas desvantagens como a descarbonetação e a liquação. A escassez do tungstênio na Alemanha e na Áustria durante a I Guerra Mundial, acarretou em tentativas de

substituição parcial deste elemento pelo molibdênio [RIED87]. No entanto, esses aços ao molibdênio ou ao molibdênio e tungstênio não foram muito bem aceitos comercialmente na época.

Durante a II Guerra Mundial e particularmente a Guerra na Coréia, novas restrições às importações do tungstênio estimularam uma nova onda de inovações e a aceitação comercial dos aços rápidos ao molibdênio, como o AISI M1, onde quase todo o molibdênio substituía o tungstênio, e ao molibdênio e tungstênio, AISI M2, onde uma porcentagem de tungstênio era substituída pelo molibdênio.

Tão logo acabou a guerra o aço T1, que era largamente utilizado começou a ser superado em produção, sobretudo pelo aço rápido M2.

Ano	Produção do aço T1	Produção do aço M2
1945	57,7 %	24,4 %
1951	15,9 %	50,9 %
1952	7,1 %	52,6 %

Tabela 1 - Porcentagem de produção dos aços T1 e M2 [ROBE62]

A AISI, American Iron and Steel Institute, dividiu os aços rápidos em dois grupos: o grupo T (aços rápidos ao tungstênio) e o grupo M (de aços rápidos ao molibdênio e ao molibdênio e tungstênio). Sendo que, os aços do grupo M representam uma parcela superior a 95% dos aços rápidos produzidos nos Estados Unidos. O fato pelo qual o grupo M supera em produção o grupo T deve-se ao custo inicial dos aços do grupo M ser aproximadamente 40% menor que os aços do grupo T, pois o peso atômico do molibdênio é aproximadamente a metade do tungstênio [META90]. Isto significa na prática que 1,0% em peso de molibdênio pode substituir de 1,6% a 2,0% em peso de tungstênio num aço rápido mantendo estrutura e propriedades muito semelhantes [ROBE80].

Tem-se na Tabela 2, na próxima página a composição nominal atual desses principais aços rápidos.

Tabela 2 - Composição dos principais aços-rápidos [META80]

Designações	Composições (em %)										
	AI	SI	C	Mn	SI	Cr	N	Mb	W	V	Co
<b>Aços-rápidos ao molibdênio</b>											
M1	TI1301	0,78-0,88	0,15-0,40	0,20-0,50	3,50-4,00	0,30 máx	8,20-9,20	1,40-2,10	1,00-1,35	—	—
M2	TI1302	0,78-0,88; 0,95-1,05	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,50	0,30 máx	4,50-5,50	5,50-6,75	1,75-2,20	—	—
M3	TI1313	1,00-1,10	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,50	0,30 máx	4,75-6,50	5,00-6,75	2,25-2,75	—	—
M5	TI1323	1,15-1,25	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,50	0,30 máx	4,75-6,50	5,00-6,75	2,75-3,75	—	—
M4	TI1304	1,25-1,40	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,75	0,30 máx	4,25-5,50	5,25-6,50	3,75-4,50	—	—
M6	TI1306	0,75-0,85	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,50	0,30 máx	4,50-5,50	3,75-4,75	1,30-1,70	11,00-13,00	—
M7	TI1307	0,97-1,05	0,15-0,40	0,20-0,55	3,50-4,00	0,30 máx	8,20-9,20	1,40-2,10	1,75-2,25	—	—
M10	TI1310	0,84-0,94; 0,95-1,05	0,10-0,40	0,20-0,45	3,75-4,50	0,30 máx	7,75-8,50	—	1,80-2,20	—	—
M30	TI1330	0,75-0,85	0,15-0,40	0,20-0,45	3,50-4,25	0,30 máx	7,75-9,00	1,30-2,30	1,00-1,40	4,50-5,50	—
M33	TI1333	0,85-0,92	0,15-0,40	0,15-0,50	3,50-4,00	0,30 máx	9,00-10,00	1,30-2,10	1,00-1,35	7,75-8,75	—
M34	TI1334	0,85-0,92	0,15-0,40	0,20-0,45	3,50-4,00	0,30 máx	7,75-9,20	1,40-2,10	1,90-2,30	7,75-8,75	—
M36	TI1336	0,80-0,90	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,50	0,30 máx	4,50-5,50	5,50-6,50	1,75-2,25	7,75-8,75	—
M41	TI1341	1,05-1,15	0,20-0,60	0,15-0,50	3,75-4,50	0,30 máx	3,25-4,25	6,25-7,00	1,75-2,25	4,75-5,75	—
M42	TI1342	1,05-1,15	0,15-0,40	0,15-0,65	3,50-4,25	0,30 máx	9,00-10,00	1,15-1,85	0,95-1,35	7,75-8,75	—
M43	TI1343	1,15-1,25	0,20-0,40	0,15-0,65	3,50-4,25	0,30 máx	7,50-8,50	2,25-3,00	1,50-1,75	7,75-8,75	—
M44	TI1344	1,10-1,20	0,20-0,40	0,30-0,55	4,00-4,75	0,30 máx	6,00-7,00	5,00-5,75	1,85-2,20	11,00-12,25	—
M46	TI1346	1,22-1,30	0,20-0,40	0,40-0,65	3,70-4,20	0,30 máx	8,00-8,50	1,90-2,20	3,00-3,30	7,80-8,80	—
M47	TI1347	1,05-1,15	0,15-0,40	0,20-0,45	3,50-4,00	0,30 máx	9,25-10,00	1,30-1,80	1,15-1,35	4,75-5,25	—
<b>Aços-rápidos ao tungstênio</b>											
T1	TI2001	0,65-0,80	0,10-0,40	0,20-0,40	3,75-4,00	0,30 máx	—	17,25-18,75	0,90-1,30	—	—
T2	TI2002	0,80-0,90	0,20-0,40	0,20-0,40	3,75-4,50	0,30 máx	1,00 máx	17,50-19,00	1,80-2,40	—	—
T4	TI2004	0,70-0,80	0,10-0,40	0,20-0,40	3,75-4,50	0,30 máx	0,40-1,00	17,50-19,00	0,80-1,20	4,25-5,75	—
T5	TI2005	0,75-0,85	0,20-0,40	0,20-0,40	3,75-5,00	0,30 máx	0,50-1,25	17,50-19,00	1,80-2,40	7,00-9,50	—
T6	TI2006	0,75-0,85	0,20-0,40	0,20-0,40	4,00-4,75	0,30 máx	0,40-1,00	18,50-21,00	1,50-2,10	11,00-13,00	—
T8	TI2008	0,75-0,85	0,20-0,40	0,20-0,40	3,75-4,50	0,30 máx	0,40-1,00	13,25-14,75	1,80-2,40	4,25-5,75	—
T15	TI2015	1,50-1,60	0,15-0,40	0,15-0,40	3,75-5,00	0,30 máx	1,00 máx	11,75-13,00	4,50-5,25	4,75-5,25	—

São 32 os tipos de aços rápidos produzidos comercialmente, que diferem nos teores dos elementos de liga. Possuindo um conteúdo muito grande desses elementos, estes combinados com carbono suficiente para gerar carbonetos na estrutura tratada termicamente, os aços rápidos obtêm uma dureza mínima de 63 HRC **[ROBE80]**.

Outras propriedades, como: temperar o aço atingindo temperaturas menores apenas que 65°C do seu ponto de fusão; possuir dureza uniformemente distribuída pela superfície do corte transversal, devido a sua alta temperabilidade; exibir dureza secundária quando revenidos a temperaturas entre os 500°C-600°C; poder ser temperado próximo da dureza máxima por resfriamento ao ar; e, ter resistência ao revenimento a temperaturas elevadas, estão presentes nos aços rápidos **[ROBE80]**.

Deve-se ressaltar, no entanto, que as principais características de um aço rápido são a elevada dureza e a elevada resistência ao desgaste. E, tanto o grupo M como o grupo T possuem alta temperabilidade e propriedades mecânicas similares.

Atualmente as aplicações mais típicas dos aços rápidos incluem ferramentas de corte de todas as espécies como brocas, alargadores de furo e fresas. Alguns tipos são utilizados em ferramentas para trabalho à frio, como punções, matrizes de recortar discos, e matrizes de laminadores de roscas **[META90,VILL92]**. Recentemente, o uso do aço rápido se estendeu a mancais para motores de aeronaves à jato e para componentes de veículos espaciais **[HOYL88]**.

### 3.2.2 Os dois grupos de aços rápidos

#### 3.2.2.1 Grupo T

O grupo T possui como principais elementos de liga: W, Cr, V, Co e C. Os aços deste grupo possuem alta dureza quando temperados e grande resistência ao desgaste, e essa combinação permite que estes aços sejam utilizados para muitas aplicações de corte com altíssimos desempenhos **[META90]**.

Um aumento no conteúdo de cobalto acarretará, para um aço do grupo T, um aumento da "red hardness" com uma certa perda de tenacidade **[META90]**.

A têmpera é profunda quando as temperaturas de austenitização se acham entre 1205°C e 1300°C. A dureza máxima varia com a taxa de carbono e, em menor grau, com o conteúdo de elementos de liga, chegando a 64,5 HRC em qualquer aço rápido do grupo. Alguns, como o T15, com alto teor de carbono e carbonetos duros, podem atingir 67 RHC de dureza **[META90]**.

### 3.2.2.2 Grupo M

O grupo M possui como principais elementos de liga o Mo, W, Cr, V, Co e o C. Neste grupo encontram-se os aços rápidos que tiveram todo ou uma parte do tungstênio substituído pelo molibdênio, visto que a relação custo/benefício é vantajosa já que 1,0% Mo em peso pode substituir de 1,6% até 2,0% W em peso **[META90]**.

Os aços deste grupo possuem tenacidade um pouco maior que o grupo T tomando-se como referência a mesma dureza. São mais sensíveis que o grupo T às condições de têmpera (temperatura de austenitização e a atmosfera), que causam a descarbonetação superficial, ocorrência prejudicial provocada pelo molibdênio presente **[METα80, ROBE80]**.

A têmpera é profunda, e os aços desse grupo devem ser austenitizados a temperaturas menores que as usadas para os aços do grupo T para evitar fusão incipiente. Apresentam dureza plena quando temperados de temperaturas entre 1175°C - 1230°C. A dureza máxima varia com a composição do aço, e para os com menor teor de carbono (M2, M1, M10, M30, M33, M34, M36) atinge 65HRC. Mas, para os aços da série M40 (M41, M42, M43, M44, M46) a dureza máxima pode chegar a 69-70 RHC. No entanto, os aços dessa série encontram poucas aplicações industriais devido a baixa tenacidade provocada por essa dureza alta. Comumente, o tratamento térmico realizado visa durezas de 66 a 68 RHC **[META90]**.

O tipo M2 e outros componentes do grupo M, comumente não têm grande resistência ao amolecimento a elevadas temperaturas, como resultado do alto teor em elementos de liga **[META90]**.

### 3.2.3 Os carbonetos presentes

#### 3.2.3.1 Carbonetos primários

Os carbonetos primários são aqueles formados a partir da solidificação do aço. Os tipos, a quantidade e a forma destes carbonetos têm uma influência direta na resistência ao desgaste dos aços rápidos. Já a distribuição espacial e o tamanho dos carbonetos primários, junto com a condição de revenimento, determinam a tenacidade do material.

Os carbonetos primários são os  $M_6C$ ,  $MC$  e/ou  $M_2C$  (este carboneto não aparece como carboneto primário no aço M2) [HABE73].

#### 3.2.3.2 Carbonetos secundários

Os carbonetos secundários podem se formar nas seguintes etapas :

##### 3.2.3.2.1 Precipitação durante o recozimento

No recozimento pleno a precipitação de carbonetos ocorre tanto por nucleação e crescimento quanto por crescimento dos carbonetos primários. Os carbonetos que precipitam são dos tipos  $M_6C$  e  $M_{23}C_6$  (este carboneto é exclusivamente secundário e só surge nas temperaturas de recozimento) [CESC91].

##### 3.2.3.2.2 Precipitação a partir da austenita durante o resfriamento

Durante o aquecimento do aço para a têmpera, ocorre a dissolução parcial dos carbonetos  $M_6C$ ,  $MC$  e se a temperatura for superior a  $1090^\circ\text{C}$  todos os carbonetos  $M_{23}C_6$  estarão dissolvidos na austenita. Ao se proceder o resfriamento da austenita, ocorre uma reduzida precipitação de carbonetos, preferencialmente nos contornos de grão, fato que pode ser verificado pela maior facilidade em se delinear os contornos de grão no exame metalográfico [CESC91]. Exames por microscopia

eletrônica de transmissão evidenciaram tratar-se de precipitação de carbonetos do tipo MC [ROSE59].

### 3.2.3.2.3 Precipitação durante o revenimento

Durante um primeiro estágio (105-250°C), ocorre a formação de uma nova fase de transição, que é a do carboneto instável  $\epsilon$  através da precipitação de carbono da martensita. Num segundo estágio (250-500°C), desaparece o carboneto  $\epsilon$  que dá lugar a cementita. E, num terceiro estágio (500-680°C), a cementita que se redissolveu na matriz é substituída pelos carbonetos MC e  $M_2C$  que precipitam da matriz promovendo o efeito da dureza secundária [PACY84].

### 3.2.3.3 Caracterização dos carbonetos

#### 3.2.3.3.1 $M_6C$

É um carboneto rico em tungstênio ou molibdênio, podendo ser primário ou secundário, de estrutura CFC, e estequiometria próxima a  $Fe_4(W,Mo)_2C$  ou  $Fe_3(W,Mo)_3C$ .

Ele também é capaz de dissolver algum cromo, vanádio e cobalto. E, resiste a dissolução na austenita ao ser aquecido fornecendo ao aço resistência a abrasão [ROBE80].

#### 3.2.3.3.2 MC

É um carboneto rico em vanádio, de estrutura CFC do tipo NaCl. Devido a sua grande tendência de formação, o MC sempre aparece nos aços, não importando o teor de carbono. Para uma certa quantidade de vanádio se observará um maior número de carbonetos MC nos aços com predomínio de molibdênio do que nos aços com predomínio de tungstênio na composição [ROBE80].

O MC é um carboneto muito compacto, muito duro, e por ser um carboneto primário tem uma dissolução difícil mesmo em temperaturas muito altas. Conseqüentemente, a maioria de MC permanece no aço temperado. A pequena quantidade dissolvida reprecipita no revenimento e, serão responsáveis pela dureza secundária observada nos aços rápidos que contêm vanádio em suas composições [ROBE80, HOYL88].

Como um efeito somente de comparação entre as durezas dos carbonetos, a martensita e a cementita, o MC é o mais duro, e a ordem decrescente de dureza é a seguinte:



#### 3.2.3.3.3 $M_{23}C_6$

É um carboneto secundário, rico em cromo, de estrutura CFC e nele o ferro tem alta solubilidade. Esse carboneto estará completamente dissolvido na austenita a uma temperatura de aproximadamente 1090°C [ROBE80].

Esse carboneto é capaz de dissolver ferro (Fe), molibdênio (Mo), tungstênio (W) e vanádio (V). Quando suficientes teores de molibdênio e tungstênio estão presentes nesse carboneto, o cromo pode ser totalmente substituído pelo ferro [ROBE80].

#### 3.2.3.3.4 $M_2C$

É um carboneto rico em tungstênio ou molibdênio, de estrutura HC e nele, o cromo, ao contrário do ferro, encontra grande solubilidade [ROBE80].

Este carboneto aparece durante a solidificação de certos aços e após têmpera seguida por um revenimento próximo do pico de dureza secundária, fenômeno pelo qual acredita-se que esse carboneto também seja responsável. Revenimentos posteriores, em temperaturas mais altas ou tempos mais prolongados, causam o desaparecimento do  $M_2C$  em favor do  $M_6C$  ou  $M_{23}C_6$  ou de ambos [ROBE80].

### 3.2.4 Os principais efeitos dos elementos de liga

Os teores dos elementos de liga, especificados para a composição química de um aço rápido, devem ser obedecidos, pois, só assim, haverá uma combinação entre eles que resultará nas características e propriedades desejadas para o uso deste aço. Para isso, é preciso estudar o comportamento de cada elemento, separadamente, ao ser adicionado ou variado num aço.

#### 3.2.4.1 Carbono

O conteúdo de carbono nos aços rápidos variam de 0,7% a 1,6% C. Variações no teor de carbono já fixado para um aço pode causar importantes mudanças nas propriedades mecânicas e na habilidade de corte da ferramenta [ROBE80].

O carbono é indispensável para a formação dos carbonetos, reforçando a sua contribuição na resistência ao desgaste, na tenacidade e no fenômeno da dureza secundária de um aço rápido.

Com a diminuição do teor de carbono do aço, a matriz terá o seu teor de carbono após a têmpera, também reduzido, o que pode acarretar a formação de uma apreciável quantidade de ferrita na temperatura de austenitização. Este fato resulta na diminuição da dureza do aço temperado, o que é seguido por uma dureza também menor após o revenimento a temperaturas intermediárias [ROBE80].

Aços rápidos com maiores teores de carbono apresentarão um aumento na porcentagem de austenita retida na têmpera, dificultando sua transformação completa durante o revenimento, o qual precisará de tempos mais prolongados ou, mesmo, de múltiplos revenimentos.

Com o aumento de carbono no aço, a proporção de carbonetos aumentará, causando uma melhor resistência ao desgaste. Finalmente, um aumento de carbono dissolvido na austenita aumentará sua estabilidade tanto na têmpera como no revenimento [ROBE80], e certamente aumentará a dureza do aço [HABE73].

**Edmund Haberling et al** publicaram num trabalho em **1973** o comportamento do carbono num aço rápido do tipo AISI M2. Observaram nos testes de torsão que, elevados teores de carbono estão associados a baixa tenacidade, mesmo que se tenha a mesma dureza nos aços do tipo M2 com diferentes teores de carbono [HABE73].

Por fim, um aumento na quantidade de carbono diminuirá o ponto de fusão. Tal fato, no entanto, não significa necessariamente que o tamanho do grão será maior para qualquer temperatura adotada no tratamento térmico, pois um aumento de carbono no aço rápido aumentará o número de carbonetos não dissolvidos na matriz, os quais dificultarão o crescimento dos grãos [ROBE80].

#### 3.2.4.2 Tungstênio

O tungstênio é o principal elemento constituinte dos aços do grupo T, encontrando-se presente, mas em menor quantidade, em aços molibdênio-tungstênio do grupo M e em ínfimos teores (0,20-0,75%) nos aços ao molibdênio, ressaltando que estes teores não foram adicionados intencionalmente, mas entraram na composição pelo fato do tungstênio estar presente na sucata empregada em sua elaboração [ROBE80].

O tungstênio forma um carboneto complexo, o  $M_6C$ , com o ferro e o carbono, que será responsável pela alta resistência ao desgaste nos aços rápidos. Quando dissolvidos na matriz após a têmpera, o tungstênio com muita dificuldade precipitará no revenimento, e quando isso ocorrer, com uma temperatura de revenimento que deverá estar entre 510°C e 590°C, será na forma de  $M_2C$  e  $MC$ , que contribue para a dureza secundária do aço. Quando a temperatura ultrapassar os 650°C, então haverá a precipitação do carboneto  $M_6C$  [ROBE80].

Aumentando-se o teor de tungstênio, aumenta o número de carbonetos e a quantidade desse elemento dissolvido na matriz também aumenta na têmpera. E, caso seja mantido o teor de carbono, grande quantidade de tungstênio causará o aparecimento de ferrita [ROBE80], já que o tungstênio aumenta a instabilidade da austenita por ser um elemento ferritizante.

Quando o tungstênio for predominante, então os aços rápidos terão um conteúdo entre 12-20% W. Destes aços, os que possuírem as concentrações mais baixas de tungstênio, quando aquecidos a altas temperaturas, apresentarão granulação grosseira e serão relativamente mais frágeis quando temperados para se obter máxima eficiência de corte. Além disso, esses aços terão menores pontos de fusão e conseqüentemente temperaturas mais baixas na têmpera [ROBE80].

Se diminuirmos o teor de W, deve-se adicionar mais vanádio para compensar essa perda, caso contrário o aço perderá um pouco em tenacidade e em sua resistência ao desgaste [ROBE80].

O tungstênio também contribuirá um pouco para as propriedades de temperabilidade, que é uma função do cromo, e muito para a resistência ao revenimento, ou "red hardness" [HOYL88].

#### 3.2.4.3 *Molibdênio*

O molibdênio é o principal constituinte do grupo M. E, em busca de se obter um compromisso entre as propriedades características do tungstênio e do molibdênio, certos aços rápidos do grupo M possuirão em suas composições ambos os elementos. Como resultado, o M2 que, se caracterizou por possuir uma composição em que melhor se conseguiu equilibrar as propriedades dentro de um aço-ferramenta, possuindo 4% Cr, 5% Mo, 6% W, 2% V e 0,85%C, teve uma aceitação muito grande no mercado mundial após o término da II Grande Guerra.

Este elemento formará os mesmos carbonetos que o tungstênio, respondendo assim pela dureza secundária e pela resistência ao desgaste [ROBE80].

A presença de molibdênio promoverá resistência ao revenimento, no entanto, diminuirá mais a temperatura do ponto de fusão do que o tungstênio. Logo os aços da série M terão uma menor temperatura de austenitização que os aços do grupo T [ROBE80].

Talvez o mais importante fator que dificulta a produção dos aços sem tungstênio é a grande tendência que eles têm em se descarbonetarem. GULYAEV num de seus

trabalhos com um aço contendo 1,3%C, 4,2%V e 4,2%Cr, observou que a adição de 1,0% de Mo duplica a profundidade de descarbonetação sobre as mesmas condições nos tratamentos térmicos. E, ao contrário do que se pensava no passado o molibdênio fica retido na matriz após a descarbonetação [ROBE80].

A austenita residual nos aços ao molibdênio é menos estável que nos aços ao tungstênio no revenimento, e, conseqüentemente podem ser revenidos a temperaturas 6°C menores. Por exemplo, o tempo para a completa transformação da austenita retida sobre uma temperatura de 540°C no revenimento no aço T1 é de 10h, enquanto que para o aço M10 é de 5h [ROBE80].

Estudos exploratórios mostram que a "red hardness" nos aços do grupo M é levemente menor que nos do grupo T. E, para compensar essa perda acrescenta-se, então, vanádio ou tungstênio nos aços ao molibdênio [HOYL88].

#### 3.2.4.4 Vanádio

O vanádio foi adicionado pela primeira vez nos aços rápidos em 1903. Originalmente era usado como um elemento de adição desoxidante para remover impurezas para a escória e reduzir a quantidade de nitrogênio retido no aço, mas notou-se que o vanádio aumentava a eficiência de corte dos aços rápidos [ROBE80]. Hoje está presente no aço rápido numa quantidade que vai de 1% a 5%.

O fato significativo a ser observado é que ao aumentar o teor de vanádio, o teor de carbono precisa ser aumentado, pois se for mantido constante, a dureza, conforme se aumentamos o teor de vanádio sofrerá após um certo teor uma queda brusca, devido a formação de carbonetos primários MC [ROBE80] que diminuem o teor de carbono da matriz.

LEMENT e COHEN [abud ROBE80] foram os primeiros a identificarem a presença do vanádio no carboneto MC. Este é o carboneto mais duro encontrado nos aços rápidos forjados, e promove a resistência a abrasão [ROBE80] e desgaste.

O vanádio age como refinador de grãos, pois seus carbonetos MC agem como barreiras para o crescimento dos grãos durante o tratamento térmico. Os carbonetos MC são extremamente difíceis de se dissolverem na austenitização e vão aumentando seu raio com a fração total de carbonetos [ROBE80].

O vanádio tem maior influência na resistência do que na dureza do aço. Um aumento no seu teor, quando propriamente balanceado com carbono, tem relativamente um pequeno efeito na tenacidade dos aços porque a composição da matriz sofre pequenas mudanças, e também causa um aumento considerável na estabilidade da austenita tanto na têmpera como no revenimento. Assim, um aço, como o M2 com 0,8%C e 1,5%V deverá passar 10h revenindo a 540°C enquanto que o M4, com 1,25%C e 4%V, precisará de 25h para transformar toda a austenita retida. Mesmo para se obter a dureza máxima, o M2 passa por um revenimento de 2h e o M4 por 5h [ROBE80].

O fato de o vanádio, como o tungstênio, ser um elemento ferritizante, quando ligado ao ferro, sugere que ele seja substituído por tal elemento nos aços rápidos. E, a equivalência tungstênio-vanádio baseada em testes de corte já foram comparadas [ROBE80].

#### 3.2.4.5 Cromo

Atualmente a porcentagem de cromo empregada é de 4,0%, pois parece dar o aspecto mais consistente nas diversas composições dos aços rápidos [HOYL88].

O papel do cromo é o de prover a temperabilidade do aço, prover o carbono necessário para o endurecimento da martensita através da dissolução dos carbonetos  $M_{23}C_6$  por ele formados nas temperaturas comuns de austenitização dos aços rápidos, e por retardar a precipitação e melhorar a distribuição dos carbonetos secundários no revenimento. Aprimora as propriedades de corte e retarda a oxidação superficial. Afirma-se que um aço rápido sem cromo é 8 vezes mais susceptível a oxidação do que um com 4,0% de cromo [HOYL88, CESC91].

Teores de cromo fora do normal de 4,0% têm sido investigados por muito tempo, sendo constatado que teores acima de 5% de cromo promovem a retenção de austenita em uma extensão inaceitável e desordena o balanceamento estequiométrico com o teor de carbono efetivo menor [HOYL88].

#### 3.2.4.6 Cobalto

O principal efeito do cobalto é o de aprimorar a “hot hardness” (ou resistência ao revenimento), e dessa forma melhorar a eficiência de corte quando a ferramenta atinge altas temperaturas nas suas operações.

Ele não é formador de carbonetos, estando presente dissolvido na matriz. Por exemplo, o aço T4 (5,0%Co, 0,75% C, 4,0%Cr, 1,0%V, 18%W) recozido possuirá 88% do conteúdo de cobalto na matriz e ao ser temperado este número pode chegar a 95% [ROBE80].

O cobalto também aumenta o ponto de fusão, deste modo dá oportunidade de se temperar o aço a partir de temperaturas superiores. O resultado disto é que mais carbonetos se dissolverão e isto aumentará a porcentagem de austenita retida. No entanto, este efeito é em parte compensado pelo fato de que o cobalto reduz a estabilidade da austenita, ao contrário do que se chegou a acreditar por muitos anos [ROBE80].

Já, para uma dada temperatura de têmpera, o aumento do teor de cobalto no aço reduzirá a quantidade de austenita retida. No entanto, quanto maior a temperatura a ser mantida na têmpera, a dureza medida após têmpera e revenimento duplo será maior quanto maior o teor de cobalto adicionado [HOYL88]. Há também um aumento na condutividade térmica com o aumento de cobalto, o que melhora a performance das ferramentas de corte confeccionadas.

Resultados que podem ser considerados como negativos ao se adicionar cobalto são uma ligeira redução na tenacidade, na resistência ao desgaste, e assim como o molibdênio, aumenta a tendência do aço em se descarbonetar durante os ciclos térmicos [ROBE80].

Embora por muitos anos a adição de cobalto chegasse próxima dos 15%, hoje em dia baseado em muitos trabalhos feitos sobre a influência do cobalto, parece que as concentrações mais adequadas desse elemento num aço se encontra entre 5% e 8% [HOYL88].

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e métodos utilizados no presente trabalho.

### 4.1 Material em Estudo

No presente trabalho, utiliza-se uma amostra de aço AISI M2, produzida pela empresa *Aços Villares S.A*, cuja composição química apresenta-se na Tabela 3. A amostra foi recebida na forma de uma barra quadrada de  $\frac{1}{2}$  polegada de lado, laminada e recozida.

Tabela 3 - Composição da barra de aço AISI M2 empregada neste estudo. (Análise química fornecida pela *Aços Villares*)

AÇO	% C	% Mo	% W	% V	% Cr	% Mn	% Si
M2	0,84	5,20	6,36	1,85	4,32	0,30	0,36

A microestrutura deste material (tal como recebido) é constituída de uma matriz ferrítica com os carbonetos  $M_6C$ ,  $MC$ ,  $M_{23}C_6$  dispersos entre os grãos de ferrita [ROBE80, HOYL88].

### 4.2 Tratamentos Térmicos

A barra de aço AISI M2 foi cortada em 14 pedaços aproximadamente iguais e de  $1\text{ cm}^3$ . Dividiu-se estes corpos-de-prova em dois grupos: o M2REC (amostras recozidas) e o M2TEM (amostras temperadas). Na Tabela 5 encontram-se os tratamentos térmicos a que foram submetidas as amostras.

Antes de as amostras serem condicionadas ao tratamento de têmpera, elas foram pré-aquecidas por aproximadamente dez minutos a  $150^\circ\text{C}$  em mufla e depois mergulhadas numa solução saturada de Bórax fervente. E, após o resfriamento das amostras formou-se uma película de proteção a uma eventual descarbonetação de grau indesejável.

Tabela 4 - Tratamentos térmicos realizados.

Identificação	Tratamento Térmico
M2REC	recozimento pleno, aquecimento de 820-870°C por 2h, seguido de resfriamento lento de 30°C/h até atingir 640°C, para resfriar ao ar calmo (material tal como recebido).
M2TEM	austenitização a 1200°C por 5 min e resfriamento em óleo (realizado no PMT/USP).

Após austenitização, seguida de têmpera, a matriz do aço M2 é composta por carbonetos primários e secundários não dissolvidos ( $M_6C$ , MC), precipitados de MC e uma matriz martensítica contendo baixíssima fração de austenita retida.

Na tabela 4 encontra-se a porcentagem de carbonetos no estado recozido e no estado temperado para o aço M2. A têmpera é profunda, e a resistência a descarbonetação é média.

Tabela 5 - Composição da matriz do aço M2 nos estados recozido e temperado [WILS75,HOYL88]

CARBONETO	AÇO RECOZIDO	AÇO TEMPERADO
$M_{23}C_6$	9%	0%
$M_6C$	16%	7.5%
MC	3%	1,5%
%vol Ferrita	Balanço	---
%vol Austenita	---	10
%vol Martensita	---	90

### 4.3 Dureza

As amostras foram lixadas até a lixa de grana #320, e então foram obtidos 10 pontos de dureza nas amostras.

A medida de dureza Brinell foi obtida usando-se uma esfera de  $\Phi 2,5\text{mm}$  e uma carga de 187,5 Kg.

#### **4.4 Preparação dos Corpos-de-Prova**

Após a determinação da dureza das amostras, os corpos-de-prova foram novamente lixadas até a condição de #600, embutidas em resina de cura a frio, e então preparadas metalograficamente até a condição superficial de  $1\mu\text{m}$ , estando assim as amostras preparadas para serem submetidas aos exames e ensaios especificados.

#### **4.5 Exame Metalográfico**

As amostras polidas foram submetidas a ataque em solução de NITAL 2%, a fim de se caracterizar a microestrutura, por microscopia óptica, das duas séries de corpos-de-prova. Obtiveram-se micrografias com aumento de 1000x, utilizando-se filme branco e preto ASA 400 TMAX 400 Kodak e papel fotográfico Kodabrome Print RcF3.

As fotos tiradas após os ensaios foram realizadas a partir de um microscópio acoplado a uma câmera fotográfica, o que permitiu a documentação colorida das amostras.

#### **4.6 Preparação do eletrólito de Acetato de Chumbo**

Para o preparo das soluções do eletrólito, utilizou-se reagentes padrão analítico e água destilada e deionizada. O pH das soluções foi medido com papel indicador universal MERCK 0-14, a fim de se verificar a constância do seu valor para que se eliminasse a variável pH dos resultados. O eletrólito possui acetato de chumbo em 5% de peso.

## 4.7 Ensaios Eletroquímicos

Os ensaios eletroquímicos, tanto os potenciodinâmicos como os potencioestáticos, foram conduzidos por um potencioestato PAR (*Princeton Applied Research*) modelo 273. Um microcomputador acoplado ao potencioestato e utilizado como registrador dos dados fornecidos pelo ensaio. Tal controle e internamente executado pelo programa nativo do potencioestato *Corrosion Measurement Software M-342*. Como eletrodo de referencia utilizou-se o de Calomelano Saturado (ECS), empregando-se também um capilar de Luggin contendo solução saturada em KCl como ponte salina. O contra-eletrodo utilizado foi o de platina de 1 mm de diâmetro na forma de espiral. O corpo-de-prova foi fixado por uma haste de aço INOX com a finalidade de suporte e contato elétrico. O seu isolamento de tubo de vidro impede qualquer contato da haste de aço INOX com o eletrólito.

A condição dos corpos-de-prova e a de polimento até a condição superficial de  $1\mu\text{m}$ . A temperatura do eletrólito no momento dos ensaios variava entre  $22^{\circ}\text{C}$  e  $24^{\circ}\text{C}$ .

### 4.7.1 Ensaios Potenciodinâmicos

Para todos os corpos-de-prova foram levantadas curvas de polarização potenciodinâmicas com as seguintes variáveis:

- (a) condição superficial: polimento até diamante de  $1\mu\text{m}$ ;
- (b) temperatura:  $23,0^{\circ}\text{C} \pm 1,0^{\circ}\text{C}$ ;
- (c) eletrólito: 5% peso de Acetato de Chumbo;
- (d) pH do eletrólito:  $\text{pH} = 6$  (medido com papel indicador);
- (e) velocidade de varrimento:  $1,0 \text{ mV/s}$ ;
- (f) potencial inicial: 0 oc (potencial de circuito aberto);
- (g) potencial final:  $1000 \text{ mV}_{\text{ECS}}$ , e
- (h) tempo de imersão: 0 s

#### **4.7.2 Ensaio Potenciostático**

Os ensaios potenciostáticos consistem em levantar curvas que investigam a variação da densidade de corrente em função do tempo para um metal. Como é realizado a potencial constante, tais ensaios são executados com a finalidade de propiciar um ataque eletroquímico a um ou mais microconstituintes na matriz seletivamente.

O ataque seletivo depende de duas variáveis importantes, uma delas é o potencial fixado e o outro é o tempo de ensaio. E, um dos métodos de determinação do potencial de ensaio, é a partir das curvas de polarização potenciodinâmicas identificar picos de máxima densidade de corrente quando eles existem.

Logo, os potenciais adotados para o estudo do aço AISI M2 serão apresentados após os resultados das curvas de polarização potenciodinâmicas.

#### **4.8 Limpeza dos Corpos-de-Prova após ensaios eletroquímicos**

Retirados da célula, deve-se lavar com água corrente o corpo-de-prova, seguida de um pouco de água deionizada e posterior enxarque com álcool etílico. Não podendo haver o contato de qualquer corpo na superfície da amostra. A seguir, os corpos-de-prova devem ser secados somente com ar quente corrente, para que a película formada não seja retirada ao se passar o algodão, procedimento comumente praticado em metalografia.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 Medidas de Dureza

Os valores obtidos de dureza, apresentados na Tabela 6, mostram o sucesso do tratamento térmico de tempera, pois o valor de 65 HRC esta dentro do esperado segundo o gráfico de curvas de dureza por condições de tratamento térmico do manual da Aços Villares S.A. [VILL92]

Tabela 6 - Resultados das medidas de dureza médias.

Amostra	Dureza média obtida
M2REC	(281,7 ± 8,0) HB
M2TEM	(64,1 ± 1,2) HRC

### 5.2 Exame Metalográfico

O exame metalográfico das amostras (M2REC, M2TEM) permitiu a obtenção das micrografias exibidas na página seguinte.

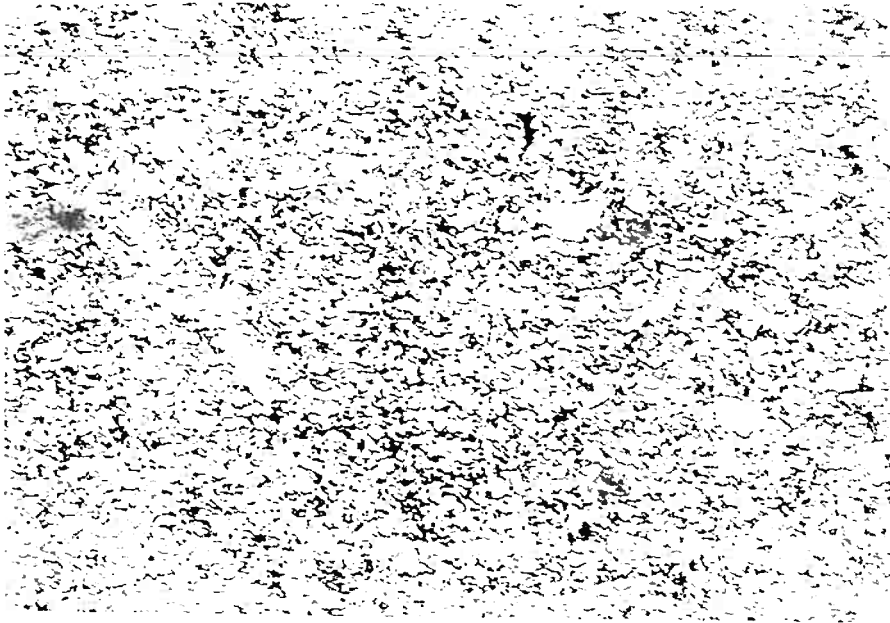


Figura 4: Corpo-de-prova M2REC, apresentando carbonetos primários e secundários em matriz ferrítica. Aumento: 1000x. Ataque: Nital 2%.

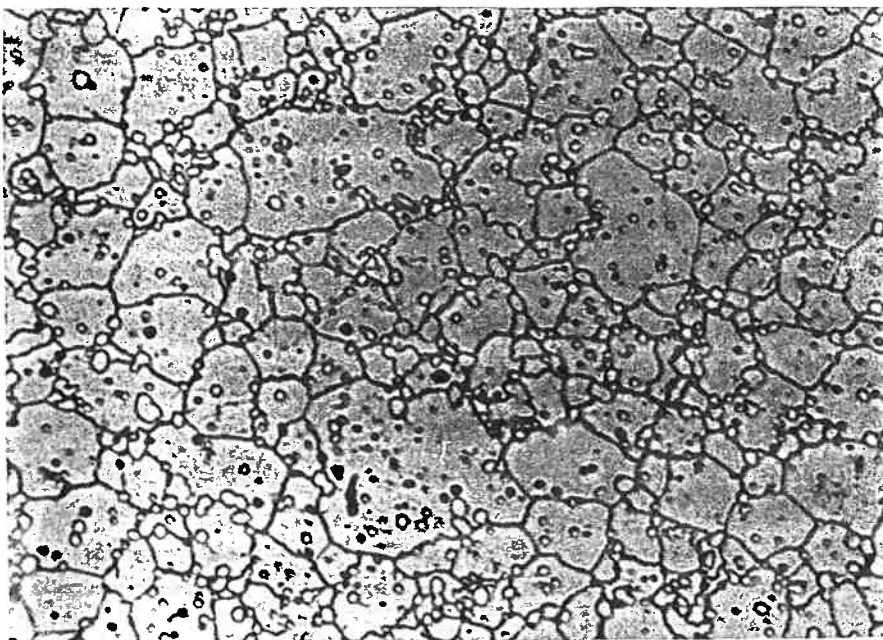


Figura 5: Corpo-de-prova M2TEM, apresentando uma matriz martensítica, carbonetos primários e secundários. Nota-se também que o ataque revelou os antigos contornos de grão austeníticos. Aumento: 1000x. Ataque: Nital 2%.

### **5.3 Caracterização do Eletrólito**

O eletrólito em estudo, o de acetato de chumbo, apresenta pH = 6,0 para todos os ensaios, medido com papel indicador.

### **5.4 Ensaios eletroquímicos Potenciodinâmicos**

#### **5.4.1 Resultado das Amostras Recozidas após Polarização potenciodinâmica**

As amostras recozidas seguiram as condições citadas na seção Materiais e Métodos.

A Figura 6 apresenta as curvas de polarização potenciodinâmicas obtidas para o material na condição recozida.

Nota-se a presença de trecho passivo, seguido de aumento da densidade de corrente, entre potenciais de 400 a 800mV<sub>,ECS</sub>. Este aumento pode ser devido ao fenômeno da transpassivação. Para potenciais mais elevados (900 a 1000mV<sub>,ECS</sub>), a densidade de corrente apresenta outro aumento da densidade corrente, provavelmente associado à reação anódica do oxigênio.

Durante o ensaio, notou-se que há formação de películas coloridas de maneira alternada, como anéis diminuindo de diâmetro, surgindo das arestas da amostra.

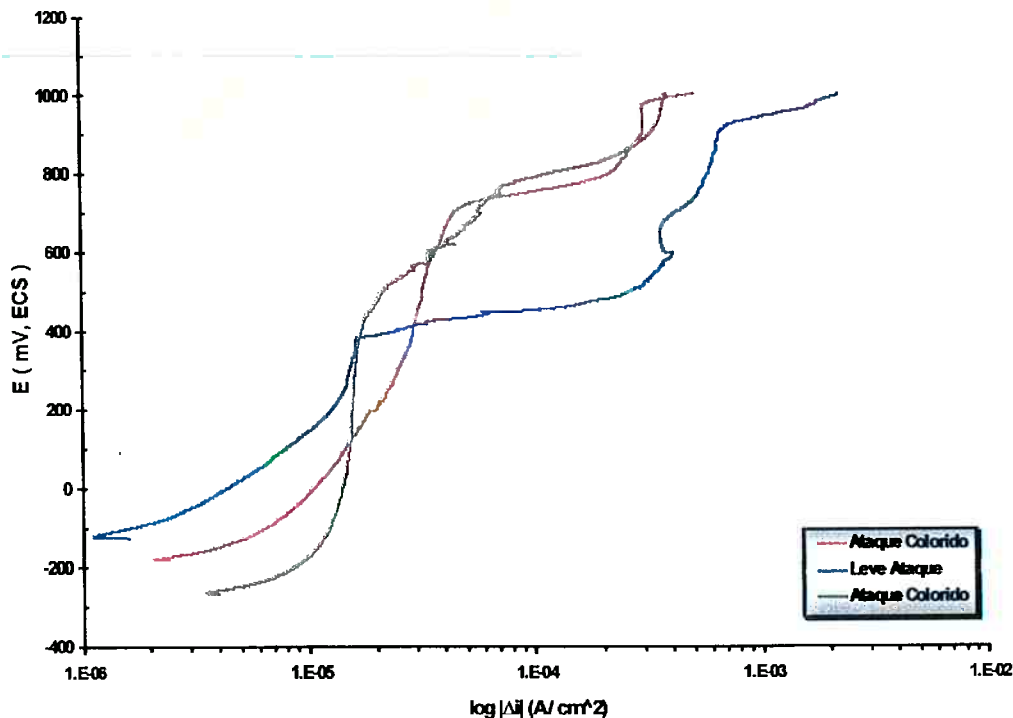


Figura 6 – Comportamento típico das curvas de polarização potenciodinâmica das amostras recozidas. A figura também indica uma curva que resultou em ataque colorido e outra que estava num estágio onde ainda não havia formação de filme colorido na superfície do metal e sim um leve ataque.

A sequência da formação do filme colorido ocorria com alternância, observando-se a seguinte sequência:

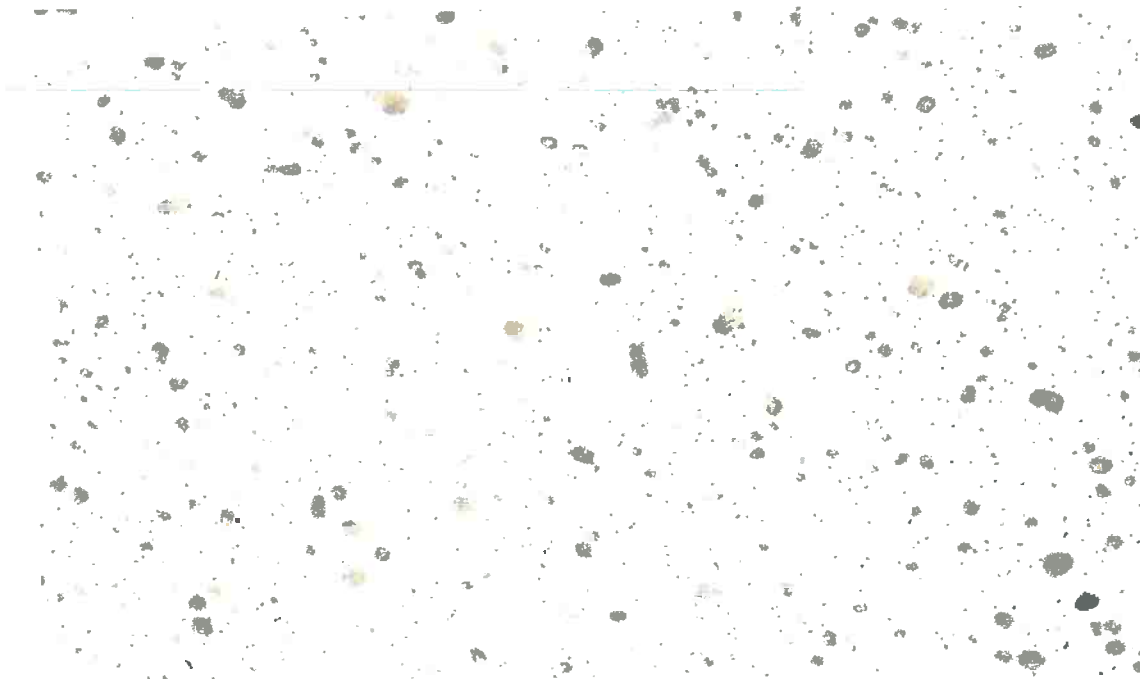


Figura 7 - Sequência das películas coloridas formadas.

Quanto a evolução de gases, esta não ocorreu de forma visível durante os ensaios para nenhuma das curvas de polarização potenciodinâmicas levantadas.

Após o levantamento das curvas de polarização as amostras (recozidas) foram examinadas em microscópio óptico. O resultado obtido está apresentado nas figuras 8 e 9.

Nota-se que com a polarização potenciodinâmica foi possível a revelação dos carbonetos do material recozido. Isso ocorreu pela formação de uma película colorida na matriz, enquanto os carbonetos permaneceram não atacados.



**Figura 8 – Micrografia da amostra recozida após curva de polarização, apresentando leve ataque. Aumento: 1000x.**



**Figura 9 – Micrografia da amostra recozida após curva de polarização, apresentando ataque colorido. Aumento:1000x.**

No entanto, nem sempre o resultado obtido foi satisfatório em termos de ataque metalográfico propriamente dito. Algumas vezes o resultado final revelava os carbonetos (figura 9) e outras vezes não (figura 8).

Por outro lado, com estes resultados, conclui-se que é viável a pesquisa de ataques seletivos, pois a formação de películas é um recurso que permite a diferenciação dos microconstituintes.

O objetivo do levantamento das curvas de polarização potenciodinâmicas era o de identificar a viabilidade desta pesquisa e também o de identificar possíveis potenciais de eletrodo que poderiam ser utilizados em ataques metalográficos potencioestáticos.

O primeiro objetivo foi atingido. Quanto ao segundo, os potenciais para ataques potencioestáticos são identificados através de máximos de densidade de corrente anódica.

Como se pode observar nas curvas potenciodinâmicas obtidas, não existem máximos de densidade de corrente para este sistema.

Por tal motivo, foram escolhidos para a continuidade do trabalho, como potenciais para ataques metalográficos, os potenciais de:

- **1150mv<sub>ECS</sub>** - pois potenciais inferiores mas próximos a este valor a formação de películas coloridas já é observada. E, a revelação de carbonetos ocorre, como visto pelas micrografias a seguir apresentadas após os ensaios
- **700mv<sub>ECS</sub>** - que é um potencial mencionado na literatura [MAGN96].

### 5.4.2 Resultado das Amostras Temperadas após Polarização potenciodinâmica

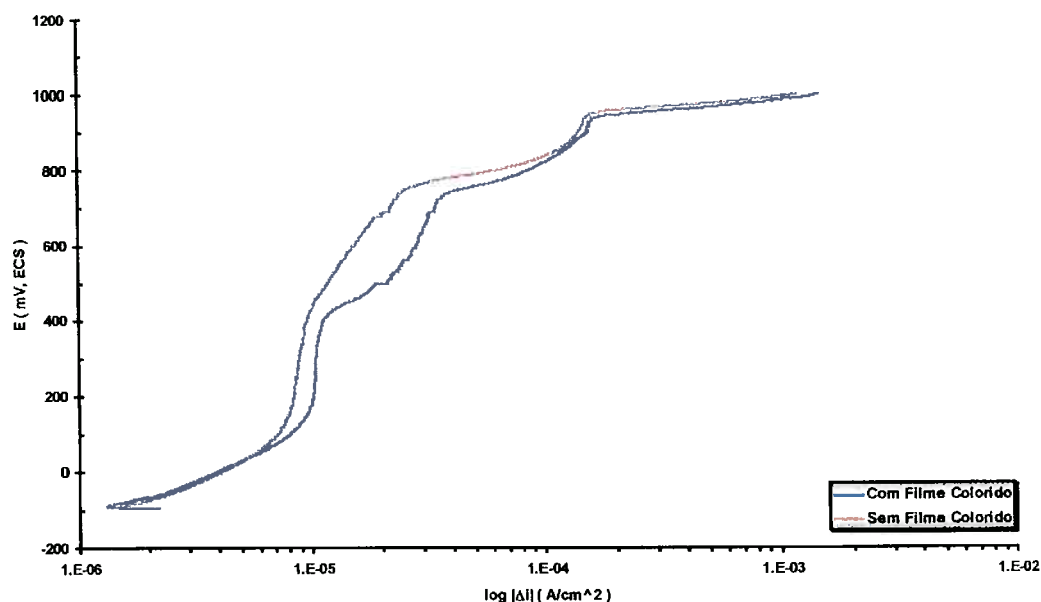
A seguir serão exibidos os resultados obtidos dos ensaios com a amostra temperada. Observa-se que o comportamento é semelhante ao da recozida.

Aqui também a curva inicia com trecho passivo, seguido de provável transpassivação e para potenciais mais elevados, ocorre a evolução de gás oxigênio (apesar de não ser possível sua visualização durante o ensaio).

A observação da amostra em microscópio óptico, após o levantamento da curva de polarização, também apresentou resultados semelhantes aos da condição recozida.

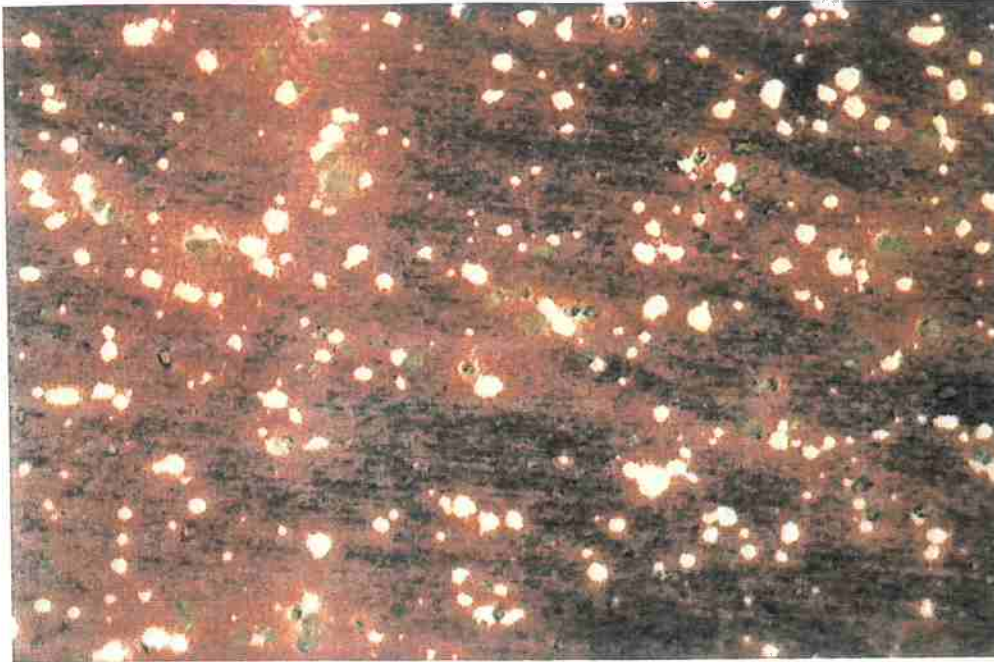
Como no caso anterior, aqui também se observou a ocorrência de uma sequência de cores durante a formação de películas.

Tendo em vista a semelhança de resultados das duas condições: recozida e temperada, aqui também foram escolhidos para o estudo potencioestático, os potenciais de  $1150\text{mV}_{\text{ECS}}$  e  $700\text{mV}_{\text{ECS}}$ .



**Figura 10 – Comportamento típico das curvas de polarização potenciodinâmica das amostras temperadas. A figura também indica uma curva que resultou em ataque colorido e outra que estava num estágio onde ainda não havia formação de filme colorido na superfície do metal.**

Na figura 11 nota-se a ocorrência de ataque mesmo não formado o filme colorido. Observa-se os carbonetos brancos na matriz de fundo amarronzado.



**Figura 11 – Micrografia da amostra temperada após curva de polarização, apresentando leve ataque. Aumento: 1000x.**



**Figura 12 – Micrografia da amostra temperada após curva de polarização, apresentando leve ataque. Aumento: 1000x.**

Na figura 12, tem-se o resultado da amostra temperada, com ataque. O filme colorido auxilia na observação dos carbonetos (brancos) revelados na matriz.

## 5.5 Ataques Potenciostáticos

Os ensaios potenciostáticos visam o ataque seletivo da amostra metálica, pois permite que um potencial seja fixado. As variáveis mais importantes desses ensaios que viabilizam resultados positivos são:

- tempo de imersão: permite reações na superfície do metal antes do ensaio
- potencial: potencial previamente determinado pelas curvas potenciodinâmicas
- tempo de ensaio: ou tempo de ataque, de tal forma que possa saber o momento certo de retirar a amostra para posterior análise metalográfica.

Serão apresentados os resultados para ambas as condições do aço AISI M2, em dois ataques diferentes. Um a  $700\text{mV}_{\text{ECS}}$  por 10 minutos e outro a  $1150\text{mV}_{\text{ECS}}$  por 2 minutos. As micrografias estão apresentadas ao lado dos gráficos.

A tabela 7 resume os resultados obtidos. O ataque que melhor revelou os carbonetos do aço AISI M2, nas condições recozida e temperada, foi o realizado a  $1150\text{mV}_{\text{ECS}}$  por 2 minutos.

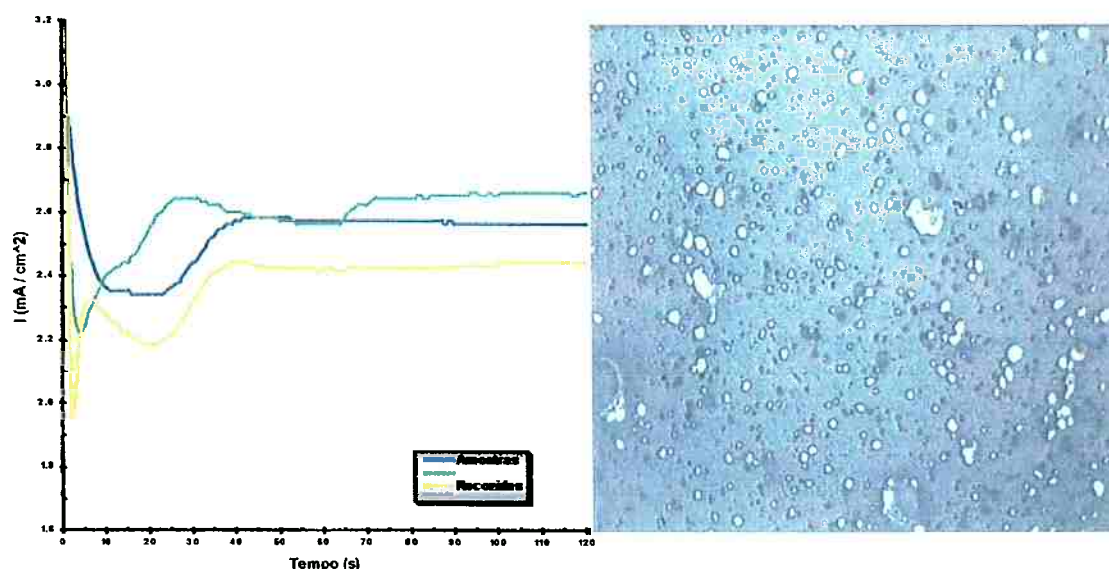
**Tabela 7 – Resultados e parâmetros dos ensaio potenciostático**

Amostra	Condição do Ensaio	Resultado
<i>Recozida</i>	- $1150\text{mV}_{\text{ECS}}$ - 2 minutos - Tempo de imersão nulo	- Película colorida - Carbonetos primários e secundários revelados - Comportamento Reprodutível - Demais microconstituintes não observados - Densidade de Corrente: entre $2.3$ e $2.6 \text{ mA/cm}^2$
<i>Recozida</i>	- $700\text{mV}_{\text{ECS}}$ - 10 minutos - Tempo de imersão nulo	- Produtos de corrosão levemente distribuídos - Nenhum Microconstituente observado - Densidades de Corrente quase nulas
<i>Temperada</i>	- $1150\text{mV}_{\text{ECS}}$ - 2 minutos - Tempo de imersão nulo	- Película Colorida - Carbonetos primários e secundários revelados - Comportamento Reprodutível - Demais microconstituintes não observados - Densidade de Corrente: entre $2.1$ e $2.4 \text{ mA/cm}^2$
<i>Temperada</i>	- $700\text{mV}_{\text{ECS}}$ - 10 minutos - Tempo de imersão nulo	- Resíduos de corrosão levemente distribuídos - Traços de Carbonetos - Demais constituintes não revelados - Densidades de Corrente quase nulas

### 5.5.1 Resultado para as amostras recozidas a $1150\text{mV}_{\text{ECS}}$ por dois minutos

Sob essas condições a amostra recozida apresentou ataque a sua microestrutura, revelando-se os seus carbonetos primários e secundários. Os demais microconstituintes não foram revelados, provavelmente resultado de uma corrosão generalizada da matriz.

As curvas tiveram comportamento reproduzível. As densidades de corrente ficaram entre  $2.3$  e  $2.6\text{ mA/cm}^2$  e quanto a revelação dos carbonetos, essa permitiu a visualizar o seu tamanho, distribuição, forma e fração presente devido ao contraste do filme colorido na superfície da amostra.



**Figura 13 – Curva Potencioestática e Micrografia das amostras recozidas. A  $1150\text{ mV}$  por  $120$  segundo. Micrografia com aumento de  $1000\times$ .**

A sequência da formação e alternância do filme colorido é a mesma previamente apresentada para os ensaios potenciodinâmicos.

Nota-se os carbonetos, microestrutura de cor branca sobressalente a matriz de fundo azul. Nota-se pela observação no microscópio que a matriz ao redor dos carbonetos sofreu corrosão preferencial permitindo verificar a forma dos carbonetos de maneira clara e perfeita.

Tempos de ataque de menores e maiores foram testados, mas a melhor micrografia ficou por volta dos dois minutos. E, em tempos inferiores a 1 minuto o ataque não permite a visualização dos microconstituintes.

### 5.5.2 Resultado para as amostras temperadas a $1150\text{mV}_{\text{ECS}}$ por dois minutos

Os resultados para as amostras temperadas, proporcionaram faixas para cada cor um pouco mais largas. No entanto, o resultado do ataque seletivo aos carbonetos é o mesmo das amostras recozidas.

A matriz ao redor dos carbonetos é atacada de maneira generalizada, revelando os carbonetos primários e secundários de cor branca que se destacam sobre o fundo da matriz colorida, seja ela no trecho de uma só cor, ou num ponto onde a mistura do amarelo com o vermelho e verde.

O resultado está apresentado na figura abaixo.

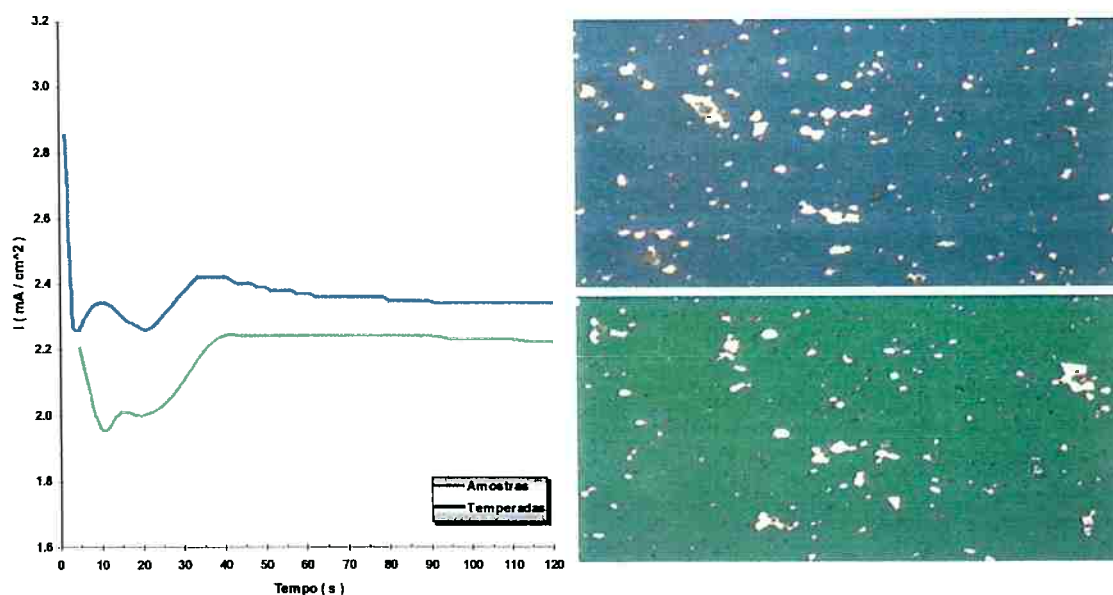


Figura 14 – Curva Potenciostática e Micrografia das amostras temperadas. A  $1150\text{ mV}$  por 120 segundos. Aumento de 1000x. Filme colorido na superfície.

Quanto a reprodutibilidade, verifica-se que o comportamento foi o mesmo. A faixa de densidade de corrente no ataque potenciostático ficou por volta dos  $2.3\text{ mA/cm}^2$ .

O tempo de 120 segundos, ou dois minutos, foi o suficiente para revelar os carbonetos presentes na matriz.

Foram realizados ensaios com tempos maiores e o resultado foi o mesmo. Logo, adotou-se para esse trabalho o tempo mínimo estabelecido que é de dois minutos. Tempos menores de 80 segundos não mostraram resultado para uma análise metalográfica satisfatória, e tal informação pode ser extraída também do gráfico.

Quanto a formação das faixas coloridas e quanto a sua alternância, continua sendo a mesma apresentada pelas curvas potenciodinâmicas.

### 5.5.3 Resultado para as amostras recozidas a $700\text{mV}_{\text{ECS}}$ por 10 minutos

A amostra recozida apresenta produtos de corrosão que podem estar associados aos carbonetos. Porém, esse tempo de 10 minutos não foi suficiente para atacar a microestrutura de forma seletiva, nem mesmo chegou-se a formar o filme colorido.

Do experimento nota-se que a densidade de corrente é quase nula, e se mantém por esse valor por todo o ensaio. Conseqüentemente, pode-se esperar que somente um longo tempo sobre esse potencial o ataque a microestrutura ocorreria, no entanto quanto a isso nada se pode afirmar. Porém esse potencial é inviável para fins práticos.

Na figura abaixo estão exibidos a curva e a microestrutura resultante.

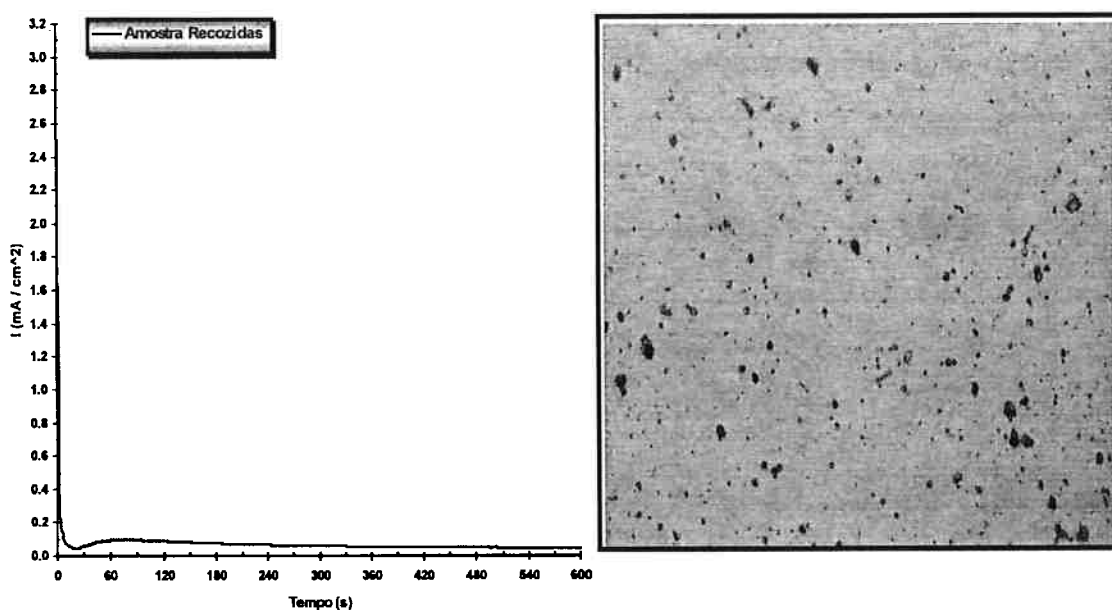


Figura 15 – Curva Potencioestática para o aço AISI M2 em eletrólito de acetato de cumbo a  $700\text{mV}_{\text{ECS}}$  a 10 minutos.

### 5.5.4 Resultado para as amostras temperadas a $700\text{mV}_{\text{ECS}}$ por 10 minutos

A amostra temperada apresenta também produtos de corrosão sobre a superfície metálica. No entanto, não é possível se afirmar que os produtos de corrosão estão revelando possíveis carbonetos na microestrutura.

A densidade de corrente também é muito reduzida, bem próxima a zero. Portanto, o ataque deve ser por um tempo mais longo, e provavelmente inviável para fins práticos. Não foi observada a formação de película colorida.

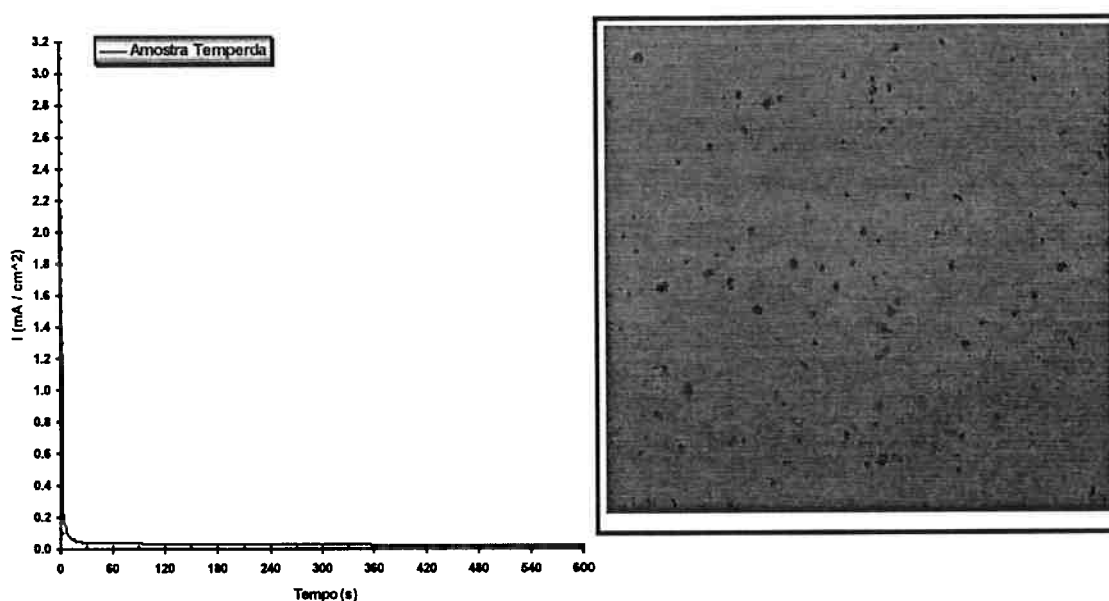


Figura 16 – Curva Potencioestática para o aço AISI M2 em eletrólito de acetato de chumbo a  $700\text{mV}_{\text{ECS}}$  a 10 minutos.

## 6 DISCUSSÃO

### 6.1 *Tratamento Térmico e Dureza*

A têmpera era fator crucial para o estudo do aço AISI M2 no eletrólito de acetato de chumbo, visto que o fenômeno do endurecimento secundário devido a fina precipitação de carbonetos de MC e  $M_2C$  era desejável.

Pela dureza de 64 HRC obtida pode-se concluir que o estágio do endurecimento secundário foi atingido.

O sucesso do tratamento térmico é também confirmado pelas micrografias obtidas do aço, apresentando grãos refinados, e precipitação fina de carbonetos secundários principalmente nos contornos de grão. Alguns dos carbonetos primários,  $M_6C$  não se dissolveram completamente devido ao tempo de aquecimento.

### 6.2 *Os Ensaio Potenciodinâmicos*

Os resultados dos ensaios potenciodinâmicos revelaram um comportamento estável do aço AISI M2 no eletrólito de acetato de chumbo, independente da microestrutura presente. Visto que, tanto para as amostras recozidas e temperadas a forma da curva foi semelhante.

Já foi mencionado nos item dos resultados, mas vale ressaltar que a forma da curva potenciodinâmica não se alterou com a condição, recozida ou temperada, do aço. Todas apresentaram trecho passivo, seguido de transpassivação e evolução de oxigênio.

Vale ressaltar também que o ataque metalográfico observado após a polarização potenciodinâmica ocorreu justamente na região acima da transpassivação e de evolução de oxigênio. Talvez a presença dos íons formados na transpassivação

associados ao oxigênio formado, possam ser a explicação para a formação de película colorida sobre a matriz.

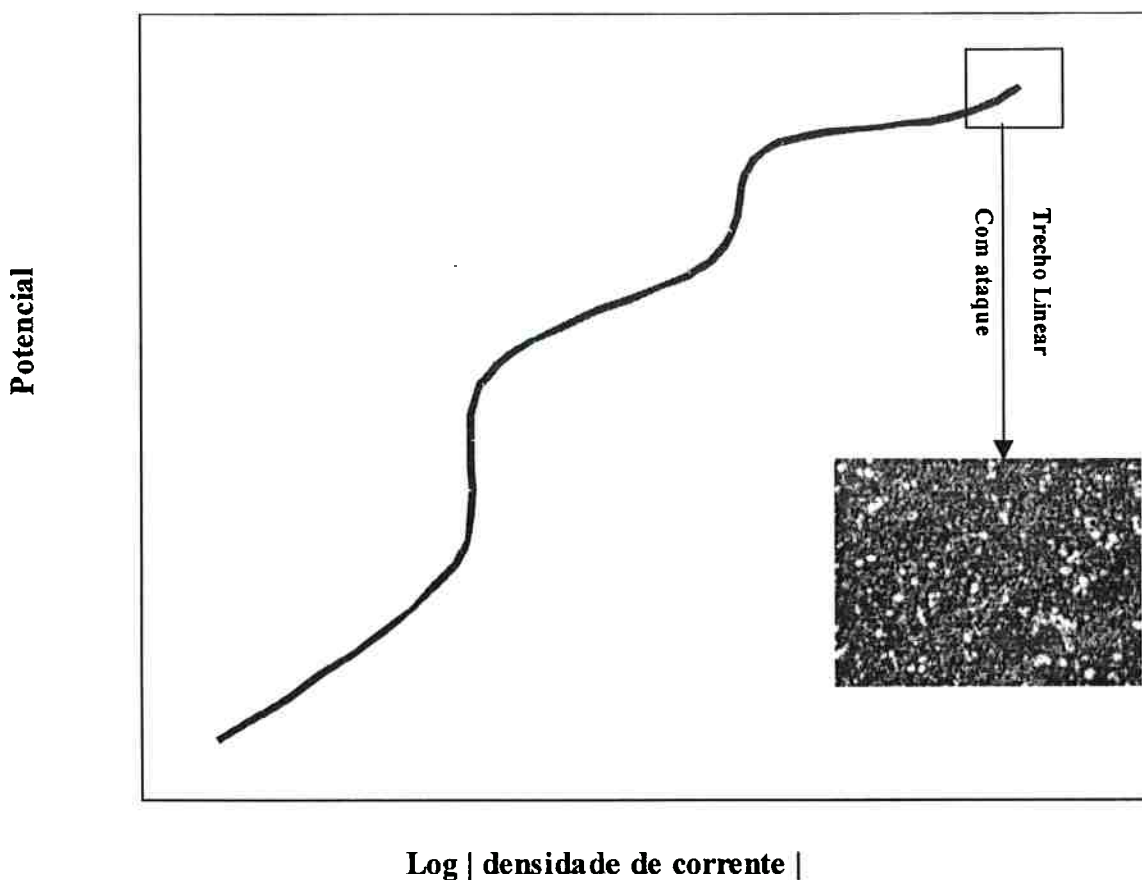


Figura 17 – Representação esquemática das curvas de polarização potenciodinâmicas das amostras recozidas e temperadas.

### 6.3 Os Ensaios Potenciostáticos

Dos ensaios potenciostáticos, verificou-se que os potenciais superiores ao valor de  $1000 \text{ mV}_{\text{ECS}}$  realmente são fortes candidatos ao ataque potenciostático seletivo dos carbonetos primários e secundários na matriz do aço AISI M2 em eletrólito de acetato de chumbo, para ambas as amostras: recozidas ou temperadas.

Potenciais como  $700 \text{ mV}_{\text{ECS}}$  não proporcionaram ataque seletivo pronunciado na matriz do aço para esse eletrólito em até 10 minutos, o que torna esse potencial inviável para práticas laboratoriais. Primeiro por não atacar a matriz seletivamente, e segundo que, se forem adotados tempos superiores a 10 minutos sua praticidade se torna desfavorável. Adicionalmente, os valores da densidade de corrente foram bem

baixos para esse potencial, ressaltando que um ataque seletivo a essa microestrutura acontecesse.

O comportamento do aço nesse eletrólito foi constante e independentemente dos microconstituintes da matriz. A densidade de corrente para o mesmo potencial de  $1150\text{mV}_{\text{ECS}}$  foi similar também, próxima de uma média de  $2.4\text{mA/cm}^2$ .

O comportamento estável sugere que o estudo de ataques metalográficos em outros potenciais possa também ocorrer.

O tempo de dois minutos foi definido a partir dos ensaios, que apresentaram a partir de 1 minuto em média o início da formação das películas de espessuras alternadas.

A presença do trecho linear em potenciais acima dos  $1000\text{mV}_{\text{ECS}}$  com a promoção de filme colorido nos ensaios potenciodinâmicos é confirmado pelos ensaios potencioestáticos, pois a partir do momento que as diferentes espessuras do filme se distribuíam na superfície do metal, a densidade de corrente se mantinha constante.

O ataque seletivo então ocorreu no que se diz respeito aos carbonetos presentes na matriz do aço AISI M2 recozidas e temperadas. A matriz ficou colorida, permitindo uma análise microscópica mais precisa. E, acima de tudo, o tempo de dois minutos é um tempo prático para atividades normais de estudo metalográfico.

Dessa forma o ataque seletivo aos carbonetos permite que uma análise quantitativa e qualitativa da matriz do aço AISI M2 seja mais precisa, enriquecendo o estudo de aperfeiçoamento de tratamentos térmicos do aço, não somente o aço em estudo, mas outros aços rápidos poderão ser estudados em eletrólitos de acetato de chumbo, no que diz respeito aos carbonetos primários e secundários presentes.

## 7 CONCLUSÃO

O presente trabalho resultou no levantamento de informações sobre o comportamento eletroquímico do aço rápido AISI M2 em eletrólito de acetato de chumbo. Atingiu o seu objetivo que foi descobrir um ataque potencioestático seletivo para esse mesmo aço, revelando os carbonetos presentes na microestrutura para o estado temperado e recozido.

Quanto ao comportamento do aço durante a polarização potenciodinâmica, essa foi reprodutível tanto para as amostras recozidas como temperadas.

Nas curvas potencioestáticas o comportamento também foi reprodutível, e a alternância de espessuras ocorreu da mesma forma, mantendo a densidade de corrente constante.

O potencial de  $700\text{mV}_{\text{ECS}}$  mostrou-se ineficaz e inviável para o ataque seletivo desse aço rápido.

O tempo de 2 minutos e um potencial de  $1150\text{mV}_{\text{ECS}}$  são as variáveis para um ataque potencioestático descoberto pelo presente trabalho, e permite revelar os carbonetos primários e secundários, de coloração branca, sob uma matriz colorida.

Finalizando o eletrólito de acetato de chumbo se mostrou excelente para o estudo eletroquímico do aço AISI M2, viabilizando a reprodutibilidade dos ensaios e informações importantes para o desenvolvimento do ataque potencioestático seletivo da matriz.

## 8 BIBLIOGRAFIA

### [CESC91]

CESCON, T. Desenvolvimento e caracterização de aço rápido contendo nióbio a partir da matriz do aço M2. São Paulo, 1991, p. 3, 4, 13-18, 24-31;. Tese (DOUTORADO), Depto de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

### [COLP69]

COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns, p.22 e 121, São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda. , 3a edição, janeiro, 1969.

### [EDEL57]

EDELEANU, C. The potentiostatic as a metallographic tool. Journal of Iron and Steel Institute, London, v.185, p. 487, abril, 1957.

### [GRÜT69]

GRÜTZNER, G ; SCHÜLLER, H. J. Potentiostatic colour etching of stainless steels. Practical Metallography, Stuttgart, v.6, p.346-358, 1969.

### [HABE73]

HABERLING, E. ; ROSE, A. ; WIEGAND, H. H. Effect of carbon content on the structure and properties of a high-speed steel with about 5% Mo, 2% V. Stahl und Eisen , Düsseldorf, v.93, n.14, p. 645 - 51, Juli , 1973.

### [HABR68]

HABRAKEN, L. ; DeBROUWER, J. L. , Electrolytic etching with a potentiostat, De ferri metallographia I , Centre National de Recherces Metallurgiques - CNRM Bruxeles: Presses Academiques Europeennes, S.C, p.111-4, 1968. figura: *plate 112*

### [HACK85]

HACK, H. P. The Potentiostatic Technique for Corrosion Studies, Electrochemical Techniques for corrosion engineering, symposium NACE CORROSION/85, edição National Association of Corrosion Engineers, p. 57-65, 1985.

**[HERB78]**

HERBSLEB, G; SCHWAAB, P. Fundamentals of the potentiostatic development of structures using high-alloy steels as an example, Practical Metallography, Stuttgart, v.15, p.213-233. 1978

**[HOYL88]**

HOYLE. G. High Speed Steels London : Butterworths, 1988.

**[LICH69]**

LICHTENEGGER, P. *et all* A contribution to the potentiostatic etching of steel. Practical Metallography, v.6, p.535-9, 1969.

**[LICH75]**

LICHTENEGGER, P BLÖCH, R. The use of potentiostatic etching to reveal microstructural constituents selectively, Practical Metallography, v.12, p. 186-93. 1975.

**[MAGN94]**

MAGNABOSCO, R. Ataques potenciostáticos para o estudo metalográfico de aços-ferramenta, São Paulo, novembro, 1993. Projeto de formatura, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, EPUSP.

**[MAGN96]**

MAGNABOSCO, R. Estudo do Comportamento Eletroquímico do aço AISI M2 em NaOH Utilizando Técnicas de Polarização Potenciodinâmica e Potenciostática, São Paulo, 1996. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, EPUSP.

**[META72]**

METALS Handbook. 8 ed. Metals Park : ASM, 1972 v.7 : Atlas of microstructures of industrial alloys.

**[METα80]**

METALS Handbook. 9 : Properties and Selections: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals. ed. Metals Park, ASM, p424-426, v.3, 1980.

**[META80]**

METALS Handbook. 9 : Properties and Selections: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals. ed. Metals Park, ASM, p422, v.3, 1980.

**[META85]**

METALS Handbook. 9 ed. Metals Park: ASM, v.9 Metallography and microstructures, 1985

**[META90]**

METALS Handbook. 10 ed. Metals Park : ASM, 1990 v.1 : Properties and Selections: Irons, Steels and High-Performance Alloys.

**[PACY84]**

PACYNA, JERZY The effect of molibdenum on the transformations in the quenched matrix of high-speed steels during tempering. Archiv für das Eisenhüttens , Düsseldorf, v.55, n. 7, p.325-330, Juli, 1984.

**[PETZ78]**

PETZOW, G. Metallographic etching Metals Park: ASM, p.24-35, 1978.

**[RIED87]**

RIEDL, R *et all* Developments in high speed steels. Steel Research , Düsseldorf, v. 58, n. 8, p. 339-340, Aug. 1987.

**[ROBE62]**

ROBERTS, G. CARY, R. Tool Steels ASM Metals Park : Ohio 3.ed, p.598, 1962.

**[ROBE80]**

ROBERTS, G. CARY, R. Tool Steels ASM Metals Park : Ohio 4.ed, p. 627-761, 1980,

**[ROSE59]**

ROSE, A.; RADEMACHER, L.; VAN WYK, J. M. Einfluss der austenitisierungsbedingungen auf das unwandlungsverhalten von schnellarbeitsstählen. Stahl and Eisen, Düsseldorf, v.79, n.18, p.1243-58, Sept., 1959.

**[SIEB85]**

SIEBERT, O. W. Application of the Rapid-Scan Potenciodynamic Polarization Technique for Corrosion Studies, Electrochemical Techniques for corrosion engineering, symposium NACE CORROSION/85, edição National Association of Corrosion Engineers. p. 81-82, 1985.

**[STAN90]**

STANSBURY, E. E. , Potentiostatic Etching in: Metals Handbook 9.ed. Metals Park; ASM, v.9: Metallography and microstructures, p.143-147, 1990.

**[VILL92]**

VILLARES; Aços para ferramentas , Manual, 1992.

**[WEST70]**

WEST, J.M.. Electrochemical and Corrosion Processes. 2a edição. London, VRN Company Ltda, 1970. p 90-99

**[WILS75]**

WILSON, R. Metallurgy and heat treatment of tool steels. London : McGraw-Hill, p.170, 1975.

**[WOLY94]**

WOLYNEC, S. Técnicas Eletroquímicas em Corrosão, apostila do curso de corrosão do depto de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de São Paulo, p.4.1-4.21, 1994.

**[WORC94]**

WORCH, H. *et all* . Potentiostatic etching - presentation of a new etching technique, Practical Metallography , v.31, p.245-51, 1994.