TESE
60

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
DEPARTAMENTO DE FÍSICA E MATEMÁTICA
— DIVISÃO DE QUÍMICA —

INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ARSÊNIO E DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS CARACTERÍSTICAS DE PERDA DE PESO DE UM AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO

Fredmarck Gonçalves Leão

ITAJUBÁ - MINAS GERAIS
- 1975 -

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Departamento de Física e Matemática
Divisão de Química

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
BIBLIOTECA

INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ARSÊNIO E DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS CARACTERÍSTICAS DE PERDA DE PESO DE UM AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO

Fredmarck Gonçalves Leão

ITAJUBÁ - MINAS GERAIS
1975

Tese submetida à Comissão Julgadora do Concurso de Livre-Docência na área de Química da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, como parte dos requesitos necessários à obtenção do Título de Livre-Docente.

APRESENTAÇÃO

O trabalho, que ora apresentamos na área de corrosão, dado as condições em que foram obtidos os resultados experimentais nos Laboratórios de Química e de Metalurgia da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, pode ser considerado mais de ordem Tecnológica do que propriamente científica, uma vez que os ensaios foram feitos sem rigoroso controle de temperatura e sem desaeração das soluções sulfúricas de ataque das amostras.

Com os dados experimentais, e algumas medidas ensaiadas mais vezes, colocamos os valores obtidos em gráficos e verificamos os trechos que tendiam para reta, a fim de determinarmos a taxa de corrosão. Uma vez verificado os trechos retilíneos, procuramos obter a melhor reta possível, otimizando-a pelo método de ajuste dos mínimos quadrados, através dos pontos levantados.

Para as condições expostas, acima, as conclusões a que chegamos foram bastante razoáveis, confirmando alguns pontos da escassa teoria e pesquisas feitas em torno dos aços inoxidáveis martensíticos.

AGRADECIMENTOS

Os meus melhores agradecimentos a EFEI, que através da Biblioteca, dos Laboratórios de Metalurgia, de Química, de Simulação de Dados e da Seção de Projetos Mecânicos, permitiu-me a realização deste trabalho.

Agradeço, ainda, a colaboração de professores e de funcionários na elaboração do mesmo, principalmente ao Prof. Francisco de Assis Ferreira, Chefe do DFM, que deu todo o apoio para sua execução; aos Profs. José Abel Royo dos Santos e Tatuo Nakanishi, do DCA, que prepararam os programas para o Computador; à secretária do DFM, Srta. Claudete Coli Junqueira que datilografou os textos; aos Srs. Sebastião Augusto Pinto de Andrade e Argemiro dos Santos, do DME, que cuidaram da parte de Desenhos e gráficos; e aos Srs. Benedito Firmo e Guy Fontgaland Faria, que trabalharam persistentemente nos Laboratórios de Metalurgia e de Química, na preparação das amostras.

De um modo todo especial, quero deixar aqui registrado o meu reconhecimento ao Prof. Otoni de Oliveira Filho que prestou inestimável colaboração, como orientador.

RESUMO

O presente trabalho procurou estudar o comportamento eletroquímico de um aço inoxidável, tipo martensítico, AISI-420, com estruturas de recozimento, de têmpera, e de revenimentos, através de ensaios sucessivos de perdas de peso em soluções de um normal de ácido sulfúrico (1N-H_2SO_4), contendo concentrações variáveis de Arsênio, como inibidor, na forma de óxido (As_2O_3), obtendo-se diferentes taxas de corrosão.

Verificou-se, para as diversas estruturas do Aço AISI-420, que a pequena adição de Arsênio aumentou a taxa de corrosão, e a partir daí esta decresce continuamente.

Para a concentração de 500 mg/ℓ de As_2O_3, até 60 horas, a taxa de corrosão para todas as cinco estruturas ensaiadas foi nula. Acredita-se que o efeito inibidor para elevadas concentrações seja devido à deposição de um filme de Arsênio às superfícies das amostras.

ÍNDICE GERAL

Pág.

0. INTRODUÇÃO..... 1

1. PRINCÍPIOS GERAIS SOBRE O USO DE INIBIDORES CATÓDICOS EM MEIOS CORROSIVOS..... 4

1.0. Introdução..... 4

1.1. Corrosão Seca e Corrosão Úmida..... 5

1.2. Mecanismo Eletroquímico Básico..... 6

1.3. Taxa de Corrosão..... 15

1.4. Influência de Inibidores Catódicos na Taxa de Corrosão..... 17

1.4.1. Inibidores..... 17

1.4.1.1. Inibidores Anódicos..... 18

1.4.1.2. Inibidores Catódicos..... 18

2. MATERIAIS E MÉTODOS..... 20

2.1. Material..... 20

2.2. Métodos..... 20

2.2.1. Tratamentos Térmicos..... 20

2.2.2. Ensaios de Dureza..... 21

2.2.3. Ensaios de Perda de Peso..... 22

2.2.3.1. Preparação das Amostras..... 22

2.2.3.2. Preparação dos Eletrólitos..... 23

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS..... 24

3.1. Ensaios de Dureza..... 24

3.2. Efeito de Tratamentos Térmicos e de Concentração de Óxido de Arsênio nas Curvas de Perda de Peso. 24

3.2.1. Ensaios de Perda de Peso em Solução de H_2SO_4-1N..... 25

Pág.

3.2.2. Ensaios de Perda de peso em Solução de H_2SO_4-1N, com As_2O_3- 10 mg/l..... 30

3.2.3. Ensaios de Perda de Peso em Solução de H_2SO_4-1N, com As_2O_3- 20 mg/l..... 35

3.2.4. Ensaios de Perda de Peso em Solução de H_2SO_4-1N, com As_2O_3- 30 mg/l..... 40

3.2.5. Ensaios de Perda de Peso em Solução de H_2SO_4-1N, com As_2O_3-100 mg/l..... 45

3.2.6. Ensaios de Perda de Peso em Solução de H_2SO_4-1N, com As_2O_3-200 mg/l..... 50

3.2.7. Ensaios de Perda de Peso em Solução de H_2SO_4-1N, com As_2O_3-500 mg/l..... 54

3.2.8. Taxas de Corrosão em função da Concentração de Óxido de Arsênio..... 55

3.2.8.1. Ajustes de Retas por Mínimos Quadrados..... 55

3.2.8.2. Determinação das Taxas de Corrosão..... 59

4. DISCUSSÃO..... 67

4.1. Influência da Estrutura na Taxa de Corrosão..... 67

4.2. Influência do Inibidor na Taxa de Corrosão..... 69

5. CONCLUSÕES..... 71

BIBLIOGRAFIA

ANEXO - PROGRAMA E RESULTADOS DE COMPUTAÇÃO

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Fig. 1 - Esquema de uma Pilha Elétrica Galvânica..... 7

Fig. 2 - Pilha Galvânica de Fe+Cu, com Eletrólito de NaCl..... 9

Fig. 3 - Potenciais de Elétrodo de Metais..... 10

Figs. 4 a 9 - Curvas de Perda de Peso do Aço AISI-420 em solução de H_2SO_4-1N..... 26

Figs.10 a 15 - Curvas de Perda de Peso do Aço AISI-420 em solução de H_2SO_4-1N, Concentração As_2O_3 - 10 mg/l..... 32

Figs.16 a 21 - Curvas de Perda de Peso do Aço AISI-420 em solução de H_2SO_4- 1N, Concentração As_2O_3- 20 mg/l..... 36

Figs.22 a 27 - Curvas de Perda de Peso do Aço AISI-420 em solução de H_2SO_4-1N, concentração As_2O_3 - 30 mg/l..... 41

Figs.28 a 33 - Curvas de Perda de Peso do Aço AISI-420 em solução de H_2SO_4-1N, concentração de As_2O_3- 100 mg/l..... 46

Figs.34 a 38 - Curvas de Perda de Peso do Aço AISI-420 em solução de H_2SO_4-1N, concentração de As_2O_3- 200 mg/l..... 51

Fig. 39 - Gráfico P(xi)..... 56

Figs.40 a 45 - Curvas de Taxas de Corrosão do Aço AISI-420 , em solução de H_2SO_4-1N, nas Concentra - ções de 10, 20, 30, 100, 200 e 500 mg/l de As_2O_3 60

LISTA DE SÍMBOLOS

Elementos

H	Hidrogênio atômico
H_2	Hidrogênio molecular
C	Carbono
O_2	Oxigênio molecular
Na	Sódio
S	Enxofre
Cl	Cloro
Ti	Titânio
V	Vanádio
Cr	Cromo
Fe	Ferro
Fe^{2+}	Íon ferroso
Ni	Níquel
Cu	Cobre
Mo	Molibdênio
W	Tungstênio
Grupo V	Família dos Nitrogenóides da Classificação Periódica dos Elementos
H_2O	Água distilada
H_2O_2	Peróxido de Hidrogênio; água oxigenada
OH^-	Íon Hidroxila
H_3O^+	Íon hidroxônio
H_2SO_4	Ácido sulfúrico

1N	Um normal (concentração-Normalidade)
$N=\frac{ne}{V}$	(ne - número de equivalentes-grama; V - volume em litros)
1M	Um molar (concentração-molaridade)
$M=\frac{n\ moles}{V}$	(número de moléculas-grama por litro de solução)
H_2SO_4-1N	solução aquosa de um normal de Ácido Sulfúrico
Sol.H_2SO_4 a 10%	Solução de ácido sulfúrico a dez por cento - (concentração: 90 partes de H_2O e 10 partes de H_2SO_4)
As_2O_3	Trióxido de Arsênio; ou óxido de Arsênio; ou sexquióxido de Arsênio; ou óxido de Arsênio III
NaCl	Cloreto de sódio; sal comum
$Fe(OH)_2$	Hidróxido de Ferro II; hidróxido ferroso
$Fe\ OH^+$	Íon Hidróxido Ferroso
$(Fe\ OH)_{ads}$	Hidróxido Ferroso - adsorção
$Fe(OH)_3$	Hidróxido de Ferro III ou Hidróxido Férrico
Fe_2O_3	Óxido Férrico,ou sesquióxido de Ferro,ou Trióxido de ferro, óxido de Ferro III
Fe_3O_4	Óxido de Ferro IV, Tetróxido de triferro(magnetita)
Al_2O_3	Sesquióxido de Alumínio; óxido de Alumínio III, Alumina, coríndon
e	eletron
e^-	representa um eletron com sua carga negativa
ne	número de eletrons livres
M	metal, material metálico

n	número de átomos, moléculas, íons, etc.
n^+	índice - número de íons positivos
$[e^- M^+]$	Ligação metálica: rede de íons positivos dentro de uma nuvem de elétrons (ou gás eletrônico).
D^+	Solução iônica despolarizante
V	Tensão, volts - Diferença de potencial (potencial de elétrodo)
pH	potencial Hidrogeniônico
$pH=\frac{1}{\log H^+}$ = colog $[H^+]$	" pH é o logarítmo decimal do inverso da concentração do íon hidrogênio".
AISI	American Iron and Steel Institute; Instituto Americano de Ferro e Aço
AISI-420	Classificação de Aço Inoxidável Martensítico, segundo a AISI - New York, 1957 - Aços contendo de 12,0 a 14,0% de Cromo - Estrutura Cúbica de Corpo centrado - Magnéticos - Tratados termicamente
ASTM	American Society for Testing and Materials; Sociedade Americana para Teste e Materiais
w_o	peso inicial da amostra, em miligramas
w_f	peso final da amostra, em miligramas
A	área de exposição da amostra, equivalente a um centímetro quadrado
T	Tempo de inversão da amostra na solução ácida expresso em dias
ipy	inches penetration per year; polegadas de penetração por ano

mdd — miligrams per square decimeter per day; miligramas por decímetro quadrado por dia

mpy — mils penetration per year; milésimos de polegada de penetração por ano

mmpy — milimeters penetration per year; milímetros de penetração por ano

Rmdd — Taxa de Corrosão - $mg/dm^2/dia$ - em miligramas por decímetro quadrado por dia

mg/l — miligramas por litro

mg/cm^2 — miligramas por centímetro quadrado

1/2" Ø — meia polegada de diâmetro, equivalente a 12,7 milímetros

1 kgf — um quilograma-força

"mashes/polegada"- malha quadrada de uma peneira para selecionar os tamanhos dos grãos abrasivos, cujo lado é expresso em milésimos de polegada.

Rockwell C - RC - Escala de Dureza "C" - penetrador com ponta de diamante

A_1 — Amostra de Aço Martensítico Inoxidável AISI-420 - Estrutura de Recozimento a 1050°C esfriada lentamente no forno até 600°C e daí em diante na água.

A_2 — Amostra do Aço AISI-420 - Estrutura de Têmpera com austenitização a 1050°C, durante 40 minutos, seguido de resfriamento ao ar agitado.

A_3 — Amostra do aço Inoxidável AISI-420 - Estrutu-

	ra de Revenido a 350°C, durante 90 minutos , seguido de resfriamento em água.
A_4	Amostra do Aço Martensítico AISI-420 - Estrutura ou revenido a 500°C, durante 90 minutos seguida de resfriamento em água.
A_5	Amostra do Aço AISI-420 - Estrutura de revenido a 650°C, durante 90 minutos, seguido de resfriamento em água.
$P(x)=a_o+a_1x$	Equação Geral da Reta
a_o e a_1	Coeficientes da reta de regressão
a_1	Coeficiente angular; relação do segmento da ordenada para o segmento da correspondente a um trecho da reta
d_i	Diferença de ordenada de um ponto levantado experimentalmente para o lugar geométrico(reta de regressão) otmizada.
$\sum_{i=1}^{m}$	Somatório de parcelas limitadas de "i" igual a um até "m"
S	Soma das distâncias (di) elevadas ao quadrado
$\frac{\partial S}{\partial a_o}$	Derivada parcial de "S" em relação a "a_o"
$\frac{\partial S}{\partial a_1}$	Derivada parcial de "S" em relação a "a_1"

0. INTRODUÇÃO

Em 1820, na Inglaterra, J.Stodart e M. Faraday publicaram um trabalho sobre a resistência à corrosão de diversas Ligas Fe-Cr. Berthier, na França, em 1821, interessado no trabalho anterior, constatou que o ferro ligado com uma considerável quantidade de cromo era mais resistente ao ataque dos ácidos do que o ferro comum, embora não tenha descoberto as úteis propriedades de passividade, principais características dos aços inoxidáveis.

Somente em 1904, conseguiu Guillet, na França, produzir ligas de cromo de baixo carbono que sobrepassavam a zona de composição passiva.

As propriedades de passividade das ligas de Fe-Cr, que se iniciam com o mínimo de 12% de Cr, foram descritas pela primeira vez, segundo parece, por Monnartz, na Alemanha, e quem, em 1908, iniciou suas pesquisas, publicando, em 1911, um minucioso trabalho sobre as propriedades químicas das ligas Cr-Fe, contendo descrições do efeito benéfico sobre a resistência à corrosão dos meios oxidantes em comparação com os redutores; a necessidade de se manter baixos teores de carbono; e os efeitos de pequenas quantidades de elementos de adição, como por exemplo Ti, V, Mo e W.

Assim, depois de 1913, o aço inoxidável passou a ser fabricado na Inglaterra com fins comerciais, e o mundo

todo voltou sua atenção para o novo tipo de aço.

Há três tipos principais de aços inoxidáveis que se classificam segundo suas estruturas metalúrgicas. Cada uma delas está formada por diferentes elementos de liga mas que apresentam propriedades de corrosão, físicas e magnéticas, afins.

Os três principais tipos de aços inoxidáveis são: martensíticos, ferríticos e austeníticos.

As propriedades de passividade dos aços inoxidáveis vem sendo estudadas por um grande número de pesquisadores, onde a maioria dos trabalhos são realizados em torno das propriedades eletroquímicas dos aços austeníticos, com menor frequência as pesquisas efetuadas em aços ferríticos e ainda mais raras as realizadas em aços martensíticos.

Se atentarmos para que os aços inoxidáveis martensíticos são largamente utilizados em pás de turbinas a vapor, ferramentas, instrumentos de cutelaria, ferros de cirurgia, aparelhos de medidas mecânicas, hélices de navios, acessórios aeronáuticos, indústrias alimentícias, componentes de máquinas, como: porcas, parafusos, eixos, etc., estudos sistemáticos da resistência à corrosão neste tipo de aço inoxidável parecem justificáveis e de grande interesse para a humanidade, principalmente para os países em desenvolvimento e que carecem de um "know-how" próprio.

Por outro lado, a introdução do cromo na liga,

bem como de outros elementos acrescem sobremaneira o custo do material. Por esta razão, devemos também procurar diminuir a agressividade do meio corrosivo, onde irá trabalhar o aço em questão, empregando inibidores, numa tentativa de conciliação entre metal e meio corrosivo, para não sobrecarregar somente o trabalho dos elementos constituintes da liga, minimizando o desgaste do material ou melhor, aumentando sua vida útil, sob a égide do fator econômico.

O objetivo deste trabalho foi o de investigar, dentro de uma faixa limitada, o comportamento eletroquímico de diferentes estruturas de um aço inoxidável, tipo martensítico, em meio corrosivo ácido, na ausência e na presença de um inibidor catódico. Assim, foi escolhido o aço inoxidável martensítico AISI-420; o meio corrosivo: solução de H_2SO_4-1N; e o inibidor: As_2O_3 (concentrações: 10, 20, 30, 100, 200 e 500 m/l).

1. PRINCÍPIOS GERAIS SOBRE O USO DE INIBIDORES CATÓDICOS EM MEIOS CORROSIVOS

1.0 - INTRODUÇÃO

Sabe-se que corrosão é o ataque destrutivo de um corpo sólido, e em particular de um metal, por meio de uma ação química ou eletroquímica, intencional ou não, começando pela sua superfície.

Os processos de corrosão dos metais implicam em transformações químicas apoiadas em reações de oxi- redução e metalurgia física.

As condições que favorecem a corrosão envolvem tanto alterações químicas como eletrônicas.

A maioria dos metais existe sob a forma combinada de óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfetos, sulfatos e silicatos. A obtenção de um metal de seus minérios requer uma considerável quantidade de energia em sua redução; por isso, pode-se considerar um metal isolado como estando em um estado de energia muito mais elevado do que no minério correspondente. Portanto, o metal tendendo a retornar a um dos estados naturais, ou de mais baixa energia, que é o estado combinado, reage com o meio ambiente sofrendo corrosão.

A corrosão é pois um processo de degradação, caracterizada pela dissipação de energia, sob uma forma qual

quer.

A possibilidade de um metal sofrer ou não corrosão em seu meio, sob certas condições, pode ser verificado com o auxílio da Termodinâmica. Uma vez determinado termodinamicamente que a corrosão de um metal ocorre em um determinado meio, resta determinar a velocidade da reação química correspondente; mas como esta velocidade não é correlacionada com a mudança de energia livre envolvida na reação, não se pode prevê-la, devendo-se, pois, determiná-la experimentalmente.

Embora não haja uma separação bem definida entre os diversos tipos de corrosão, podemos classificá-la em corrosão seca e corrosão úmida.

1.1 - CORROSÃO SECA E CORROSÃO ÚMIDA

Praticamente todo o fenômeno de corrosão envolvendo reações químicas entre um metal e um gás ou líquido, que não seja eletrólito, pode ser classificado como corrosão seca. A corrosão seca ocorre principalmente através de reações químicas de gases , como: oxigênio, dióxido de enxofre , halogênios, dióxido de carbono, nitrogênio, e hidrogênio com as superfícies dos metais, incluindo suas ligas. Os metais também podem ser corroídos em reações com alguns líquidos anídricos, orgânicos ou inorgânicos e com metais fundidos.

A corrosão úmida se processa por um mecanis

mo de natureza essencialmente eletroquímica, requerendo, por isso, que o líquido em contato com o metal deva ser condutor, um eletrólito portanto, e que haja uma diferença de potencial, ou entre dois metais, ou ligas distintas, ou entre áreas diferentes na superfície do metal. As diversas variáveis, que geralmente estão presentes no fenômeno de corrosão, modificam muito o curso e a extensão das reações eletroquímicas, resultando diversos tipos de ataques. Na maioria dos casos é possível explicar as várias formas de corrosão referindo-se apenas a um mecanismo eletroquímico básico.

1.2 - MECANISMO ELETROQUÍMICO BÁSICO

Quando um metal é imerso em uma solução eletrolítica (ácido, base ou sal), perde elétrons, oxidando-se, portanto, e passando para a solução sob a forma de íons. Esta reação só poderá ocorrer se existir na solução um aceptor de elétrons, que irá, então, sofrer uma redução.

O fenômeno só se dará se houver uma reação de oxi-redução (Redox). Assim a perda de elétrons vai ocasionar a oxidação do material metálico e consequentemente sua corrosão. Tem-se, portanto, uma reação essencialmente eletroquímica, isto é, reações químicas onde se processam transferências de elétrons, tendo como resultado a produção de uma corrente elétrica, equivalente a uma pilha elétrica.

Para que uma corrente elétrica possa escoar é

necessário a constituição de um circuito elétrico completo. No sistema de corrosão, o circuito referido está formado por quatro componentes que constituem uma pilha, a saber:

a) Ânodo: elétrodo em que há oxidação (corrosão) e por onde a corrente, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito.

b) Eletrólito: condutor (usualmente uma solução de ácido, ou base, ou sal) contendo íons que transportam a corrente para o cátodo.

c) Cátodo: elétrodo em que há redução e por onde a corrente sai do eletrólito.

d) Circuito metálico: ligação entre o ânodo e o cátodo, por onde escoam os elétrons, no sentido ânodo-cátodo (externo).

Esquematicamente, pode-se representar o circuito referido acima, conforme a fig.1, abaixo:

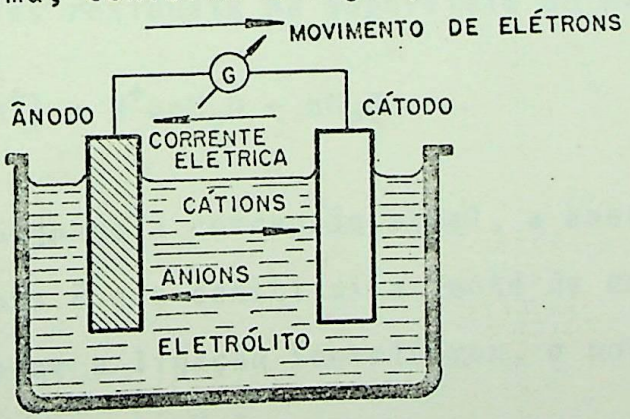


Fig.1 - Esquema de uma Pilha Elétrica Galvânica
An- Prefixo grego que significa "dentro" e Cat- significa "fora".
Movimento dos Elétrons contrário do sentido convencional da Corrente Elétrica. Cátions - viajantes para o cátodo (+). Anions - viajantes para o ânodo (-)
Eletrólito - Solução Aquosa de ácido, ou álcali ou sal.

Retirando-se uma destas variáveis, destroi - se a pilha e, consequentemente, paralisa-se a corrosão.

Evidentemente, pode-se retirar o cátodo ou a ligação metálica, ou o eletrólito. No ânodo, o que se pode fazer quando não se consegue alterar nenhuma das outras três variáveis é protegê-lo através de um revestimento.

Na corrosão eletroquímica, os elétrons são produzidos num lugar (ânodo) e consumidos em outro (cátodo) , surgindo uma pilha galvânica ou simplesmente um elemento de corrosão.

O processo eletroquímico de corrosão pode ser decomposto em três etapas parciais, a saber:

a) Processo anódico: passagem de íons para a solução e acumulação de elétrons residuais na superfície do metal.

$$e^- \leftarrow [e^- M^+] \rightarrow M^+ . nH_2O \leftarrow nH_2O$$

Segundo a concepção atual, a energia de hidratação dos íons é que constitui a fonte de energia necessária para quebrar a ligação íon-elétron, e por isto foi acima representado por nH_2O.

b) Deslocamento dos elétrons e íons: observa-se a transferência dos elétrons das regiões anódicas para as regiões catódicas, e também, um deslocamento de ânions e de cátions na solução.

c) Processo catódico: os íons da solução (despolarizante D^+) são reduzidos pelos elétrons que chegam ao cátodo.

$$e^- + D^+ \rightarrow [e^- D^+]$$

Pode-se notar que os processos anódicos e catódicos são equivalentes: a toda e qualquer passagem de um íon do ânodo para a solução é acompanhada da decomposição de um íon no cátodo. Desta forma, a intensidade do processo de corrosão pode ser avaliada, tanto pela medida da quantidade de íons que se dissolvem no ânodo, como pela quantidade de íons que se depositam no cátodo, ou ainda pela medida da corrente que passa entre o cátodo e o ânodo, controlada pelas Leis de Faraday da Eletrólise.

Para se explicar o mecanismo eletroquímico básico da corrosão pode-se, então, esquematizá-lo como sendo uma pilha galvânica ou voltáica comum, cujos elétrodos sejam, por exemplo: de ferro (Fe) e de cobre (Cu), e o eletrólito constituido de uma solução aquosa de cloreto de sódio ($NaCl+nH_2O$) conforme fig. 2, abaixo:

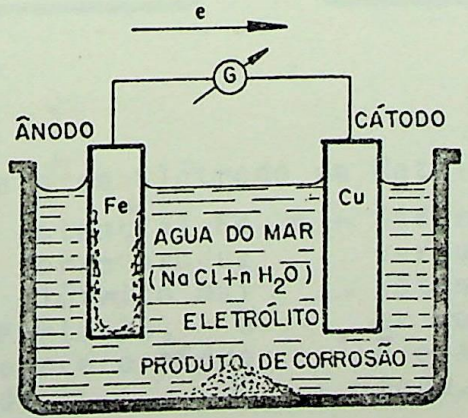


Fig.2 - Pilha Galvânica de Fe + Cu, com Eletrólito de NaCl

Considerando-se a Tabela 1, abaixo, de Potenciais de Elétrodo de Metais a 25°C, em solução 1M dos íons metálicos, os metais que estão acima do hidrogênio são positivos em relação ao elétrodo-padrão de hidrogênio, e os que estão abaixo tem seus valores de potenciais negativos, pode-se afirmar que em um sistema o elétrodo de maior potencial é o ânodo e o de menor potencial é o cátodo. Assim, no sistema Fe-Cu, o ferro é o ânodo e o cobre o cátodo, pois que seus Potenciais de Elétrodo são respectivamente, +0,44 V(Fe^{2+}) e -0,34V(Cu^{2+}) (Fig.3).

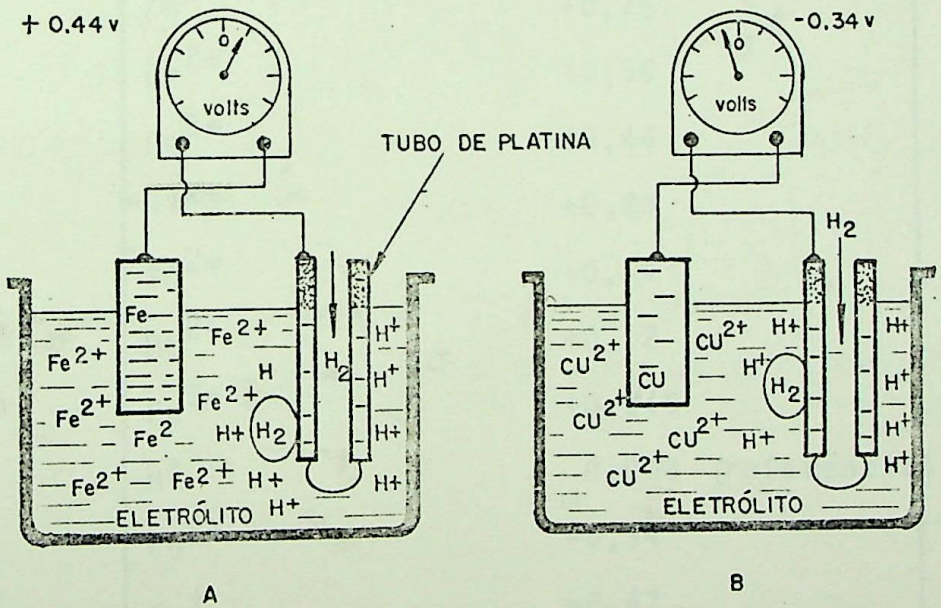


Fig. 3 - Potenciais de Elétrodo de Metais

A - Diferença de potencial, Fe versus H_2. O ferro produz um potencial elétrico maior que o H_2. Portanto, o ferro é o anodo e o hidrogênio o catodo.

B - Diferença de potencial, H_2 versus Cu. O H_2 produz um potencial elétrico superior ao do cobre e portanto, é o anodo. O cobre é o catodo.

TABELA 1

Potenciais de Elétrodo de Metais

($25^{o}C$, solução 1M dos íons metálicos

Íon metálico		Potencial*	
Li^{+}	(básico)	+2,96	(anódico)
K^{+}		+2,92	
Ca^{2+}		+2,90	
Na^{+}		+2,71	
Mg^{2+}		+2,40	
Al^{3+}		+1,70	
Zn^{2+}		+0,76	
Cr^{2+}		+0,56	
Fe^{2+}		+0,44	
Ni^{2+}		+0,23	
Sn^{2+}		+0,14	
Pb^{2+}		+0,12	
Fe^{3+}		+0,045	
H^{+}		0,000	(referência)
Cu^{2+}		-0,34	
Cu^{+}		-0,47	
Ag^{+}		-0,80	
Pt^{++}		-0,86	
Au^{+}	(nobre)	-1,50	(catódico)

*Esses sinais são consistentes com a termodinâmica e usados pelos fisicoquímicos. Os sinais opostos são ainda usados por muitos eletroquímicos e especialistas em corrosão.

As reações que se processam são as seguintes:

Reação anódica: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (o metal perde elétrons, oxidando-se)

Reações catódicas: Região onde há fornecimento de elétrons ao eletrólito, ocorrendo na área catódica uma reação de redução (ganho de elétrons).

Dependendo do meio poderá ocorrer uma das seguintes reações:

a) Meio Neutro não-Aerado: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$

onde

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H \rightarrow H_2$$

b) Meio Neutro Aerado ou Contendo Agentes Oxidantes (meio sujeito ao acesso fácil de oxigênio): $H_2O + \frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow 2OH^-$

Ou como admitem alguns autores, sobre a possibilidade de formação de uma fase intermediária de peróxido de hidrogênio, temos:

$$2H_2O + O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O_2 + 2\ OH^-$$

ou

$$H_2O_2 + 2e^- \rightarrow 2\ OH^-$$

c) Meio Ácido não-Aerado: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

d) Meio Ácido Aerado: $2H^+ + \frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$

Em meio neutro, a região catódica torna - se básica e, em meio ácido ela diminui a acidez, uma vez que:

$$H^+ + OH^- \rightarrow H_2O \text{ (reação de neutralização)}$$

Conclui-se que o oxigênio pode ser considerado fator de controle, pois no caso a ele age como despolarizante, isto é, reage com o hidrogênio que poderia ficar adsorvido na superfície do cátodo por fenômeno de sobrevoltagem, polarizando a pilha. Nesse caso, então, a corrosão passa a ser mais severa.

Tomashov apresentou, segundo observação de diversos pesquisadores, a sucessão de reações possíveis de ocorrerem na área catódica:

a) $O_2 + e^- \rightarrow O_2^-$

b) $O_2^- + H^+ \rightarrow HO_2$

c) $HO_2 + e^- \rightarrow HO_2^-$

d) $HO_2^- + H^+ \rightarrow H_2O_2$

e) $H_2O_2 + 2e^- \rightarrow 2OH^-$

admitindo ainda que a reação (e) se realiza em dois estágios, tem-se:

$$H_2O_2 + e^- \rightarrow OH^- + OH$$

$$OH + e^- \rightarrow OH^-$$

Considerando-se o caso do ferro imerso em solução de cloreto de sódio, pode-se admitir as reações:

Ânodo: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$

Cátodo: $H_2O + \frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow 2OH^-$

Os íons metálicos, Fe^{2+}, formados na área anódica migram em direção ao cátodo e os íons oxidrilas, OH^-, migram em direção ao ânodo, e numa região intermediária esses íons se encontram, formando Hidróxido de Ferro II, $Fe(OH)_2$, conforme a reação abaixo:

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$$

Observa-se, portanto, que na corrosão eletroquímica o metal se oxida num lugar, o oxidante se reduz em outro e o produto não se forma sobre nenhuma área e tende a se depositar numa região intermediária (ver fig.2). O processo de corrosão, neste caso, não se pode retardar, uma vez que o produto de corrosão, $Fe(OH)_2$, não se forma sobre nenhuma das áreas.

O $Fe(OH)_2$ sofre transformações e, de acordo com o teor de oxigênio presente, pode-se ter:

a) Em Meio Deficiente de Oxigênio:

$$3\ Fe(OH)_2 \rightarrow Fe_3O_4 + 2H_2O + H_2$$

onde Fe_3O_4: magnetita de cor verde, quando hidratada; e de cor preta, quando anidra.

b) Em Meio Aerado:

que é o caso mais frequente, tem-se a oxidação do $Fe(OH)_2$:

$$2Fe(OH)_2 + H_2O + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3$$ (resíduo alaranjado ou castanho avermelhado)

$$2Fe(OH)_3 \xrightarrow{-2H_2O} 2(feO.OH) \text{ ou } Fe_2O_3.H_2O$$ (resíduo alaranjado ou castanho avermelhado)

No caso do cobre ou suas ligas (latão, bronze), verifica-se que esse material metálico fica revestido com uma película de cor esverdeada, muito aderente, servindo de proteção ao metal, nada sofrendo.

A partir do mecanismo de corrosão eletroquímica, para o par Fe-Cu pode-se estimar as reações gerais para um metal qualquer:

Reações anódicas: $M \rightarrow M^{n+} + ne^-$

Reações catódicas: $n\ H_2O + ne^- \rightarrow \frac{n}{2} H_2 + n\ OH^-$ (meio neutro não aerado)

$n\ H_2O + \frac{n}{2} O_2 + 2ne^- \rightarrow 2n\ OH^-$ (meio neutro aerado)

Produto de corrosão: $M^{n+} + nOH^- \rightarrow M(OH)_n$

Pode-se ver pela reação anódica, que quando um metal é imerso em um eletrólito, ele passa para a solução sob a forma de íon. Dependendo da quantidade de íons que passam para a solução, em um intervalo de tempo, pode-se dizer que, o metal é mais ou menos corroido nesta solução. Esta intensidade de corrosão sofrida pelo metal é chamada de Taxa de corrosão.

1.3 - TAXA DE CORROSÃO

Um dos métodos para se determinar a taxa de corrosão é pela perda de peso. Consiste este método em colocar uma amostra, previamente polida e pesada, em um meio cor

rosivo, e medir, em diferentes intervalos de tempo, os íons que passam para a solução, mediante medidas de perda de peso sofridas pelas amostras.

Segundo Milton-Stern a taxa de corrosão é determinada pelo coeficiente angular (a_o) da porção linear da curva perda de peso "versus" tempo.

Para se expressar a taxa de corrosão ou ataque uniforme, é comum o uso das terminologias empregadas nos E.U.A.: ipy: "inches penetration per year", isto é, polegadas de penetração por ano.
mdd: "miligrams per square decimeter per day", isto é, miligramas por decímetro quadrado por dia.

Essas unidades se referem à penetração ou perda em peso do metal, não considerando qualquer produto da corrosão aderente ou não à superfície.

Para se converter "ipy" em "mdd" ou vice-versa, deve-se ter a densidade do metal. Os fatores de conversão são: mdd = ipy x 696 x densidade (em g/cm^3)

ipy = mdd x 0,00144 x densidade

Nace Standart TM-01-69 (8) recomenda expressar a taxa de corrosão em mpy (mils penetration per year), isto é, milésimos de polegada de penetração por ano, ou mmpy (milimeters penetration per year), isto é, milímetros de penetração por ano; valores estes calculados pelas equações:

$$mpy = \frac{\text{perda em peso} \times 534}{\text{área} \times \text{tempo} \times \text{densidade do material metálico}}$$

$$mmpy = \frac{\text{perda em peso} \times 13{,}56}{\text{área} \times \text{tempo} \times \text{densidade do material metálico}}$$

Segundo as Normas da ASTM (American Society for Testing and Materials), as taxas de corrosão em mdd (mg/dm^2/dia) podem ser determinadas pela equação:

$$Rmdd = 100{,}00 \frac{W_o - W_f}{AT} \ (mg/dm^2/dia)$$

onde:

Rmdd = Taxa de corrosão (mg/dm^2/dia)

W_o = peso inicial da amostra (mg)

W_f = peso final da amostra (mg)

A = área de exposição da amostra (cm^2)

T = tempo de imersão (dia)

1.4 - INFLUÊNCIA DE INIBIDORES CATÓDICOS NA TAXA DE CORROSÃO

1.4.1 - Inibidores

Inibidores de corrosão são substâncias que realmente diminuem a velocidade de corrosão de um metal quando adicionadas, em pequenas quantidades, a um meio corrosivo. Como a corrosão em soluções aquosas é de natureza eletroquímica, a ação inibidora de qualquer substância é devida à prevenção e ao controle das reações anódicas e catódicas.

Embora não haja grande rigor, os inibidores podem ser catódicos ou anódicos, conforme seu efeito se dê sobre

um dos respectivos eletrodos.

1.4.1.1 - Inibidores Anódicos

Os inibidores anódicos evitam as reações sobre o ânodo, formando compostos pouco solúveis com o íon metálico recentemente produzido pela corrosão, formando uma película protetora e assim reduzindo a velocidade de corrosão. Muitos desses inibidores são agentes oxidantes que propiciam a formação de camadas protetoras de óxidos metálicos. Seu efeito é bastante efetivo, desde que sejam adicionados em quantidades adequadas. Em caso contrário, algumas áreas não serão protegidas e, aí, o ataque é localizado e extremamente forte. Por isso estes inibidores são chamados de "perigosos".

1.4.1.2 - Inibidores Catódicos

As reações catódicas podem ocorrer de diversas formas, dependendo do meio corrosivo. Em soluções ácidas, a reação principal é a redução catódica e o desprendimento de hidrogênio. Assim pode-se reduzir a corrosão, ou retardando a difusão do íon hidrogênio hidratado (hidroxônio) para o cátodo ou/e pelo aumento do sobrepotencial de hidrogênio. Segundo a indicação de vários autores a reação:

$$2\,H^+ + 2e^- \rightarrow H_2\,(g)$$

é inibida pela presença de elementos do grupo V, na forma de óxidos ou sais, principalmente pelo antimônio e arsênio; sendo este último muitas vezes empregado na forma de As_2O_3, impedindo assim o desprendimento de hidrogênio pelo aumento nos valo

res de sobretensão.

Algumas substâncias orgânicas podem diminuir consideravelmente a difusão dos íons hidrônios.

Hudson e seus colaboradores trabalhando com aços ao carbono e Foroulis e Uhlig estudando o efeito de impurezas no ferro evidenciaram que, por mecanismos não comprovadamente idênticos, o Arsênio pode apresentar um duplo papel de catalizador ou de inibidor de corrosão, respectivamente a baixas concentrações ou a concentrações mais elevadas, quando adicionado ao eletrólito de trabalho.

Deve-se levar em conta ainda, que este inibidor pode promover a introdução de hidrogênio no metal que deveria proteger, causando a fragilização do mesmo. Desta forma, sua utilização em decapagem ácida deve ser feita de maneira cuidadosa e controladamente, pois podem haver concentrações críticas. Parece ter sido constatado que, para concentração da ordem de alguns mg/l de As_2O_3, o material (Aço) sofra um efeito máximo de fragilização pelo hidrogênio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - MATERIAL

O material escolhido foi o aço inoxidável martensítico de fabricação comercial do tipo AISI-420, conforme classificação da American Iron and Steel Institute, e cuja composição química é dada no quadro abaixo:

QUADRO 1 - ANÁLISE QUÍMICA DO AÇO INOXIDÁVEL

Material	%C	%Mn	%S	%P	%Cr	%Ni
AISI-420	0,43	0,43	0,050	0,020	12	1,7

O material foi recebido na forma de barra de 1/2" $\emptyset$ (12,7 mm de diâmetro).

As amostras (A_1, A_2, A_3, A_4 e A_5) foram cortadas com 100 mm de comprimento e tratadas termicamente, a fim de se obter as diferentes estruturas, mais usuais. Após os tratamentos térmicos, as amostras foram usinadas e retificadas para o diâmetro de 11,3 mm, ficando a seção transversal com uma área de 1,00 cm^2.

2.2 - MÉTODOS

2.2.1 - Ensaios de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados em Máquina de Dureza Rockwell tipo TESTOR HT 1a, tendo sido aplicada uma carga inicial de 10 kgf e uma carga final de 150 kgf para todos os ensaios. O penetrador adotado foi o cone de diamante e o resultado foi obtido de leitura direta no mostrador da máquina (Escala Rockwell-c).

2.2.2 - *Tratamentos Térmicos*

Como a dissolução dos carbonetos na austenita para um aço com 12% de cromo só ocorre em temperaturas superiores a 1000°C, assim foi escolhida a temperatura de austenitização de 1.050°C para garantir a dissolução completa dos carbonetos, e ainda para seguir a orientação do fabricante do aço em estudo.

Após a têmpera, aplicou-se um revenido, em três diferentes temperaturas. Sabe-se que na faixa entre 450 e 550°C pode ocorrer precipitação de carbonetos.

Com o objetivo de se obter diferentes estruturas, foram preparados as amostras (A_1, A_2, A_3, A_4 e A_5) e efetuados os seguintes tratamentos térmicos:

A_1 - Recozimento com austenização a 1.050°C, durante 40 minutos, seguida de resfriamento normal no forno;

A_2 - Têmpera com austenitização a 1.050°C, durante 40 minutos, seguida de resfriamento ao ar agitado;

A_3 - Revenido a 350°C, durante 90 minutos, seguido de resfriamento em água;

A_4 - Revenido a 500°C, durante 90 minutos, seguido de resfriamento em água; e

A_5 - Revenido a 650°C durante 90 minutos, seguido de resfriamento em água.

O forno usado para aquecer os corpos de prova (amostras) foi o THERMOLYNE, tipo 1500, modelo nº F-C1525 M, para 1.200°C.

2.2.3 - Ensaios de Perda de Peso

2.2.3.1 - Preparação das Amostras

As amostras, depois de retificadas para 11,3 mm de diâmetro, foram cortadas na máquina DISCOTOM-STRUERS com 10 mm de comprimento e embutidas em lucite na Máquina BUEHLER, garantindo, assim, que apenas a área de 1,00 cm^2 ficasse em contato com a solução.

Antes, porém, de cada ensaio as amostras foram polidas mecanicamente na Lixadeira d'água STRUERS com lixas cujo tamanhos de grãos são de: 220, 320, 400 e 600 "mashes/polegada", seguidas de acabamento na Politriz de Feltro-STRUERS, com solução de Alumina (Al_2O_3), em suspensão, a 2%.

Em seguida as amostras foram lavadas em água corrente e secada com algodão e com secador de ar quente. As amostras foram pesadas em uma Balança Analítica LABOR-MIM, tipo LB-105, antes e depois de serem imersas nas soluções eletrolíticas de um Normal de ácido sulfúrico (1N-H_2SO_4),quan

do eram feitas as contagens de tempo de imersão (Horas) nos eletrólitos, com variação de concentração de óxido de Arsênio (As_2O_3).

2.2.3.2 - *Eletrólitos*

A solução eletrolítica foi preparada com ácido sulfúrico comercial em solução de água distilada, 1 normal , (pH=0,45). O potencial hidrogeniônico foi medido com o pH - metro METROHM E 520.

Nos ensaios foram usadas as seguintes soluções:

a) Solução de H_2SO_4- 1N
b) Solução de H_2SO_4- 1N, com 10 mg/l de As_2O_3
c) Solução de H_2SO_4- 1N, com 20 mg/l de As_2O_3
d) Solução de H_2SO_4- 1N, com 30 mg/l de As_2O_3
e) Solução de H_2SO_4- 1N, com 100 mg/l de As_2O_3
f) Solução de H_2SO_4- 1N, com 200 mg/l de As_2O_3
g) Solução de H_2SO_4- 1N, com 500 mg/l de As_2O_3

Ao término de cada ensaio as amostras (A_1, A_2, A_3, A_4 e A_5) eram lavadas e decaptadas durante 5 minutos em solução de H_2SO_4 a 10%, e em seguida lavadas em água corrente , secadas com ar quente e, então, novamente pesadas para verificação da perda de peso.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 - ENSAIOS DE DUREZA

O resultado dos ensaios de dureza, apresentados no quadro nº 2 abaixo, correspondem à média aritmética de pelo menos três medidas por corpo de prova ensaiado.

QUADRO 2 - ENSAIOS DE DUREZA DO AÇO AISI-420

Amostra	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
Estado	Recoz.	T.1050°C	R.350°C	R.500°C	R.600°C
Dureza RC	10	55	55	45	28

3.2 - EFEITO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS E DE CONCENTRAÇÃO DE ÓXIDO DE ARSÊNIO NAS CURVAS DE PERDA DE PESO

Com a finalidade de se verificar a influência de tratamentos térmicos e de concentrações de trióxido de Arsênio no comportamento à corrosão do aço inoxidável martensítico AISI-420, foram realizados muitos ensaios para se obter no mínimo 240 pontos básicos.

Como já foi citado os ensaios de corrosão foram realizados em meio ácido sulfúrico, utilizando-se Trióxido

de arsênio, como inibidor catódico.

Procurou-se determinar as taxas de corrosão para cada caso, em função da concentração do inibidor.

A taxa de corrosão de cada estrutura foi determinada pelo coeficiente angular (a_o) da porção linear de cada curva. Perda de peso "versus" tempo, depois de otimizadas no computador pelas retas de regressão, ajustadas pelos mínimos quadrados. Desta forma, os trechos retilíneos dos gráficos já foram traçados, levando-se em conta a otimização e obtendo-se do computador as coordenadas dos pontos para 24 e 48 horas.

3.2.1 - Ensaios de Perda de Peso e Taxas de Corrosão em Solução de H_2SO_4- 1N

O quadro nº 3 contém os valores observados nos ensaios de perda de peso das amostras imersas em solução aquosa de um normal de ácido sulfúrico (H_2SO_4-1N), sem a presença de inibidor(pH=0,45).

QUADRO 3 - PERDA DE PESO EM SOLUÇÃO DE H_2SO_4-1N - mg/cm^2

Amostras	Tempo de imersão - em horas					
	12	18	24	36	48	60
A_1	26,9	69,2	128,2	244,5	390,4	502,8
A_2	61,6	131,6	234,1	366,2	595,5	743,7
A_3	62,5	119,1	210,5	394,7	597,2	776,3
A_4	62,2	130,9	224,3	425,2	625,3	840,0
A_5	26,8	74,0	178,2	350,0	510,3	700,0

As curvas de perda de peso em meio H_2SO_4-1N , correspondente às cinco estruturas estudadas (A_1, A_2, A_3, A_4 e A_5), estão representados nas figuras de nºs. 4 a 9.

Na figura 9 estão reunidas as curvas de perda de peso das cinco estruturas.

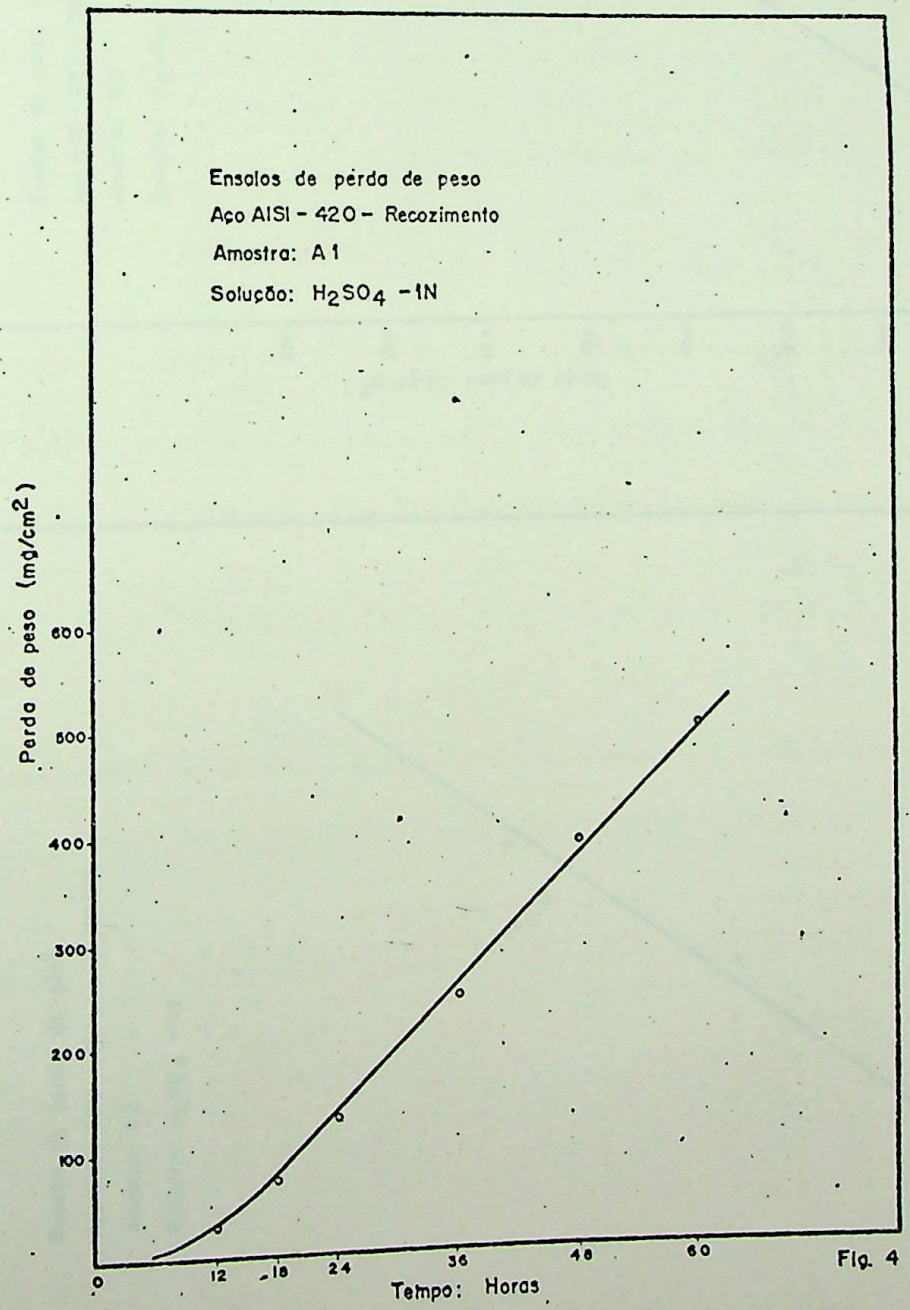


Fig. 4

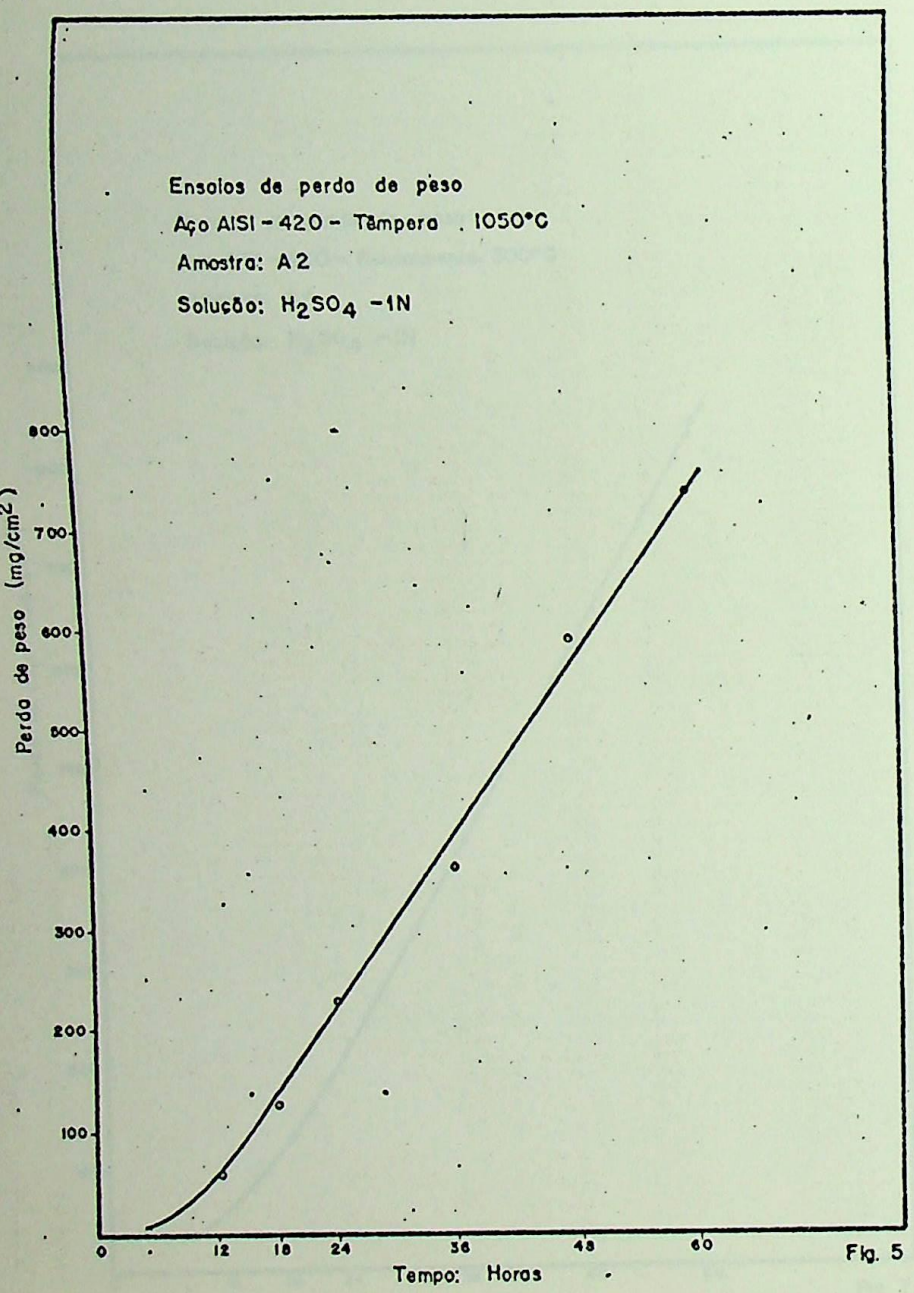

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Têmpera 1050°C
Amostra: A 2
Solução: H_2SO_4 -1N
Perda de peso (mg/cm²)
100
200
300
400
500
600
700
800
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 5

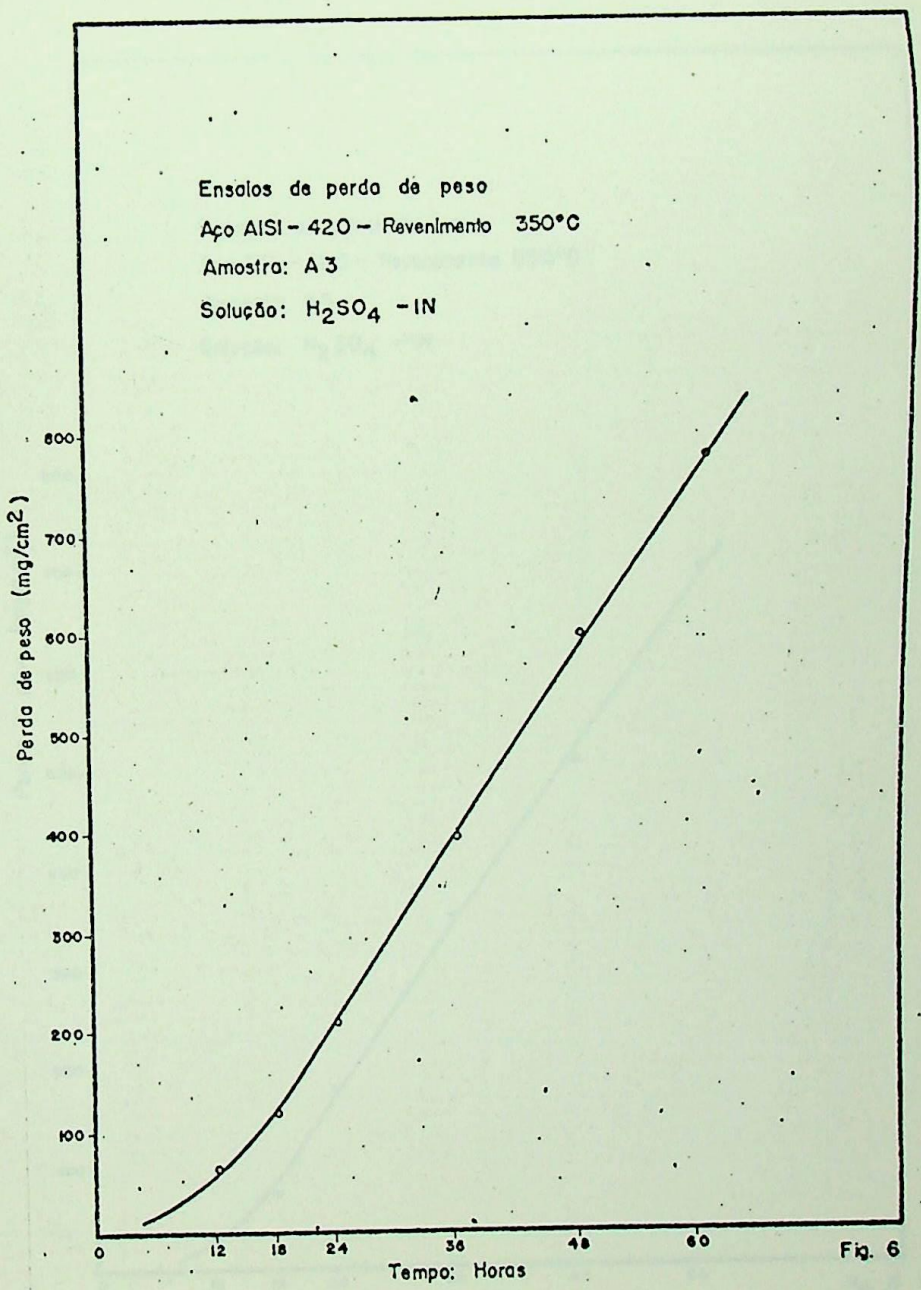

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Revenimento 350°C
Amostra: A 3
Solução: H_2SO_4 -1N
Perda de peso (mg/cm²)
100
200
300
400
500
600
700
800
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 6

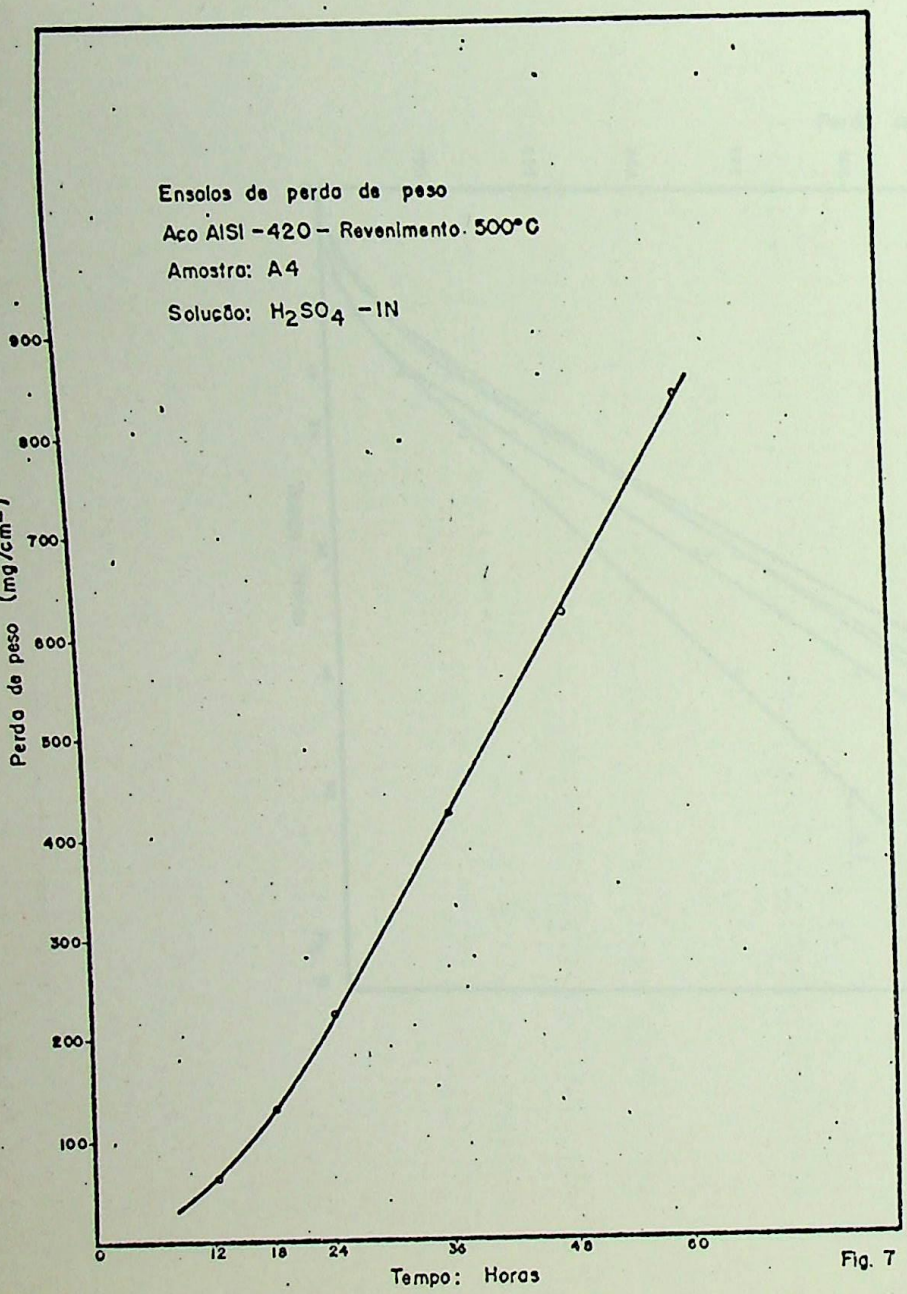

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Revenimento 500°C
Amostra: A4
Solução: H_2SO_4 - 1N
Perda de peso (mg/cm²)
100
200
300
400
500
600
700
800
900
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 7

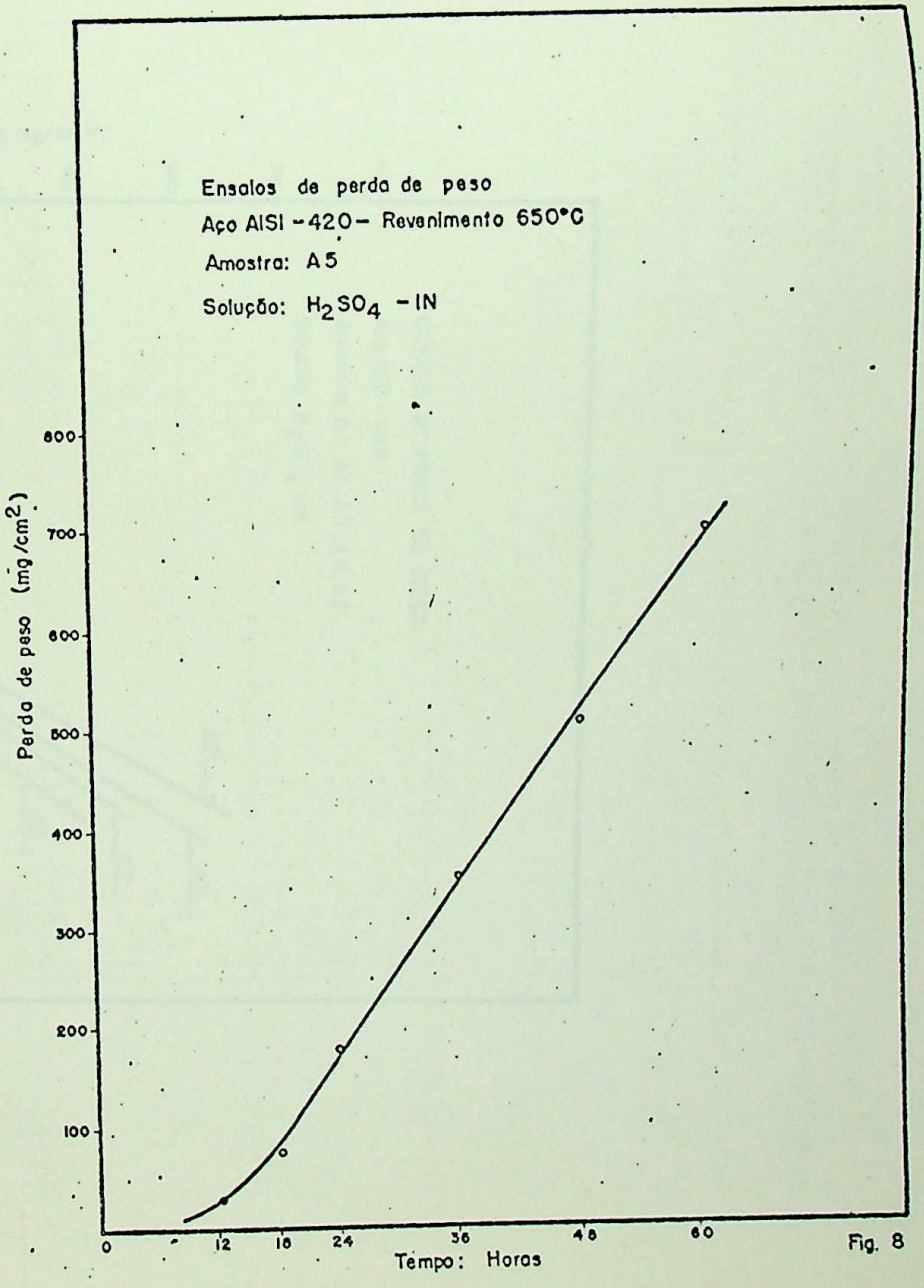

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Revenimento 650°C
Amostra: A5
Solução: H_2SO_4 - 1N
Perda de peso (mg/cm²)
100
200
300
400
500
600
700
800
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 8

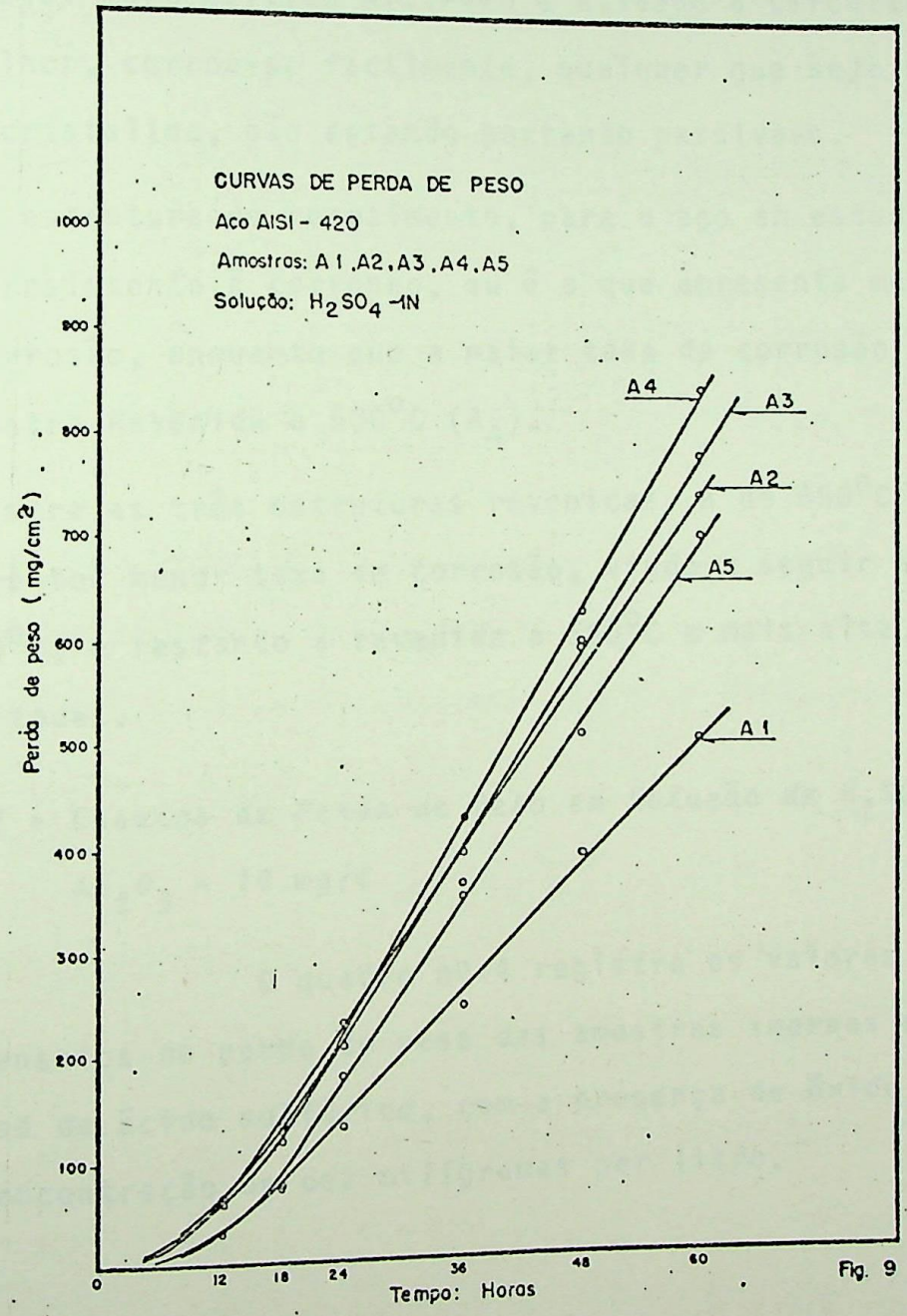

CURVAS DE PERDA DE PESO
Aco AISI - 420
Amostras: A1, A2, A3, A4, A5
Solução: H_2SO_4 -1N
A4
A3
A2
A5
A1
Perda de peso (mg/cm²)
1000
800
700
600
500
400
300
200
100
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 9

Obsevações:

Fazendo-se a primeira anãlise, constatamos que:

1º) Em meio corrosivo de ãcido sulfúrico (H_2SO_4-1N), o aço inoxidável martensítico AISI-420 é ativado a circuito aberto, ou melhor, corroe-se facilmente, qualquer que seja sua estrutura cristalina, não estando portanto passivado.

2º) A estrutura de recozimento, para o aço em estudo, é a mais resistente à corrosão, ou é a que apresenta menor taxa de corrosão, enquanto que a maior taxa de corrosão foi para a amostra Revenida a 500°C (A_4).

3º) Entre as três estruturas revenidas, a de 650°C foi a que apresentou menor taxa de corrosão, vindo a seguir a revenida a 350°C, e restando a revenida a 500°C e mais alta das três, e de todas.

3.2.2 - *Ensaios de Perda de Peso em Solução de* H_2SO_4-1N, *com* As_2O_3 - 10 mg/ℓ

O quadro nº 4 registra os valores observados nos ensaios de perda de peso das amostras imersas em solução aquosa de ãcido sulfúrico, com a presença de óxido de Arsênio, na concentração de dez miligramas por litro.

QUADRO 4 - PERDA DE PESO EM SOLUÇÃO DE H_2SO_4-1N- mg/cm^2
CONCENTRAÇÃO DE As_2O_3 - 10 mg/l

Amostras	Tempo de Imersão - em Horas					
	12	18	24	36	48	60
A_1	5,3	46,9	84,2	300,5	566,9	779,6
A_2	133,5	268,5	329,5	520,8	745,5	932,4
A_3	79,3	151,7	256,3	468,2	672,6	854,7
A_4	55,4	124,5	309,4	601,2	847,5	1.142,4
A_5	46,6	191,3	377,8	607,6	858,2	1.010,3

As curvas de perda de peso em meio H_2SO_4-1N, com 10 mg/l de As_2O_3, correspondente às cinco estruturas estão representadas nas figuras de nºs 10 a 15.

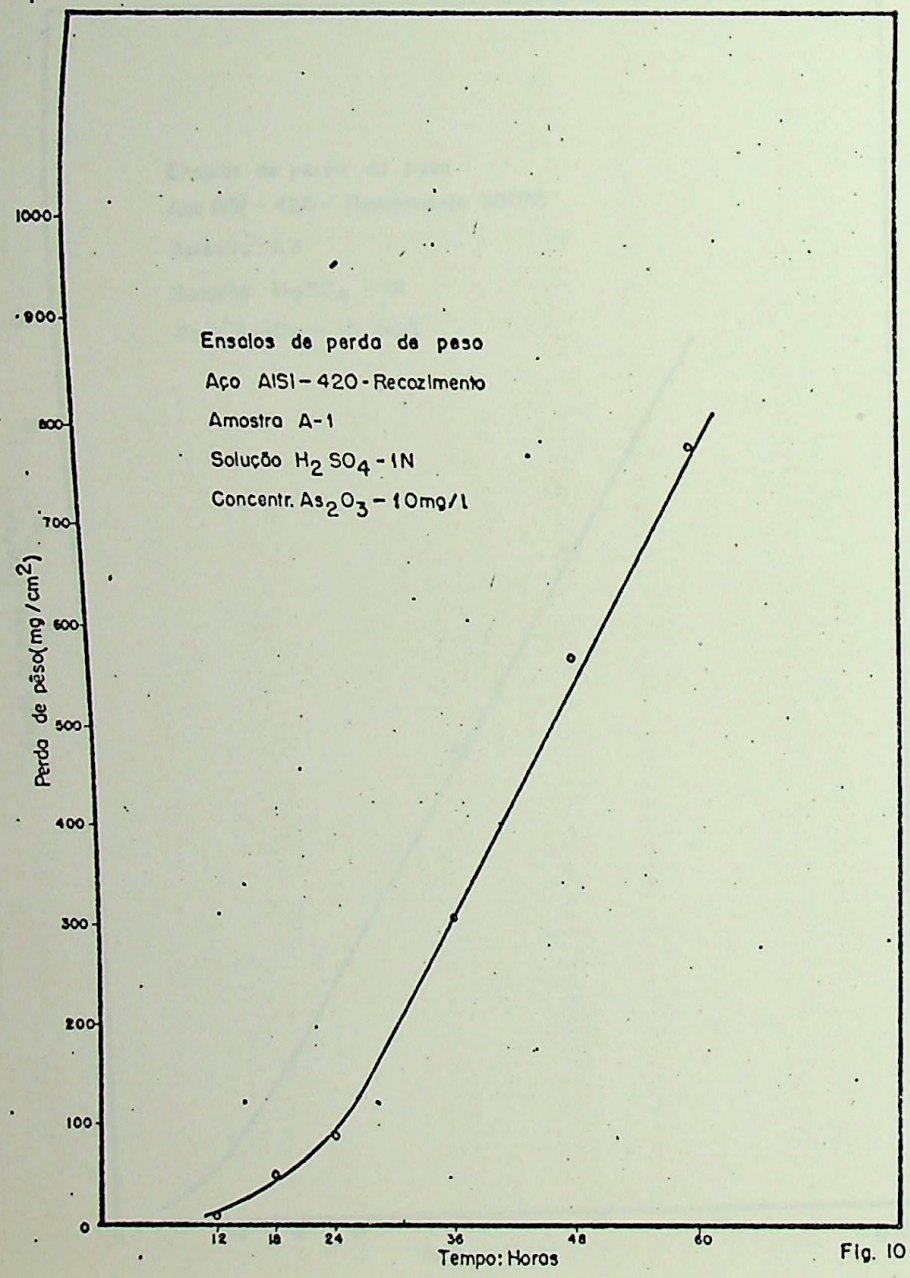

Ensaios de perda de peso
Aço AISI-420-Recozimento
Amostra A-1
Solução H_2SO_4 - 1N
Concentr. As_2O_3 - 10mg/l
Perda de peso(mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 10

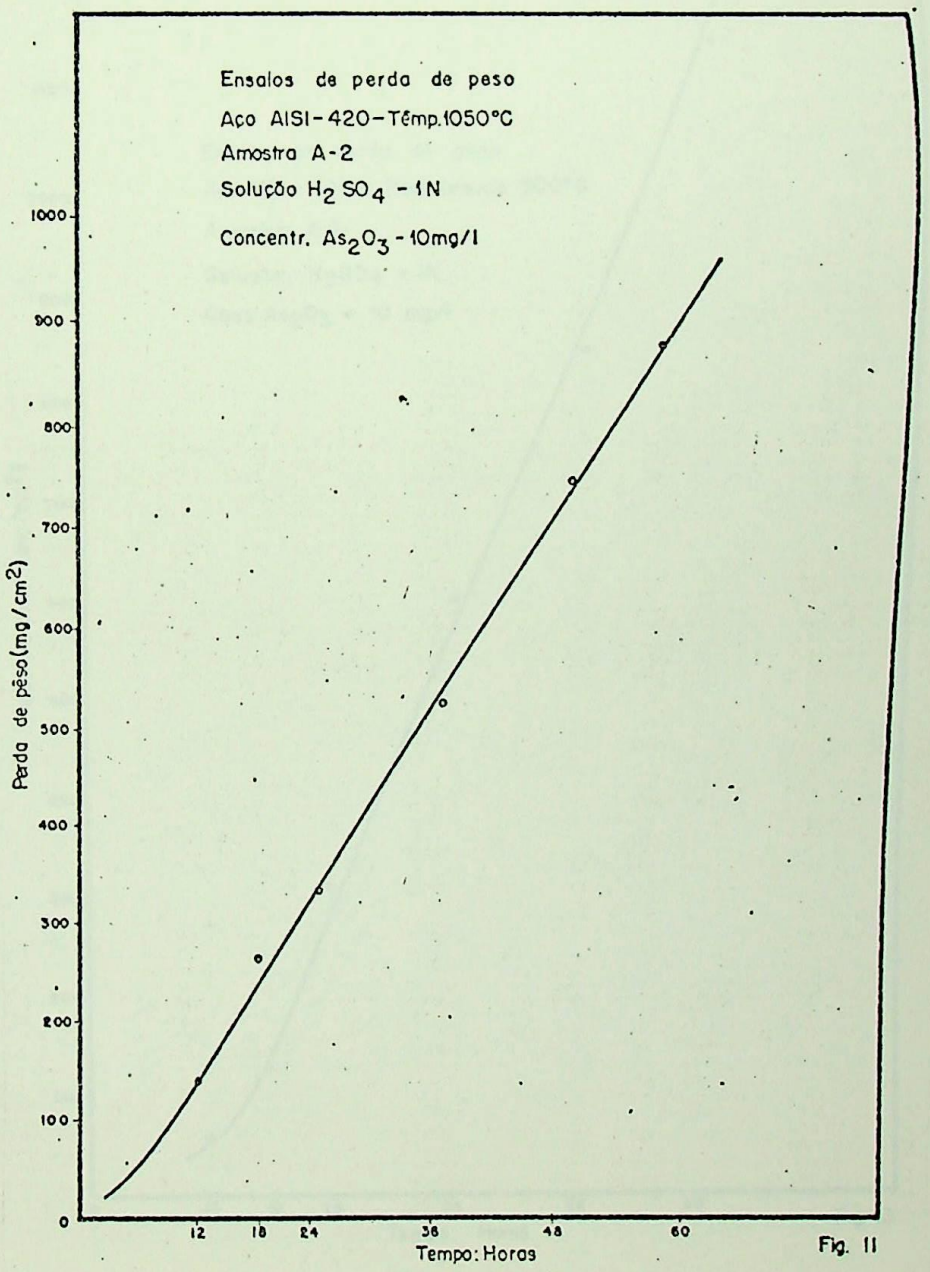

Ensaios de perda de peso
Aço AISI-420-Têmp.1050°C
Amostra A-2
Solução H_2SO_4 - 1N
Concentr. As_2O_3 - 10mg/l
Perda de peso(mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 11

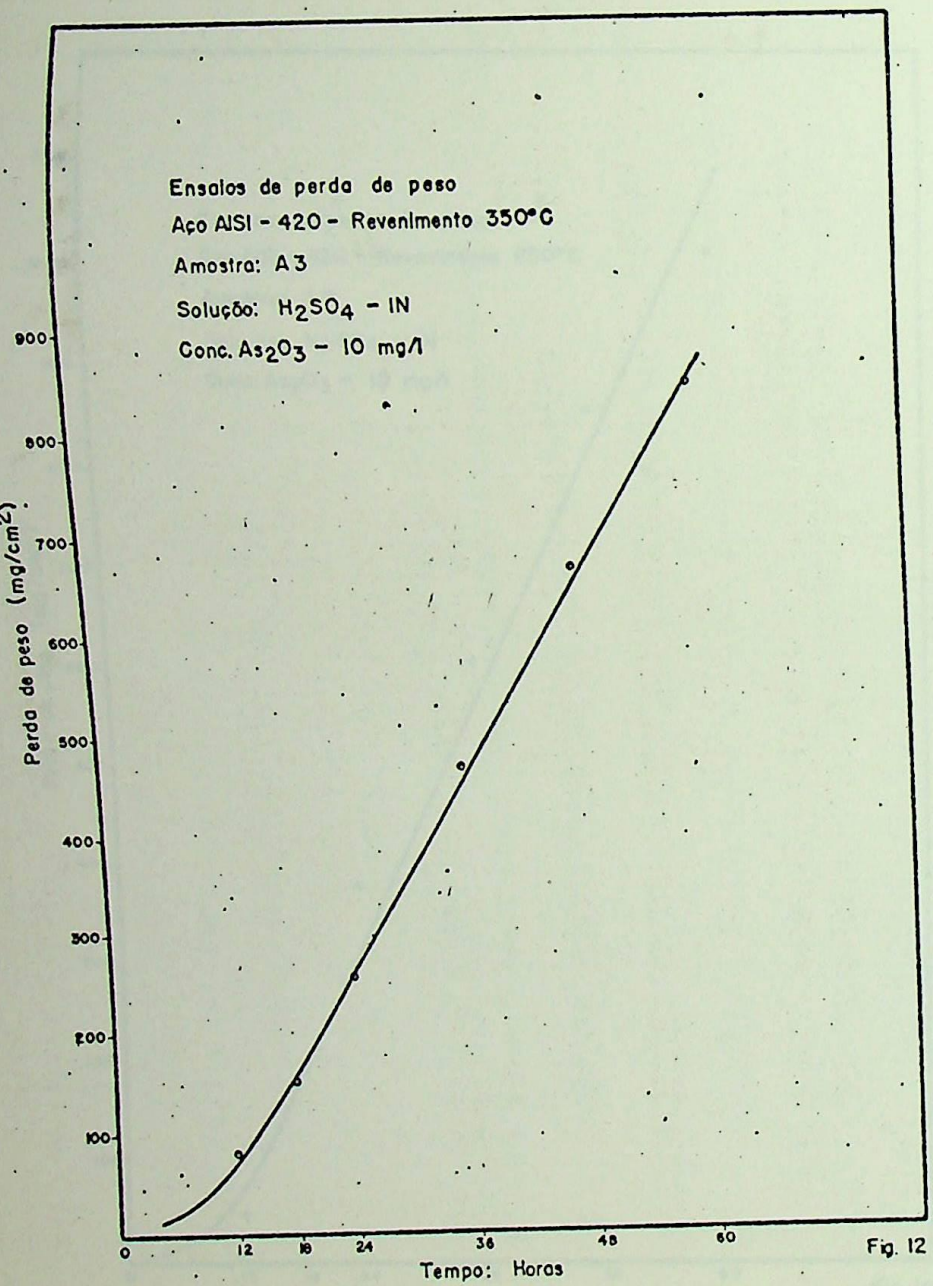

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Revenimento 350°C
Amostra: A3
Solução: H_2SO_4 - 1N
Conc. As_2O_3 - 10 mg/l
Perda de peso (mg/cm2)
100
200
300
400
500
600
700
800
900
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 12

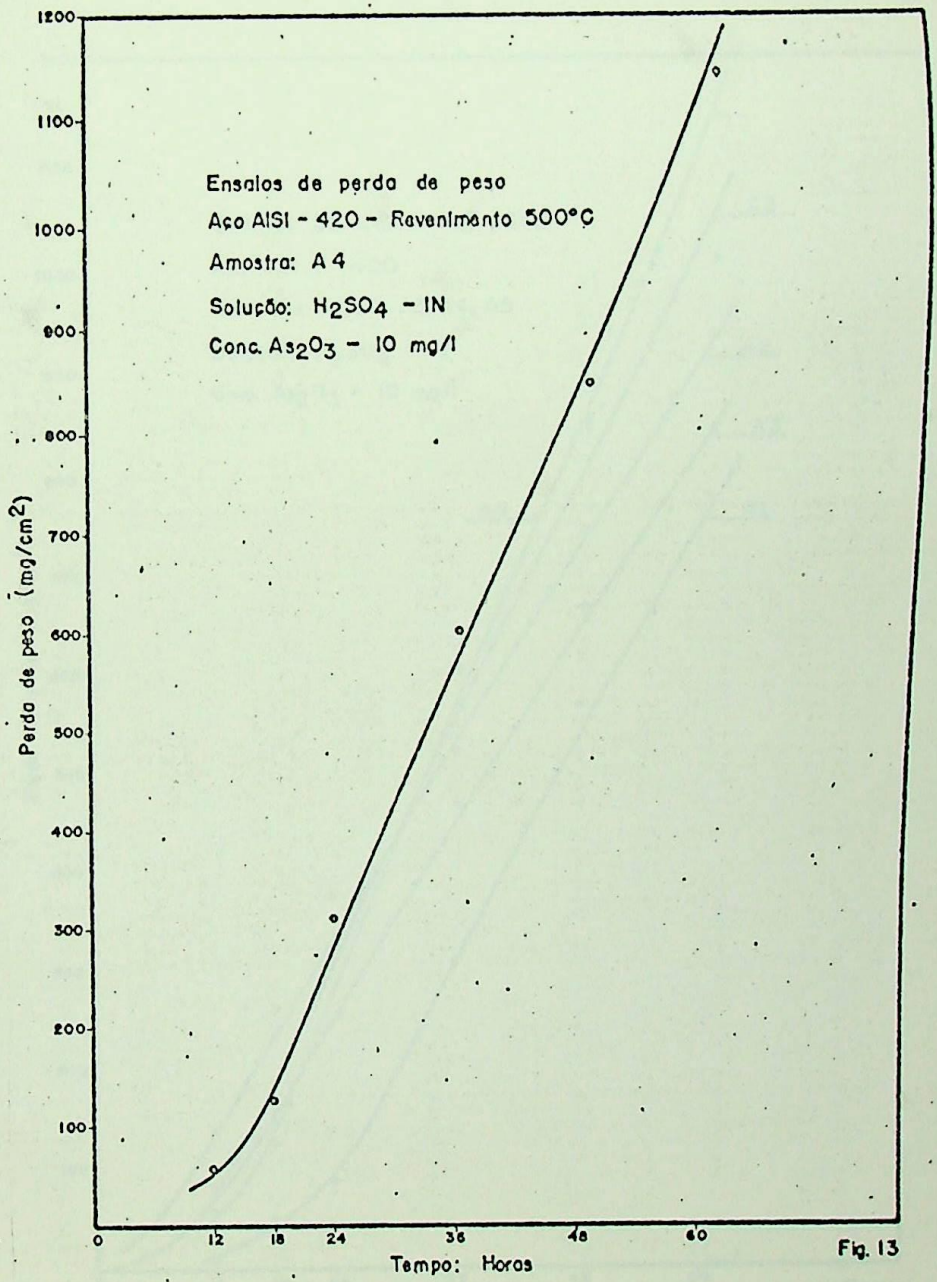

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Revenimento 500°C
Amostra: A4
Solução: H_2SO_4 - 1N
Conc. As_2O_3 - 10 mg/l
Perda de peso (mg/cm2)
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 13

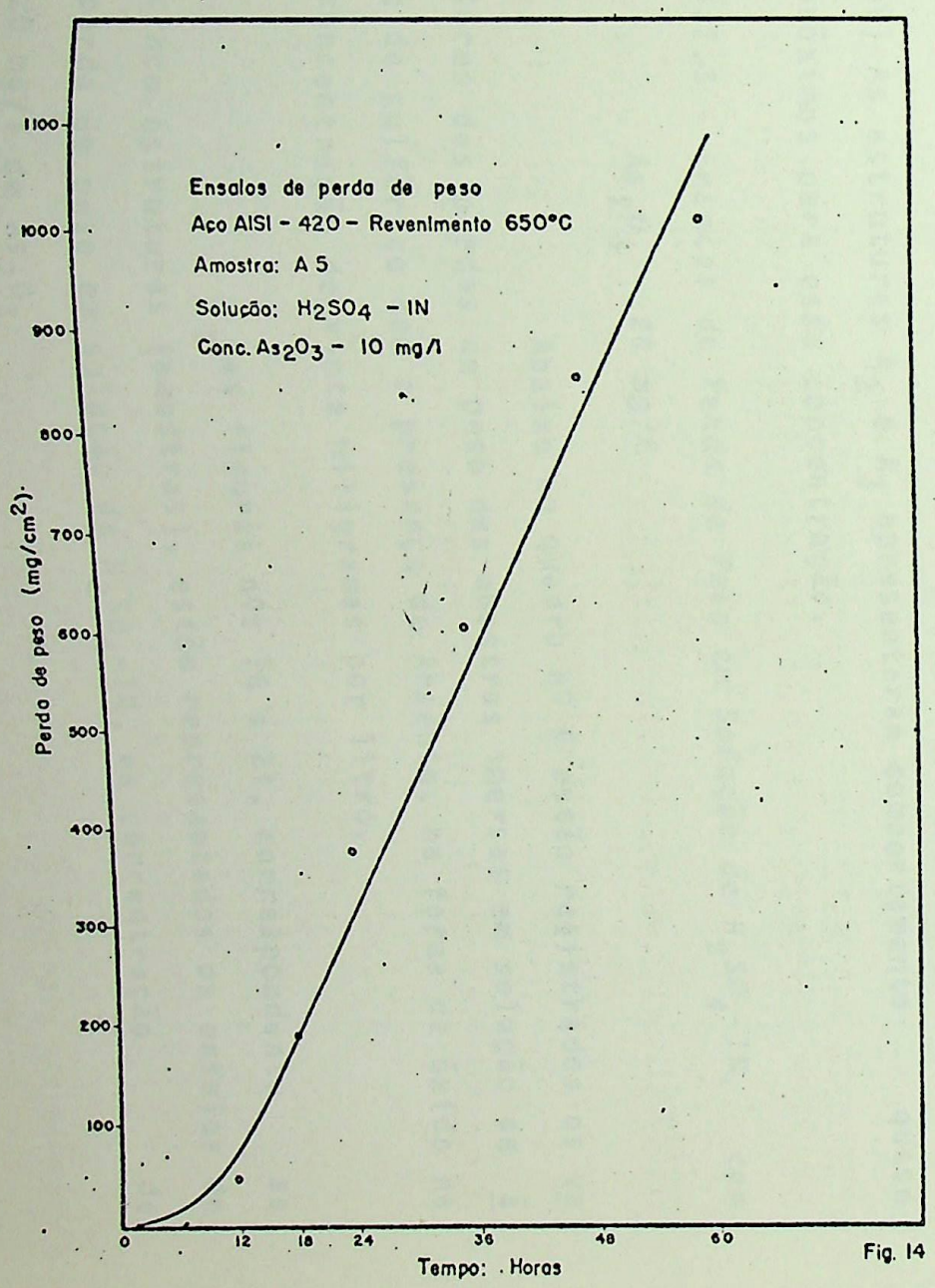

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Revenimento 650°C
Amostra: A 5
Solução: H_2SO_4 - 1N
Conc. As_2O_3 - 10 mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
Tempo: Horas
0
12
18
24
36
48
60
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100

Fig. 14

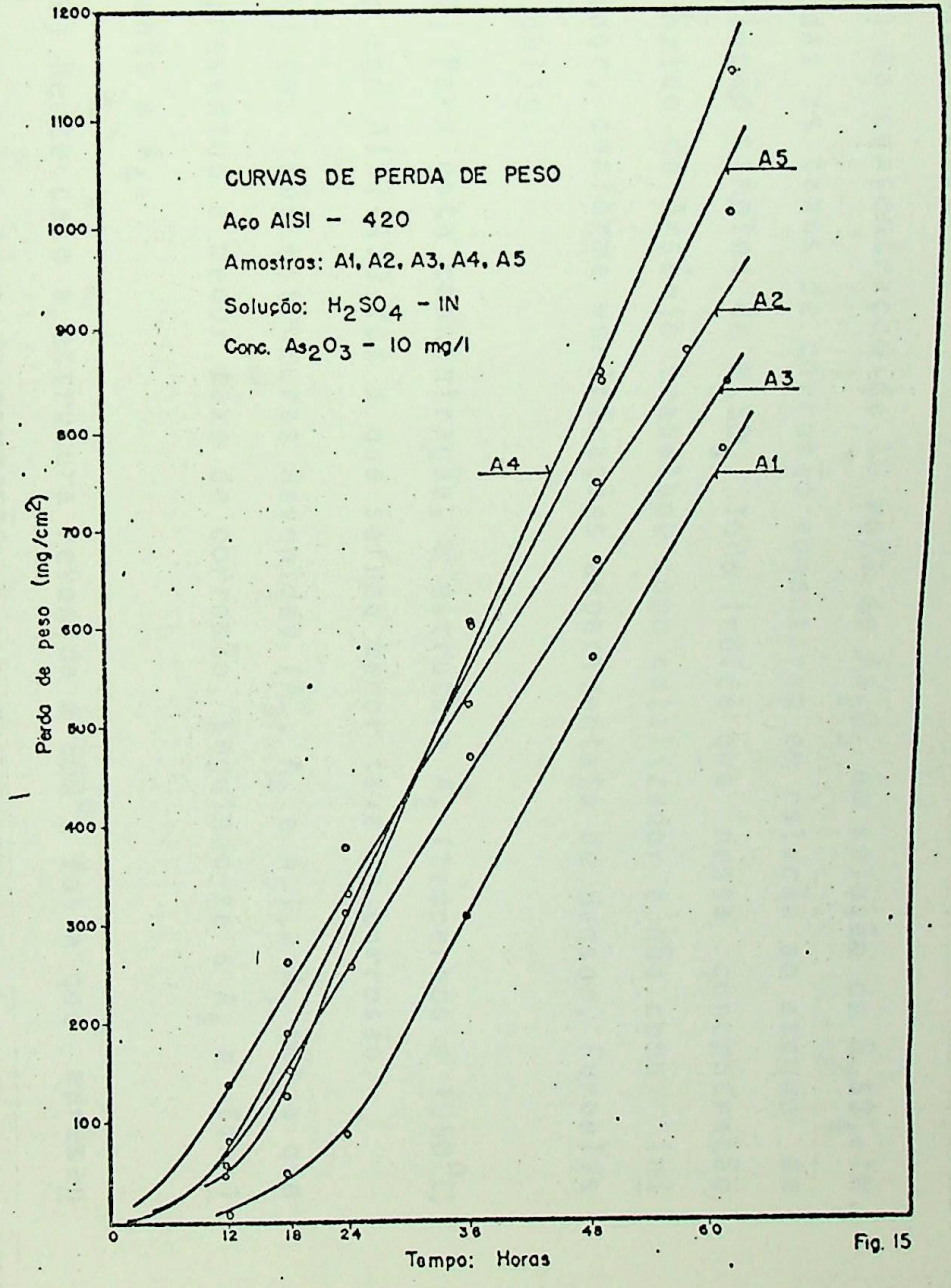

CURVAS DE PERDA DE PESO
Aço AISI - 420
Amostras: A1, A2, A3, A4, A5
Solução: H_2SO_4 - 1N
Conc. As_2O_3 - 10 mg/l
A5
A2
A3
A4
A1
Perda de peso (mg/cm²)
Tempo: Horas
0
12
18
24
36
48
60
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200

Fig. 15

Observações:

1º) Na concentração de 10 mg/l de As_2O_3 em solução de H_2SO_4-1N, todas as taxas de corrosão aumentaram em relação ao ataque de solução simples de H_2SO_4. Tudo indica que nessa concentração o óxido de Arsênio trabalhou como catalizador e não como inibidor, conforme verificações experimentais de Hudson, Furoulis e Uhlig.

2º) Para esta concentração, a estrutura A_2 (temperado a 1050°C) do aço AISI-420 foi a que sofreu menor taxa de corrosão.

3º) Das três estruturas Revenidas (A_3, A_4 e A_5), a A_3 foi a que apresentou a menor taxa de corrosão, seguindo-se a A_5 e finalmente a A_4.

4º) Neste caso a estrutura revenida a 500°C foi a que apresentou a maior taxa de corrosão.

5º) As estruturas A_2 e A_3 apresentaram comportamento quase próximos para essa concentração.

3.2.3 - *Ensaios de Perda de Peso em Solução de H_2SO_4-1N, com As_2O_3 - 20 mg/ℓ*

Abaixo no quadro nº 5 estão registrados os valores das perdas de peso das amostras imersas em solução de ácido sulfúrico com a presença de Arsênio, na forma de óxido na concentração de vinte miligramas por litro.

Nas figuras nºs 16 a 21, correspondente as cinco estruturas (amostras), estão representados os ensaios de perda de peso em solução de H_2SO_4-1N, na concentração de 20 mg/l de As_2O_3.

QUADRO 5 - PERDA DE PESO EM SOLUÇÃO DE H_2SO_4-1N mg/cm^2
CONCENTRAÇÃO DE As_2O_3-20 mg/l

Amostras	Tempo de Imersão - em Horas					
	12	18	24	36	48	60
A_1	0,0	8,1	40,6	123,5	274,9	348,5
A_2	80,4	158,7	285,8	449,9	740,1	932,5
A_3	66,6	163,2	254,8	458,0	695,6	887,7
A_4	114,3	201,5	302,2	502,1	736,4	920,7
A_5	16,0	89,8	155,9	419,6	598,3	778,2

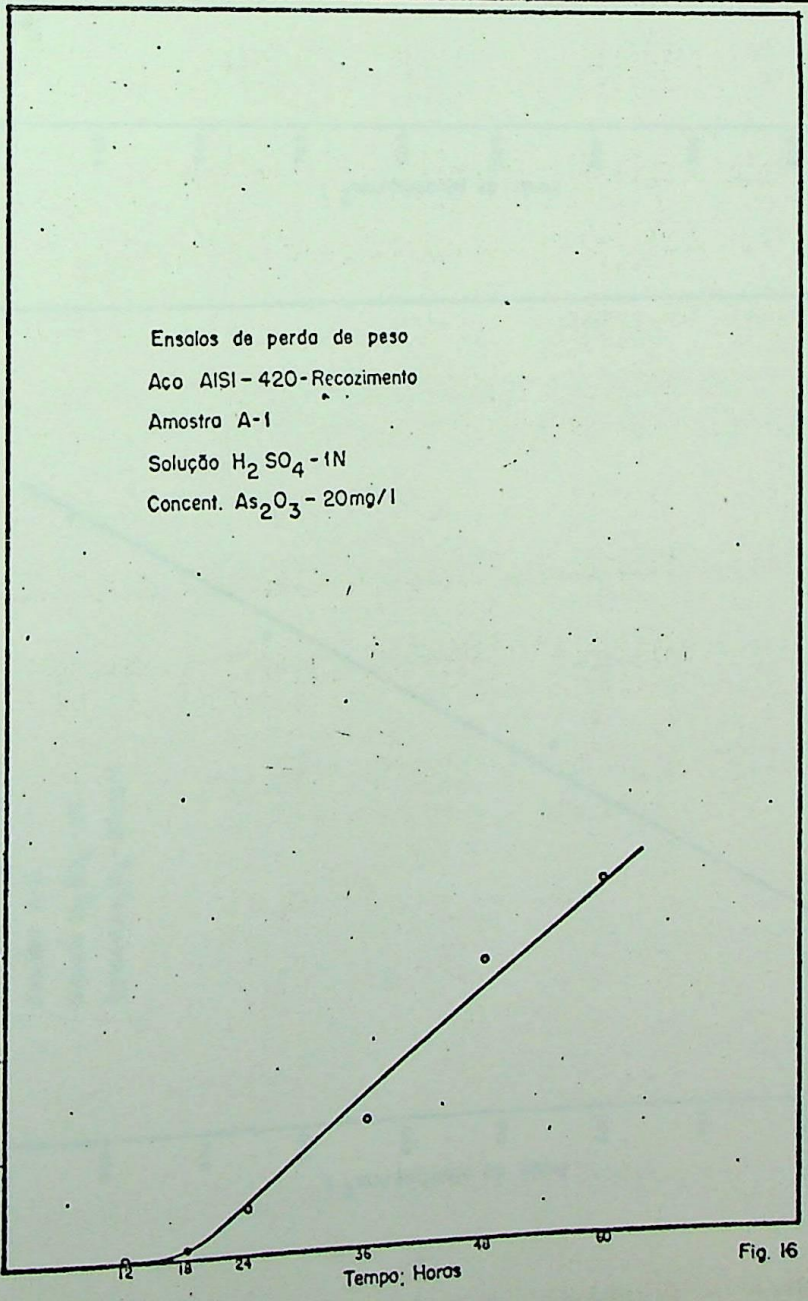


Fig. 16

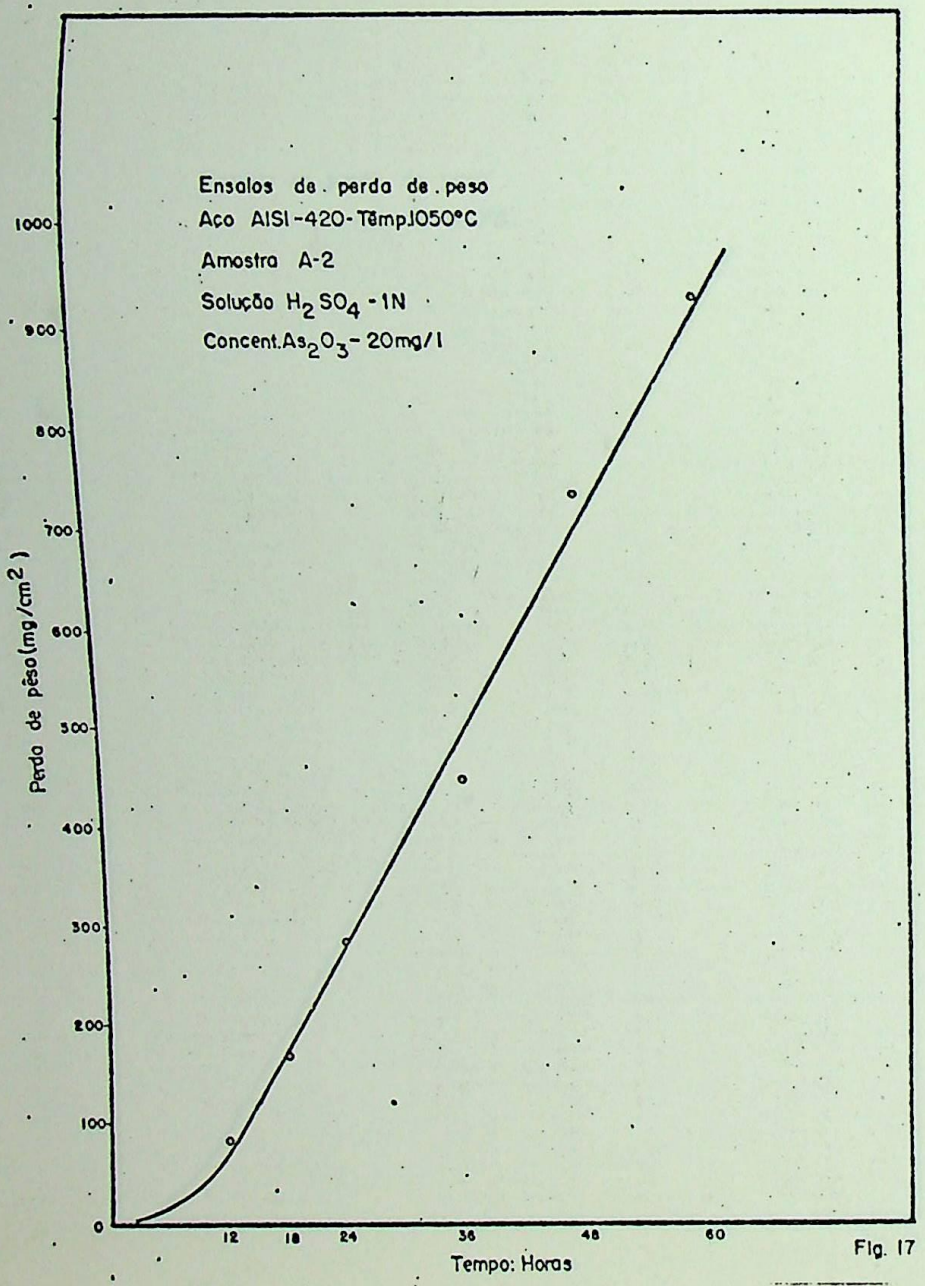

Ensaios de perda de peso
Aço AISI-420-Temp.1050°C
Amostra A-2
Solução H_2SO_4 - 1N
Concent. As_2O_3 - 20mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 17

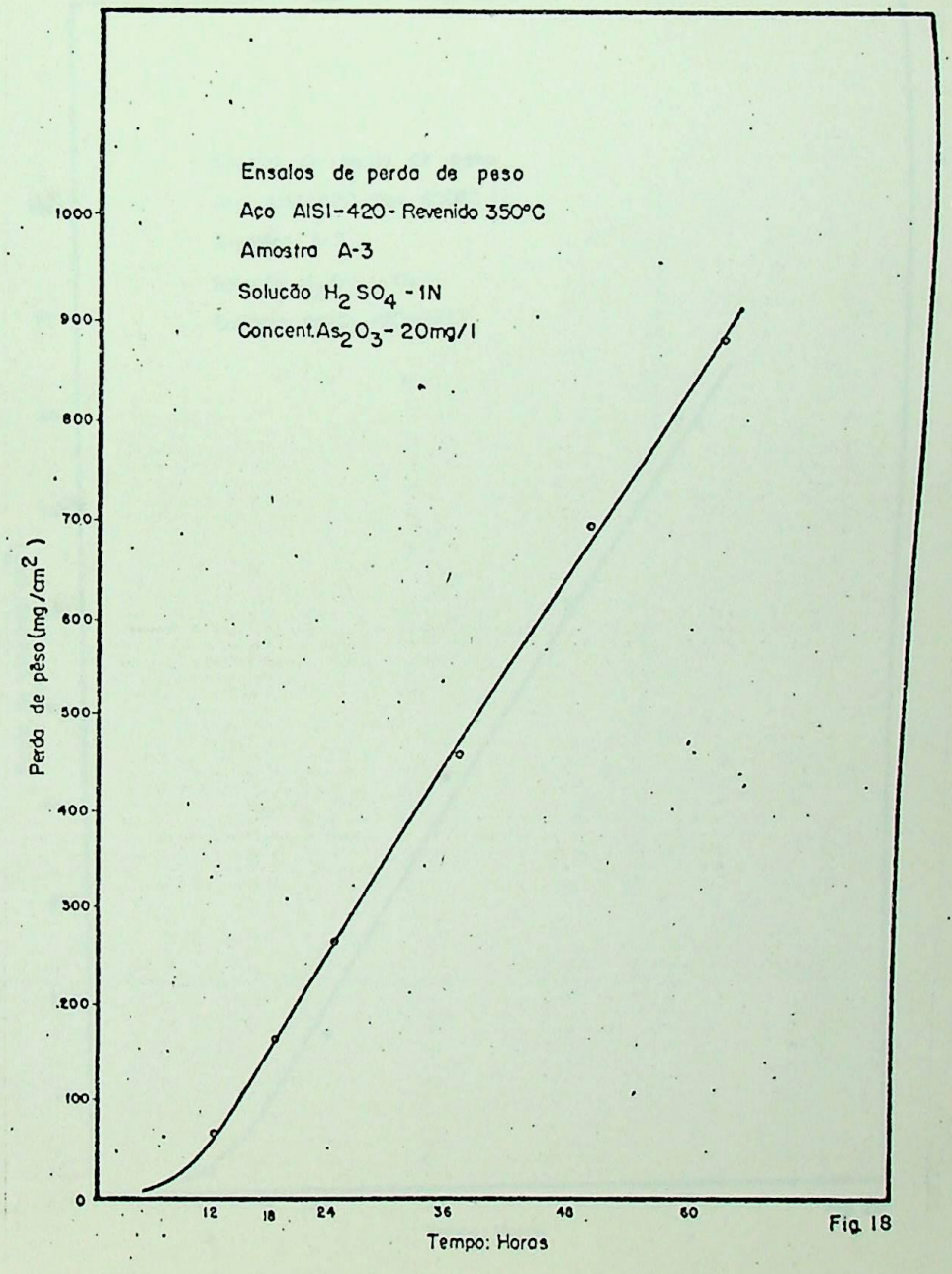

Ensaios de perda de peso
Aço AISI-420- Revenido 350°C
Amostra A-3
Solucão H_2SO_4 - 1N
Concent. As_2O_3 - 20mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 18

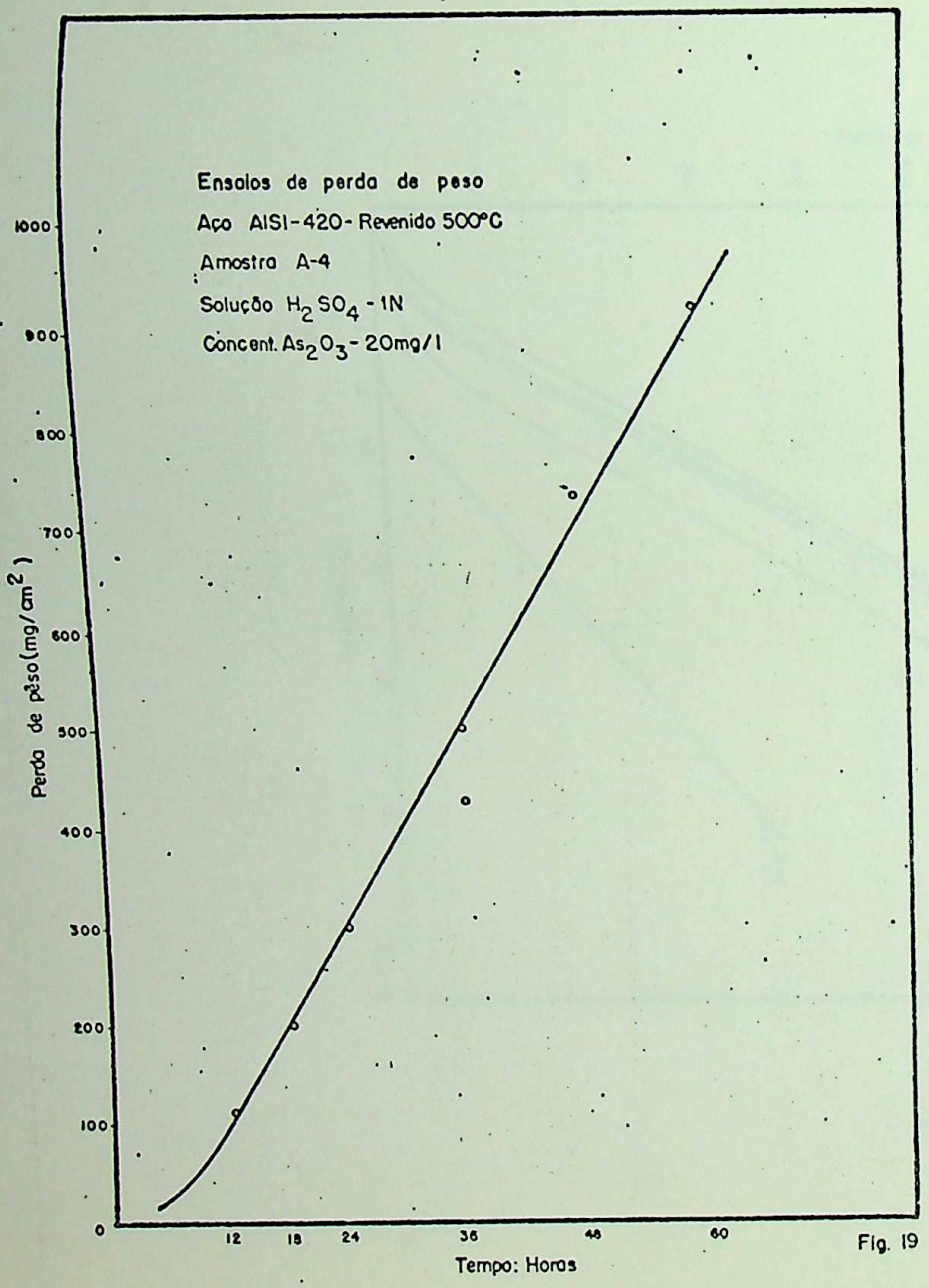

Ensaios de perda de peso
Aço AISI-420- Revenido 500°C
Amostra A-4
Solução H_2SO_4 - 1N
Concent. As_2O_3 - 20mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 19

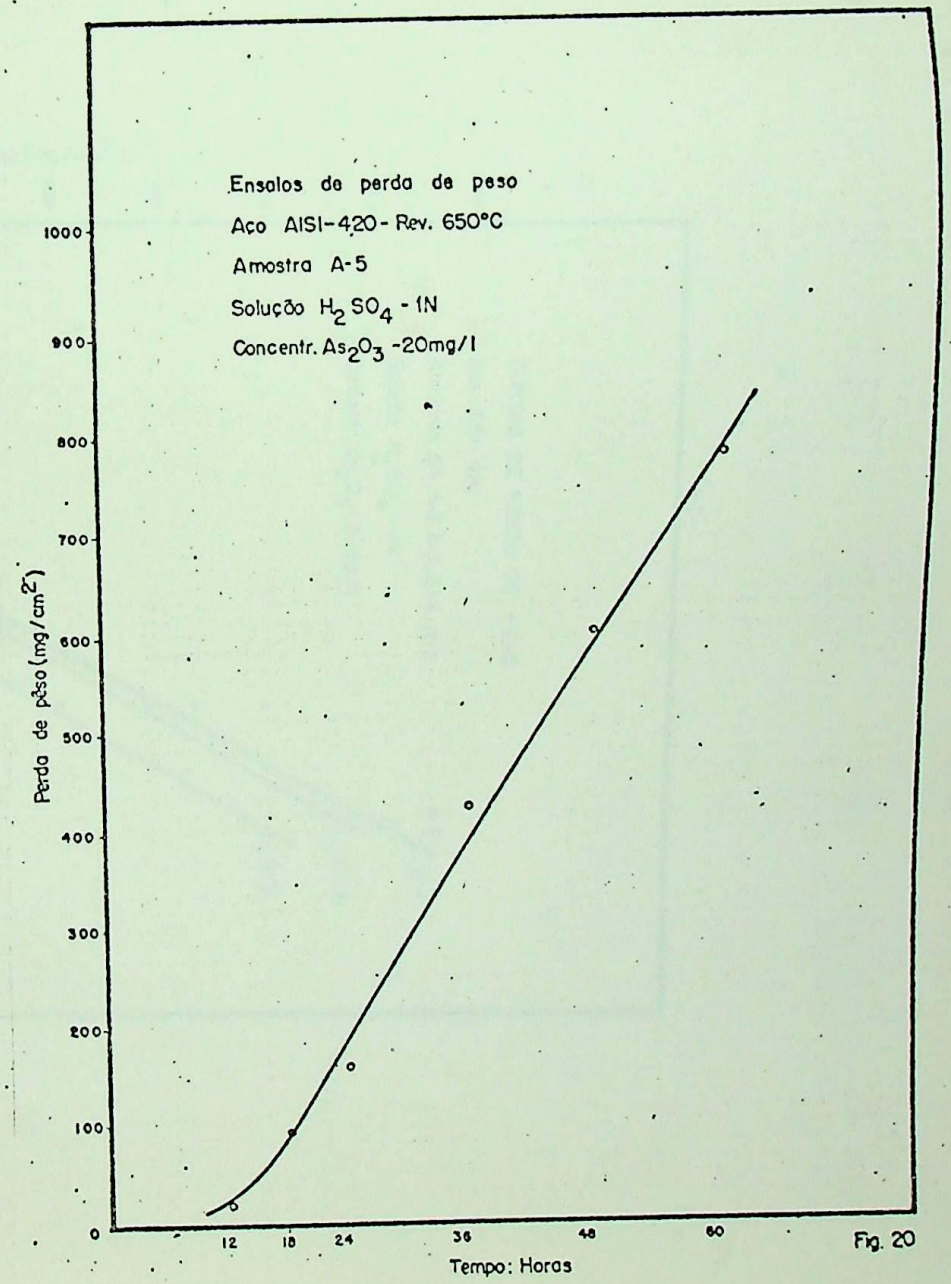

Ensaios de perda de peso
Aço AISI-420- Rev. 650°C
Amostra A-5
Solução H_2SO_4 - 1N
Concentr. As_2O_3 -20mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 20

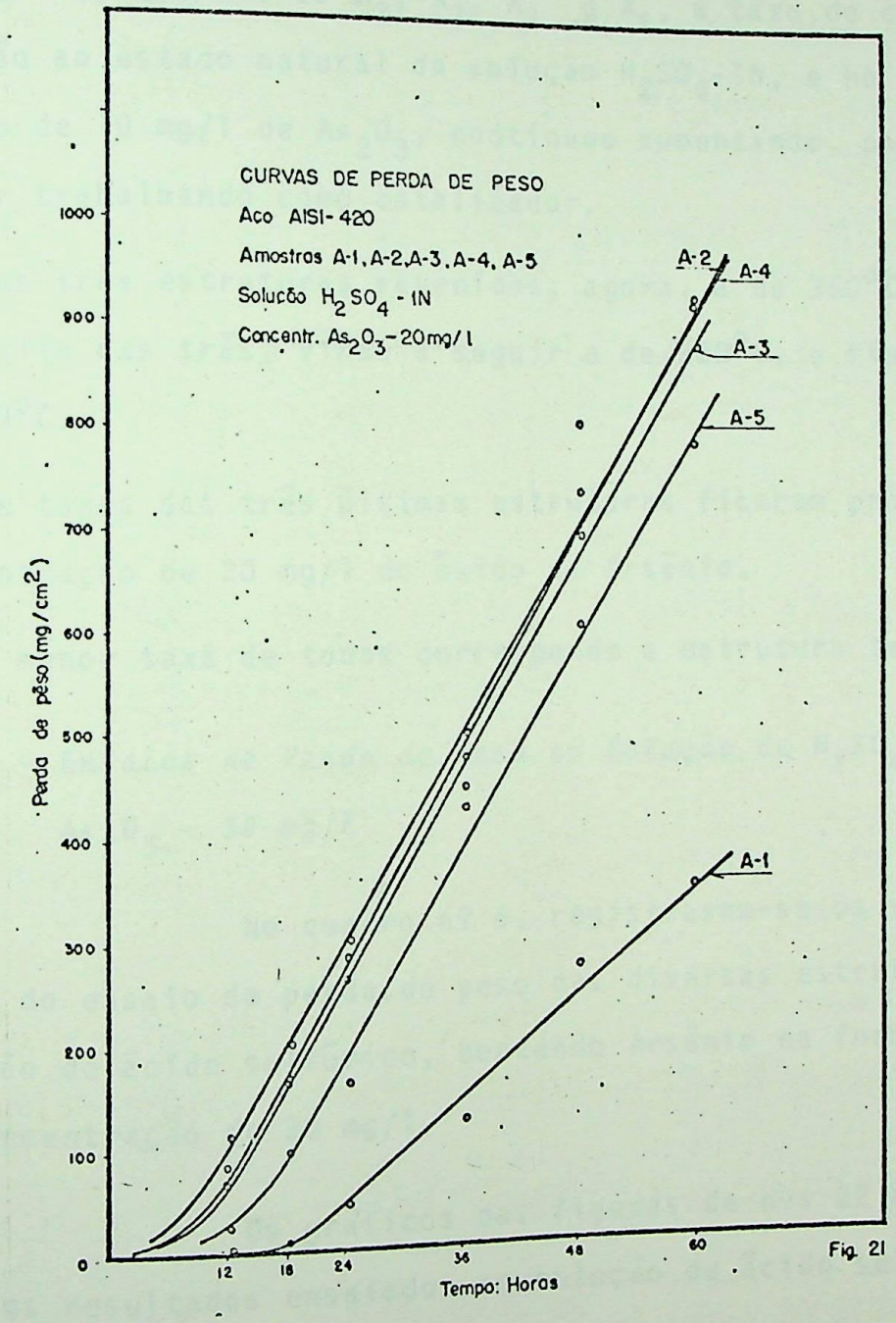

CURVAS DE PERDA DE PESO
Aco AISI-420
Amostras A-1, A-2, A-3, A-4, A-5
Solução H_2SO_4 - 1N
Concentr. As_2O_3 - 20mg/l
A-2
A-4
A-3
A-5
A-1
Perda de peso (mg/cm²)
Tempo: Horas
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
12
18
24
36
48
60

Fig. 21

Observações:

1º) A estrutura de recozimento (A_1) foi a que menor taxa de corrosão apresentou em relação às demais.

2º) Para as estruturas A_2, A_3, A_4 e A_5, a taxa de corrosão em relação ao estado natural da solução H_2SO_4-1N, e no da concentração de 10 mg/l de As_2O_3, continuou aumentando, parecendo continuar trabalhando como catalizador.

3º) Das três estruturas revenidas, agora, a de 350°C foi a mais alta das três, vindo a seguir a de 500°C, e finalmente a de 650°C.

4º) As taxas das três últimas estruturas ficaram próximas nessa concentração de 20 mg/l do óxido de Arsênio.

5º) A menor taxa de todas corresponde a estrutura temperada.

3.2.4 - *Ensaios de Perda de Peso em Solução de* H_2SO_4-1N, com As_2O_3 - 30 mg/ℓ

No quadro nº 6, registraram-se os valores obtidos do ensaio de perda de peso das diversas estruturas, em solução de ácido sulfúrico, contendo Arsênio na forma de Óxido, na concentração de 30 mg/l.

Os gráficos das figuras de nºs 22 a 27 mostram os resultados ensaiados em solução de ácido sulfúrico na concentração de 30 mg/l de As_2O_3.

QUADRO 6 - PERDA DE PESO EM SOLUÇÃO DE H_2SO_4-1N - mg/cm^2
CONCENTRAÇÃO DE As_2O_3 - 30 mg/l

Amostras	Tempo de Imersão - em Horas					
	12	18	24	36	48	60
A_1	52,0	130,2	236,4	377,3	466,5	587,6
A_2	92,2	116,3	211,8	404,7	675,8	854,4
A_3	50,3	108,7	214,8	452,1	642,4	941,8
A_4	76,2	115,3	313,8	512,5	678,3	843,6
A_5	33,8	53,7	217,2	303,4	537,9	663,5

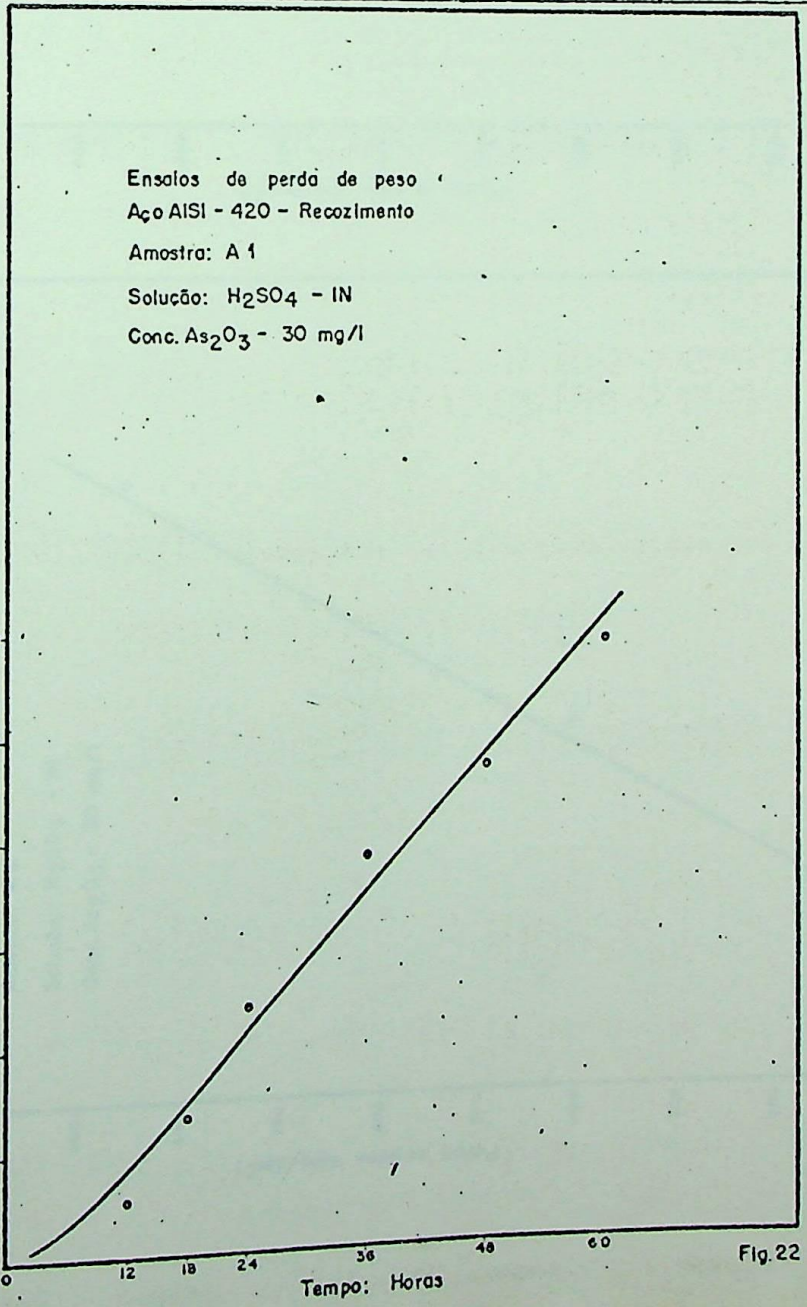


Fig. 22

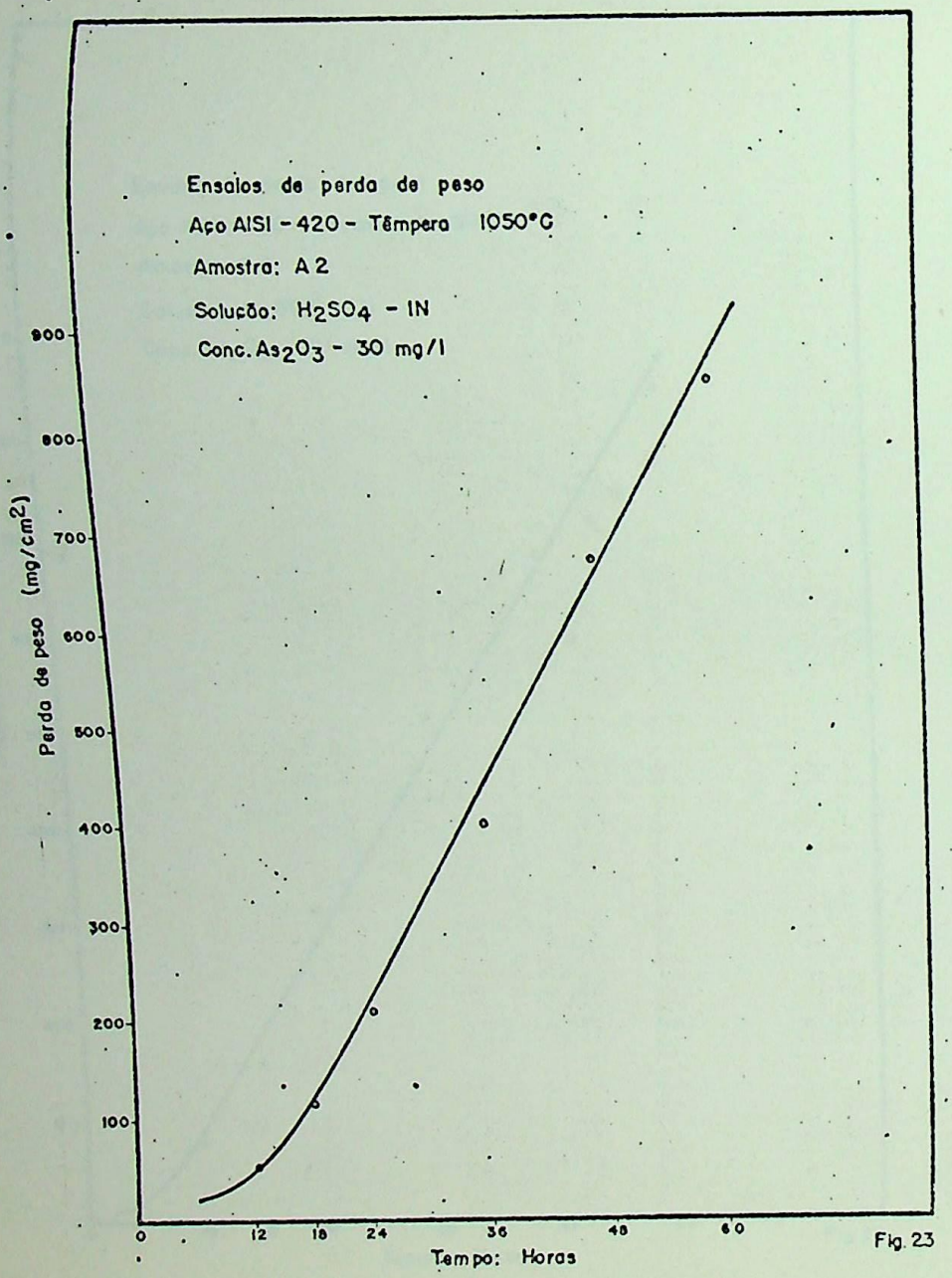

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Têmpera 1050°C
Amostra: A 2
Solução: H_2SO_4 - 1N
Conc. As_2O_3 - 30 mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
100
200
300
400
500
600
700
800
900
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 23

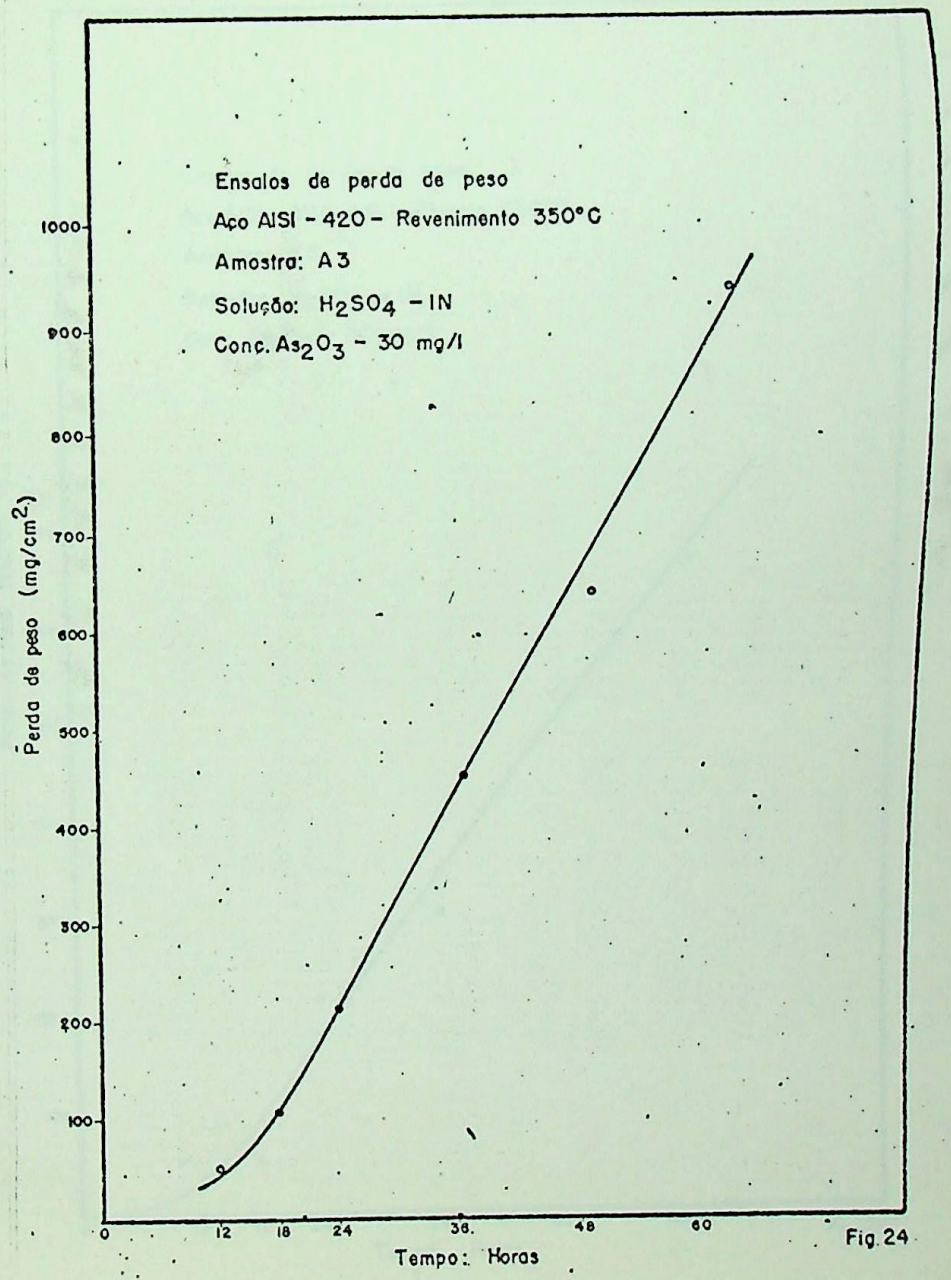

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Revenimento 350°C
Amostra: A 3
Solução: H_2SO_4 - 1N
Conc. As_2O_3 - 30 mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 24

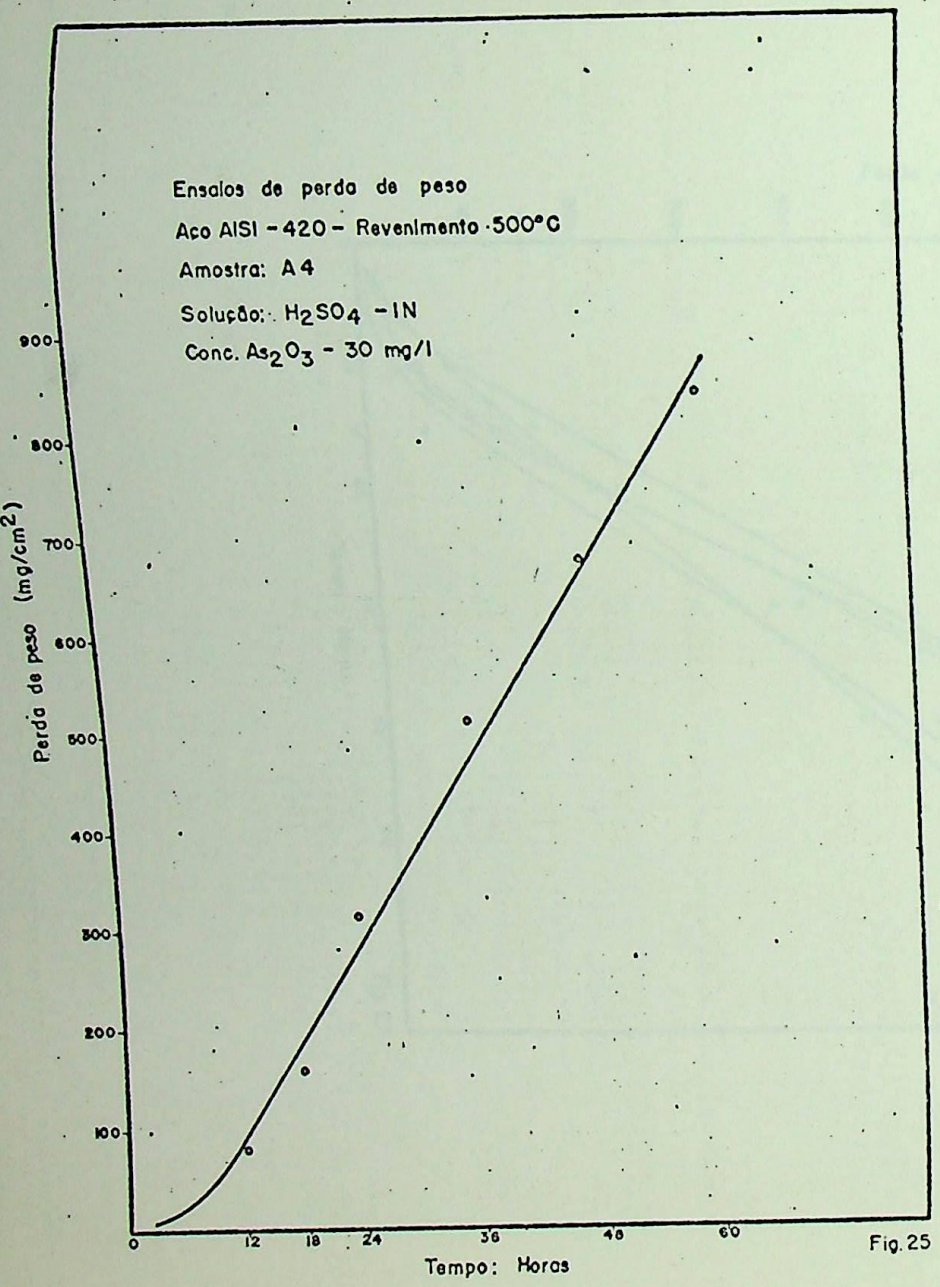

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Revenimento 500°C
Amostra: A 4
Solução: H_2SO_4 - 1N
Conc. As_2O_3 - 30 mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
100
200
300
400
500
600
700
800
900
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 25

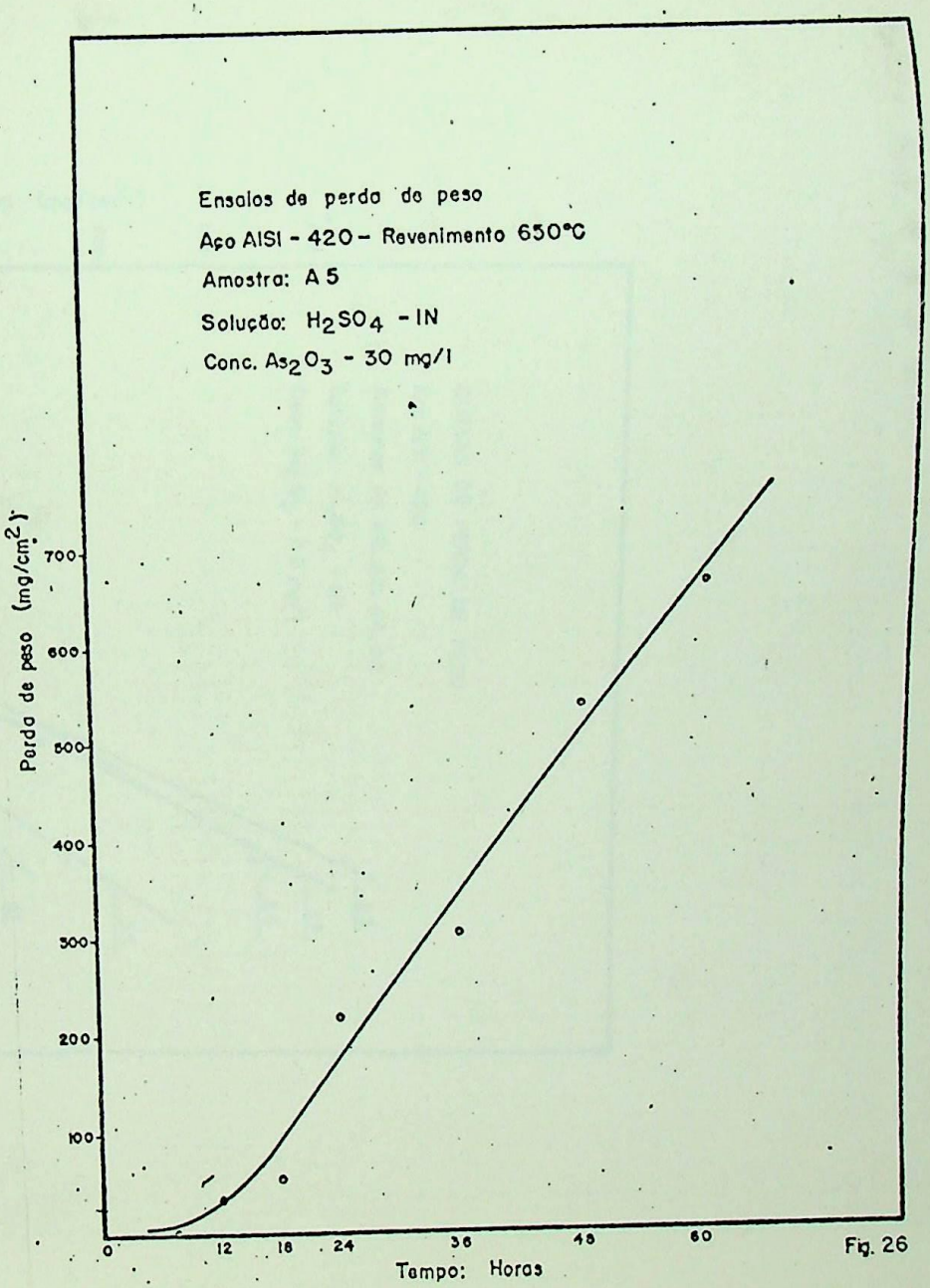

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Revenimento 650°C
Amostra: A 5
Solução: H_2SO_4 - 1N
Conc. As_2O_3 - 30 mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
100
200
300
400
500
600
700
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 26

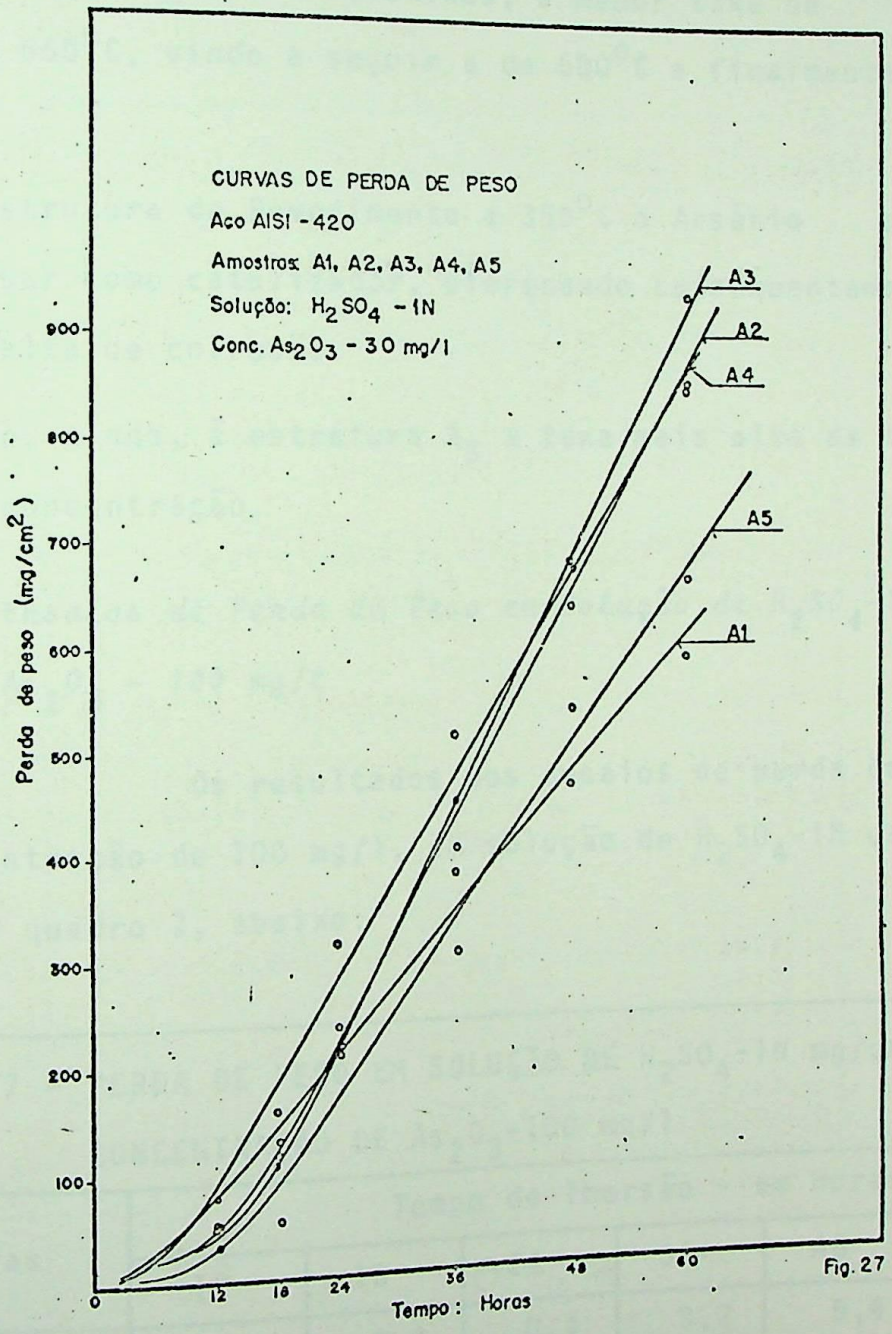

CURVAS DE PERDA DE PESO
Aço AISI - 420
Amostras: A1, A2, A3, A4, A5
Solução: H_2SO_4 - 1N
Conc. As_2O_3 - 30 mg/l
A3
A2
A4
A5
A1
Perda de peso (mg/cm²)
100
200
300
400
500
600
700
800
900
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 27

Observações:

1º) A estrutura de recozimento (A_1) foi a que apresentou a menor taxa de corrosão entre as demais de seu grupo de concentração.

2º) Das três estruturas revenidas, a menor taxa de corrosão foi a de 650°C, vindo a seguir a de 500°C e finalmente a de 350°C.

3º) Na estrutura de Revenimento a 350°C o Arsênio continuou a trabalhar como catalizador, oferecendo consequentemente taxa mais alta de corrosão.

4º) Coube, ainda, à estrutura A_3 a taxa mais alta de todas para essa concentração.

3.2.5 - *Ensaios de Perda de Peso em Solução de* H_2SO_4-1N *com* As_2O_3 - *100 mg/ℓ*

Os resultados dos ensaios de perda de peso na concentração de 100 mg/l, em solução de H_2SO_4-1N estão colocados no quadro 7, abaixo:

QUADRO 7 - PERDA DE PESO EM SOLUÇÃO DE H_2SO_4-1N mg/cm^2
CONCENTRAÇÃO DE As_2O_3-100 mg/l

Amostras	Tempo de Imersão - em Horas					
	12	18	24	36	48	60
A_1	0,0	0,0	0,4	3,7	5,4	9,3
A_2	35,7	92,8	143,8	283,5	520,8	712,7
A_3	30,3	65,9	128,0	287,0	494,3	632,1
A_4	19,3	74,1	152,2	318,1	523,8	677,4
A_5	5,8	10,4	21,3	88,9	156,9	218,1

Abaixo, nas figuras de nºs 28 a 33 aparecem os resultados de perda de peso das amostras ensaiadas (A_1, A_2, A_3, A_4 e A_5).

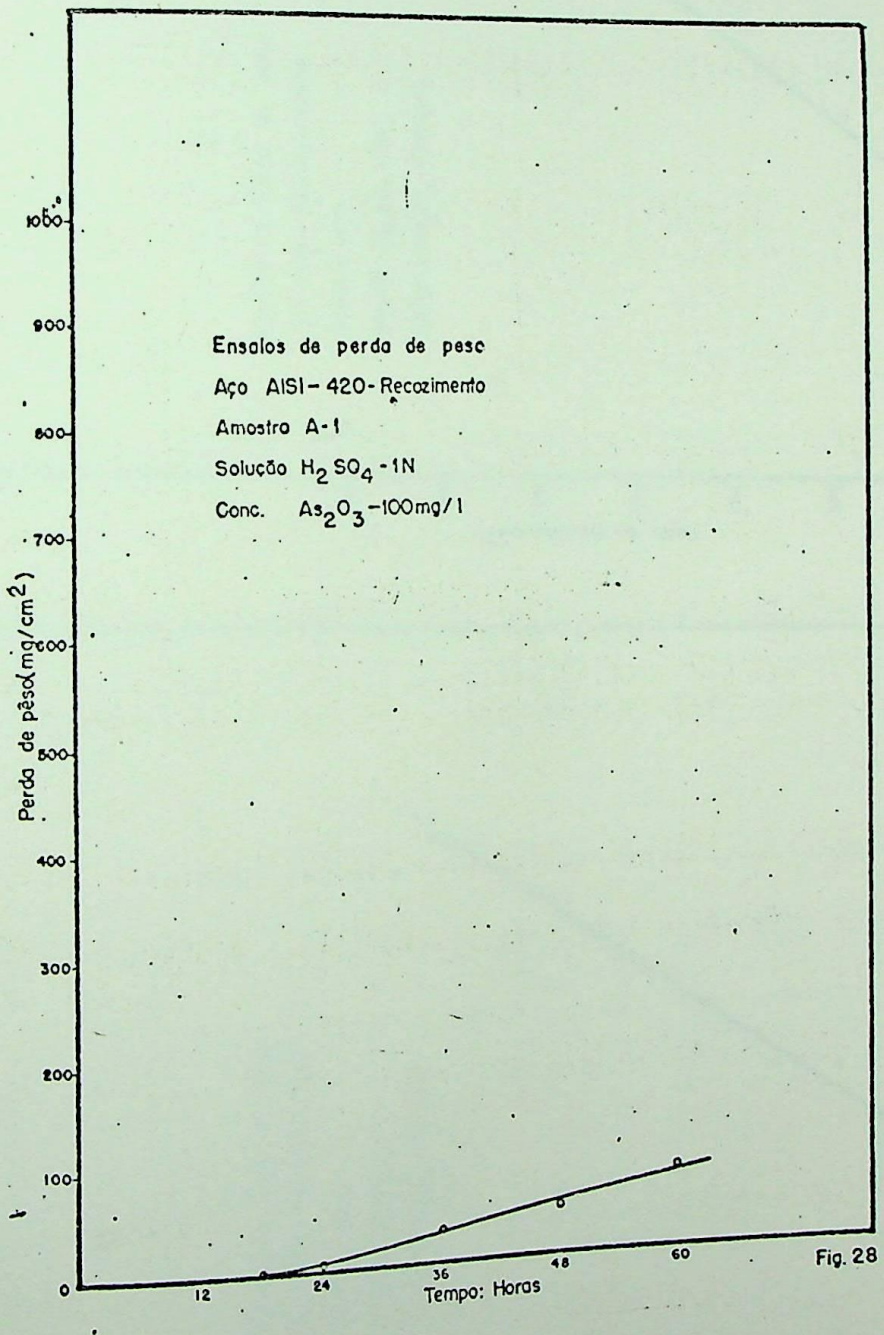


Fig. 28

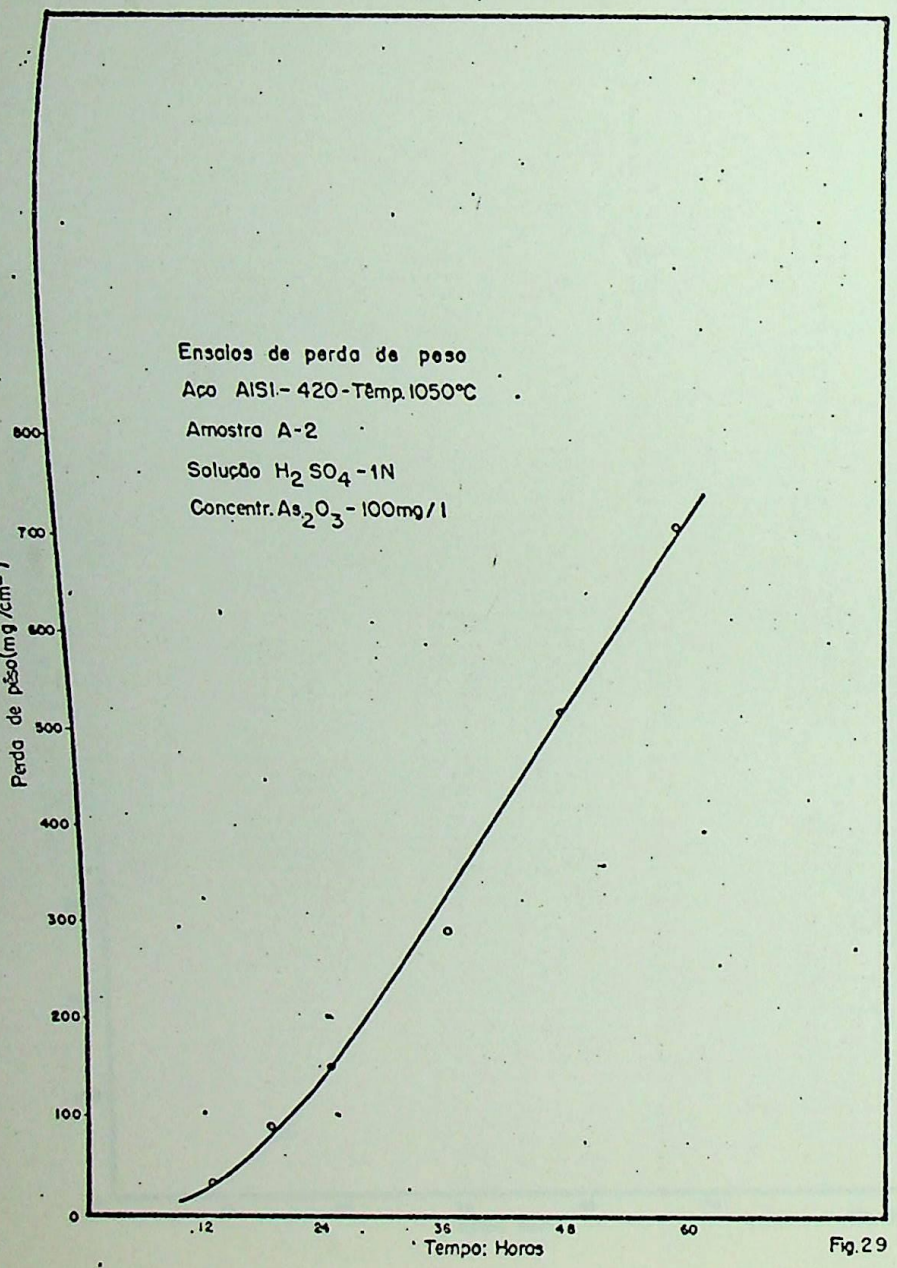

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Têmp. 1050°C
Amostra A-2
Solução H_2SO_4 - 1N
Concentr. As_2O_3 - 100mg/l
Perda de pêso (mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
600
700
800
12
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 29

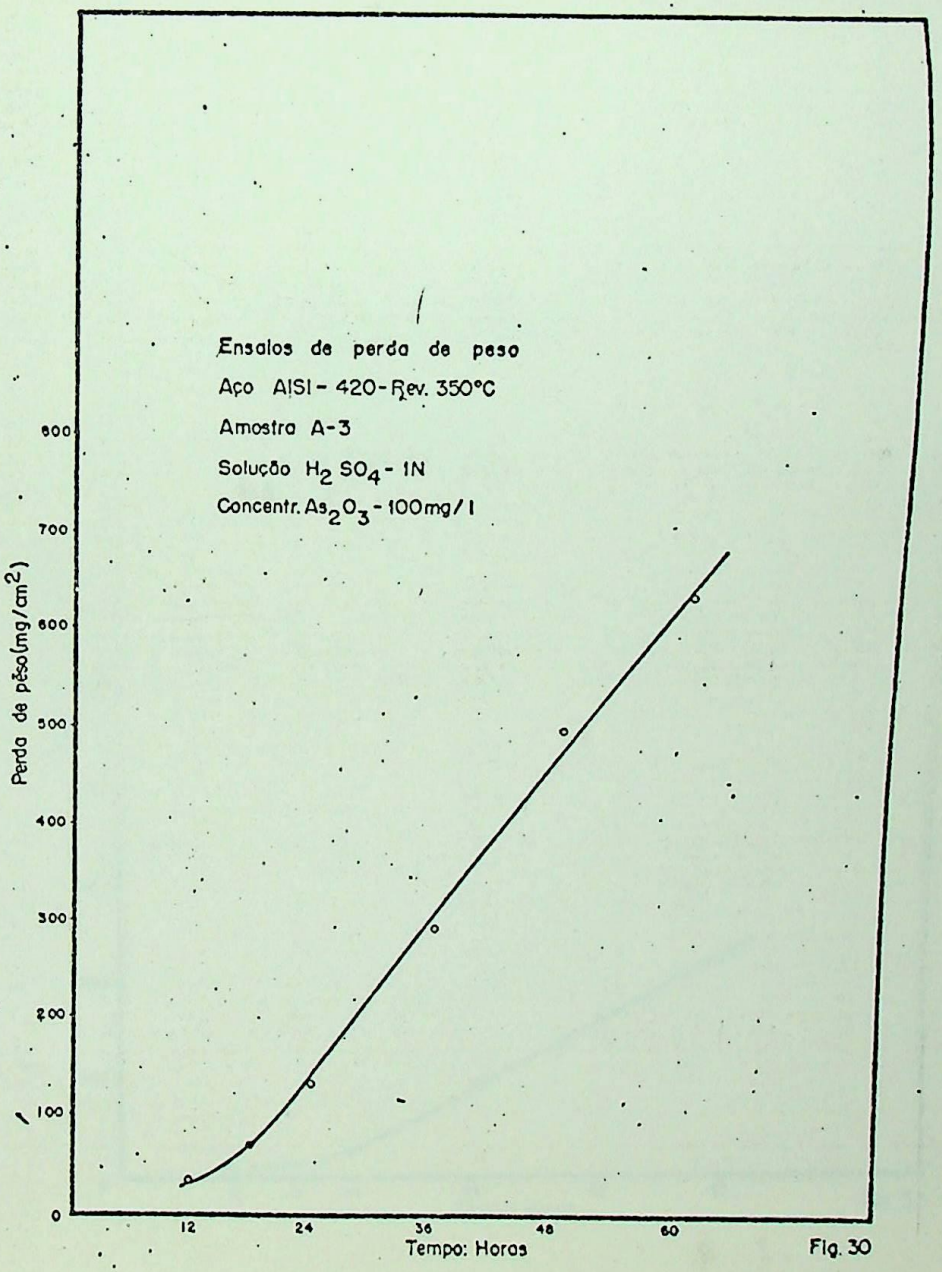

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Rev. 350°C
Amostra A-3
Solução H_2SO_4 - 1N
Concentr. As_2O_3 - 100mg/l
Perda de pêso (mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
600
700
12
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 30

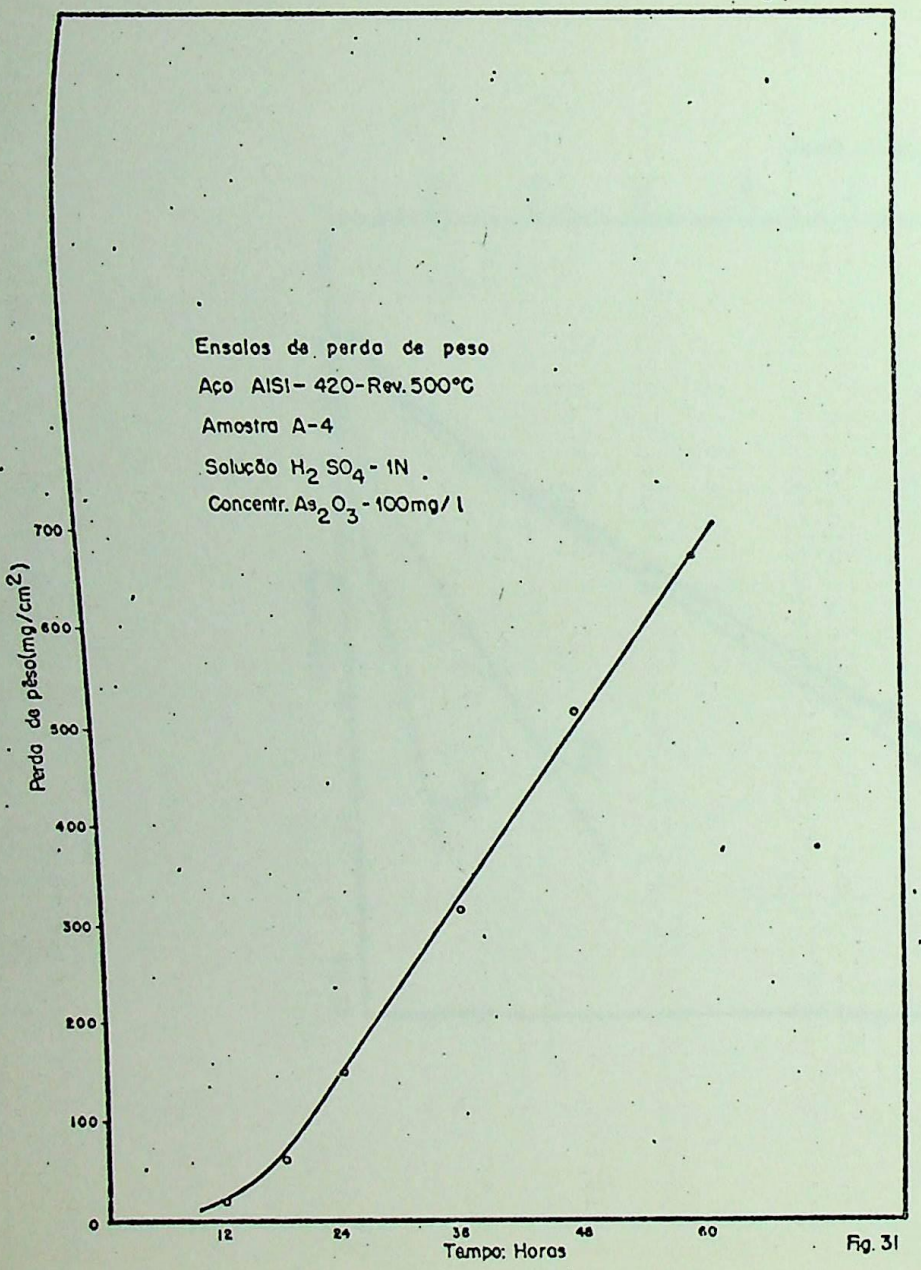

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Rev. 500°C
Amostra A-4
Solução H_2SO_4 - 1N
Concentr. As_2O_3 - 100mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
600
700
12
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 31

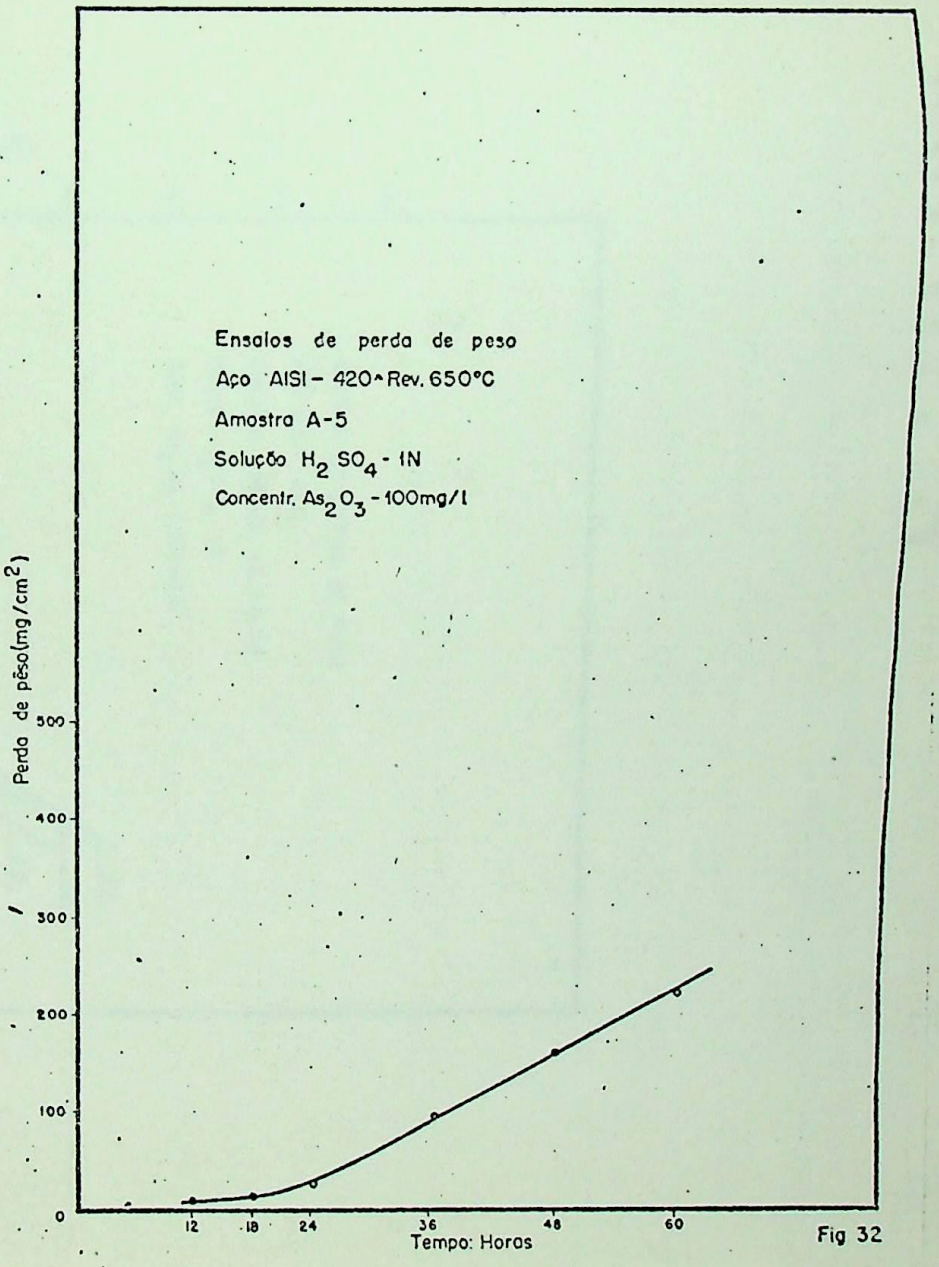

Ensaios de perda de peso
Aço AISI - 420 - Rev. 650°C
Amostra A-5
Solução H_2SO_4 - 1N
Concentr. As_2O_3 - 100mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig 32

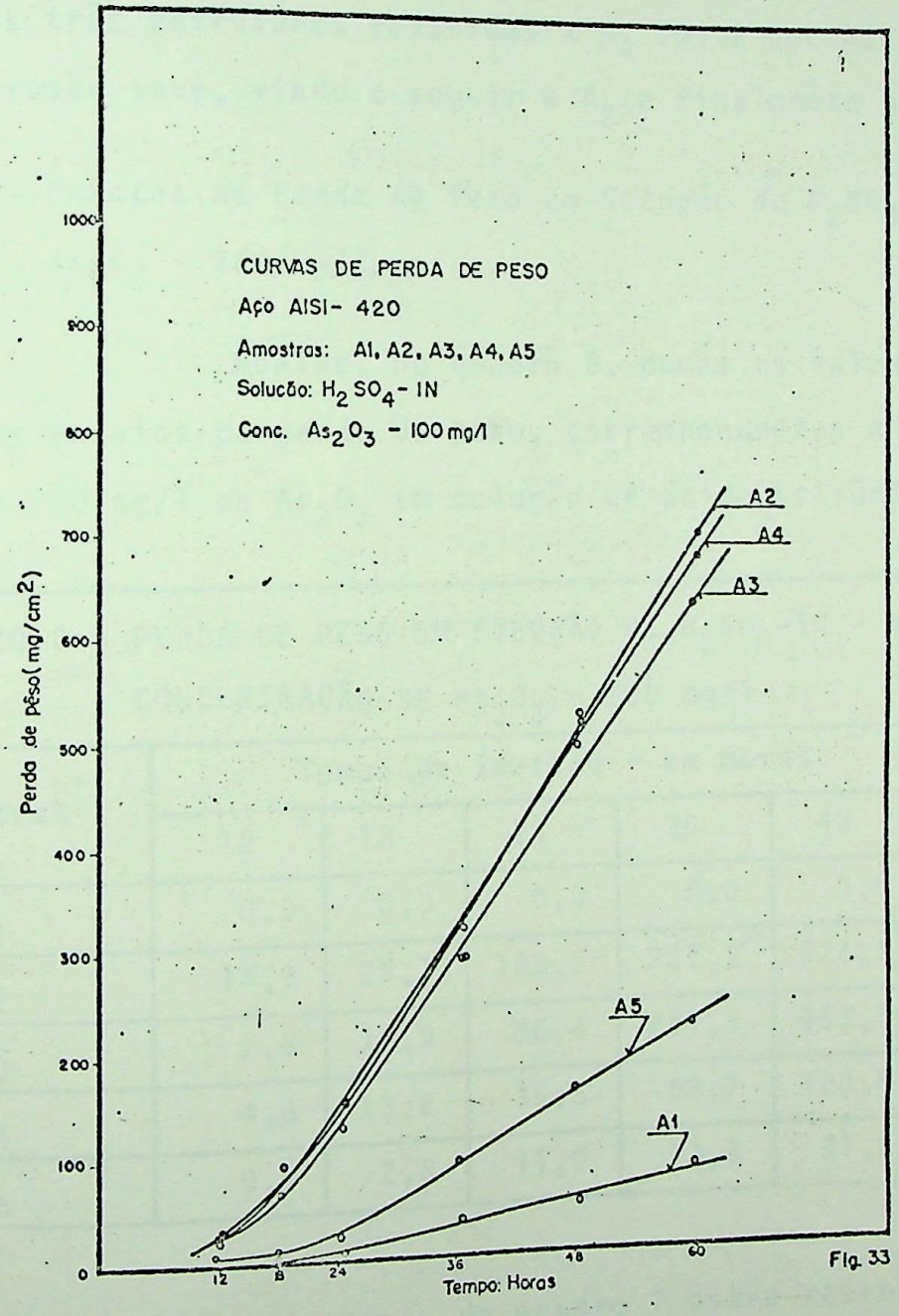

CURVAS DE PERDA DE PESO
Aço AISI- 420
Amostras: A1, A2, A3, A4, A5
Solução: H_2SO_4 - 1N
Conc. As_2O_3 - 100 mg/l
A2
A4
A3
A5
A1
Perda de pêso (mg/cm2)
Tempo: Horas
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
12
18
24
36
48
60

Fig. 33

Observações:

1º) A estrutura A_1 foi a que ofereceu a menor taxa de corrosão, e já bem baixa.

2º) A maior taxa de corrosão coube a estrutura de têmpera.

3º) Das três estruturas revenidas a A_4 foi a que maior taxa de corrosão teve, vindo a seguir a A_3, e finalmente a A_5.

3.2.6 - *Ensaios de Perda de Peso em Solução de* H_2SO_4-1N, *com* As_2O_3 - 200 mg/ℓ

Abaixo, no quadro 8, damos os valores levantados nos ensaios de perda de peso, correspondentes a concentração de 200 mg/l de As_2O_3 em solução de ácido sulfúrico.

QUADRO 8 - PERDA DE PESO EM SOLUÇÃO DE H_2SO_4-1N - mg/cm^2
CONCENTRAÇÃO DE As_2O_3 - 200 mg/l

Amostras	Tempo de Imersão - em Horas					
	12	18	24	36	48	60
A_1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
A_2	14,9	29,1	108,2	227,5	324,5	423,7
A_3	7,8	18,9	86,4	257,3	453,5	607,1
A_4	4,8	13,2	35,5	68,7	123,8	168,1
A_5	0,0	2,5	11,9	13,3	31,5	45,2

Os valores do quadro 7 estão representados graficamente nas figuras de nºs 34 a 38, a seguir.

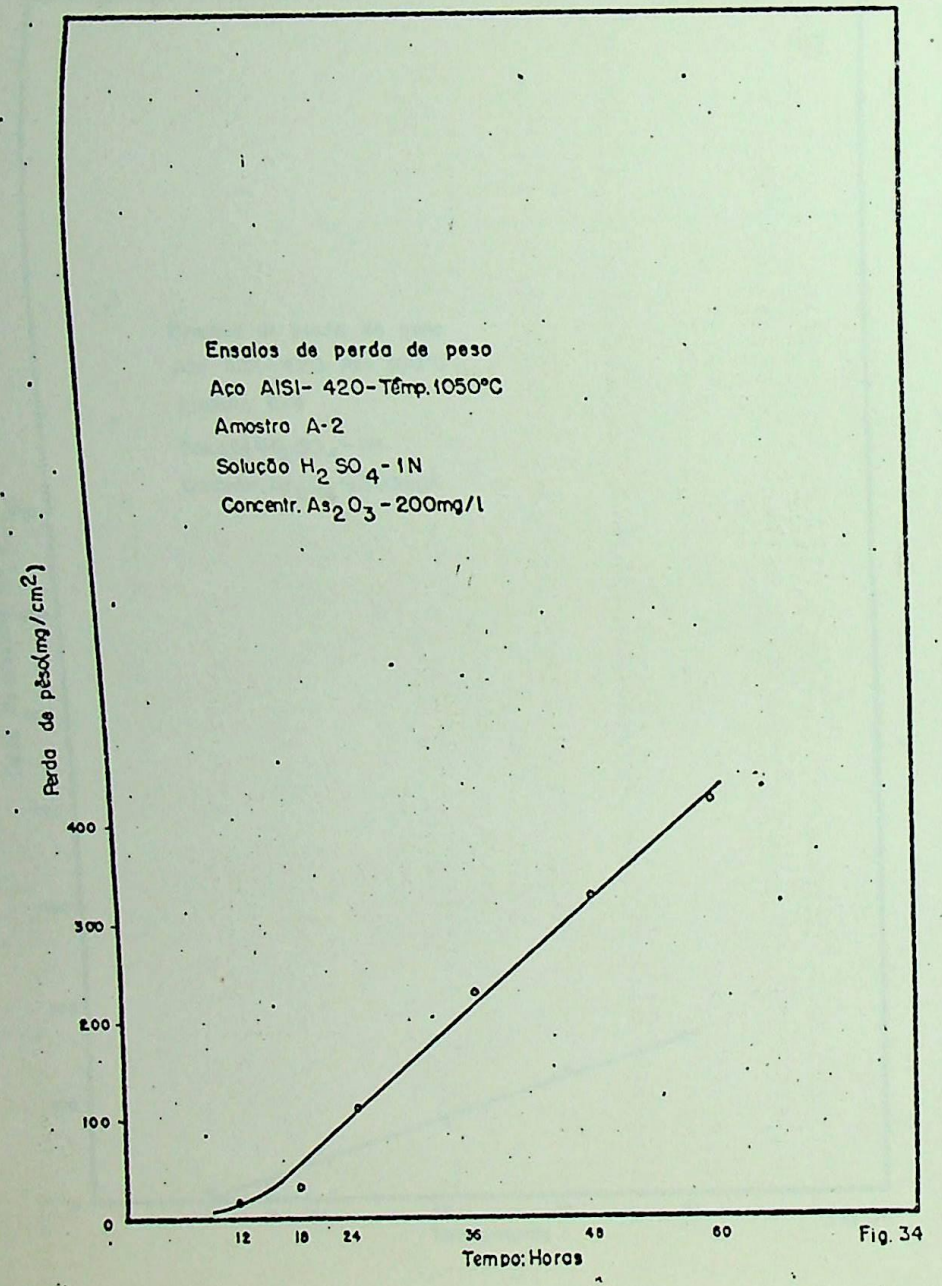

Ensaios de perda de peso
Aço AISI- 420-Têmp. 1050°C
Amostra A-2
Solução H_2SO_4 - 1N
Concentr. As_2O_3 - 200mg/l
Perda de peso(mg/cm²)
0
100
200
300
400
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 34

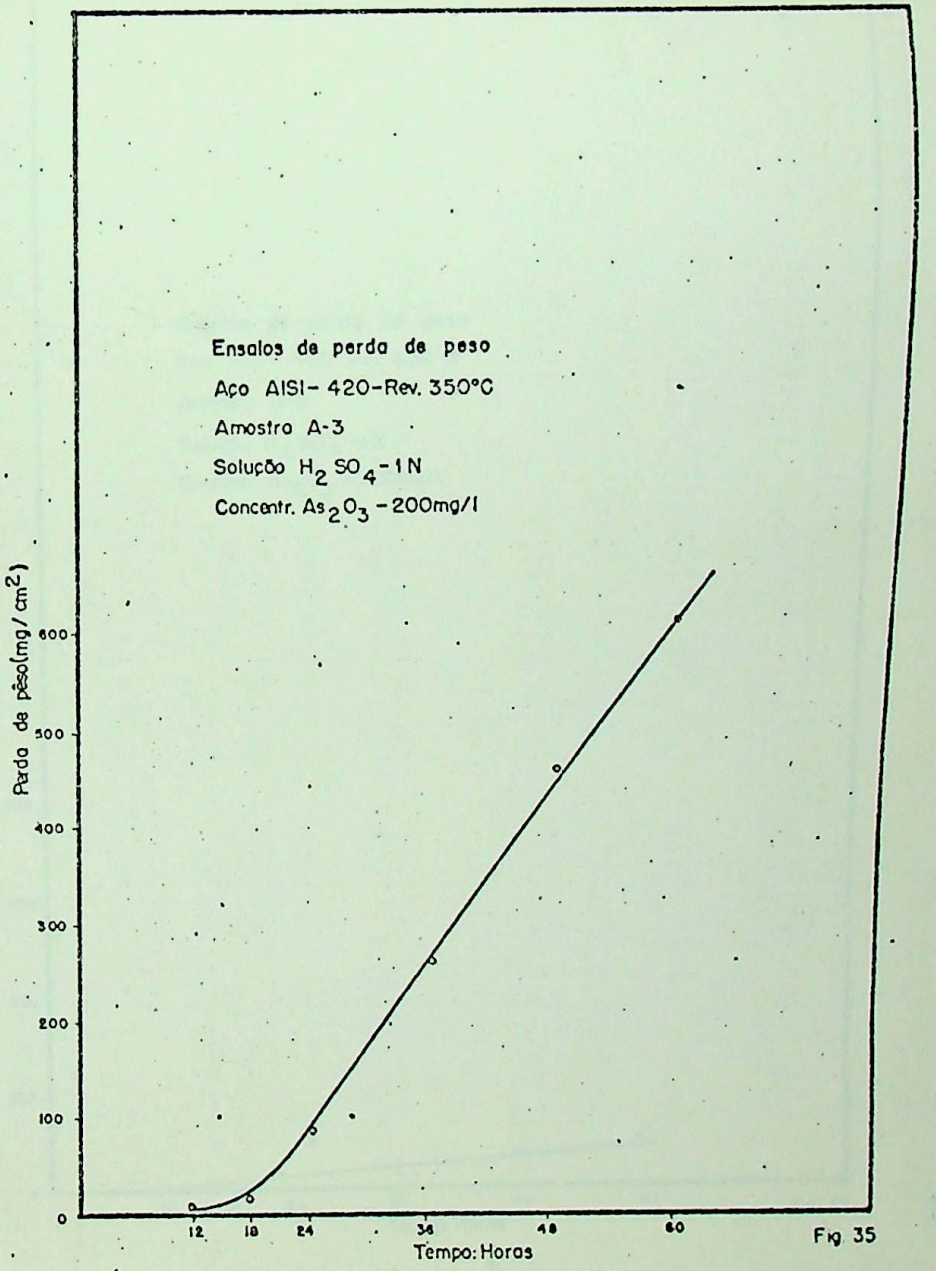

Ensaios de perda de peso
Aço AISI- 420-Rev. 350°C
Amostra A-3
Solução H_2SO_4 - 1N
Concentr. As_2O_3 - 200mg/l
Perda de peso(mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
600
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 35

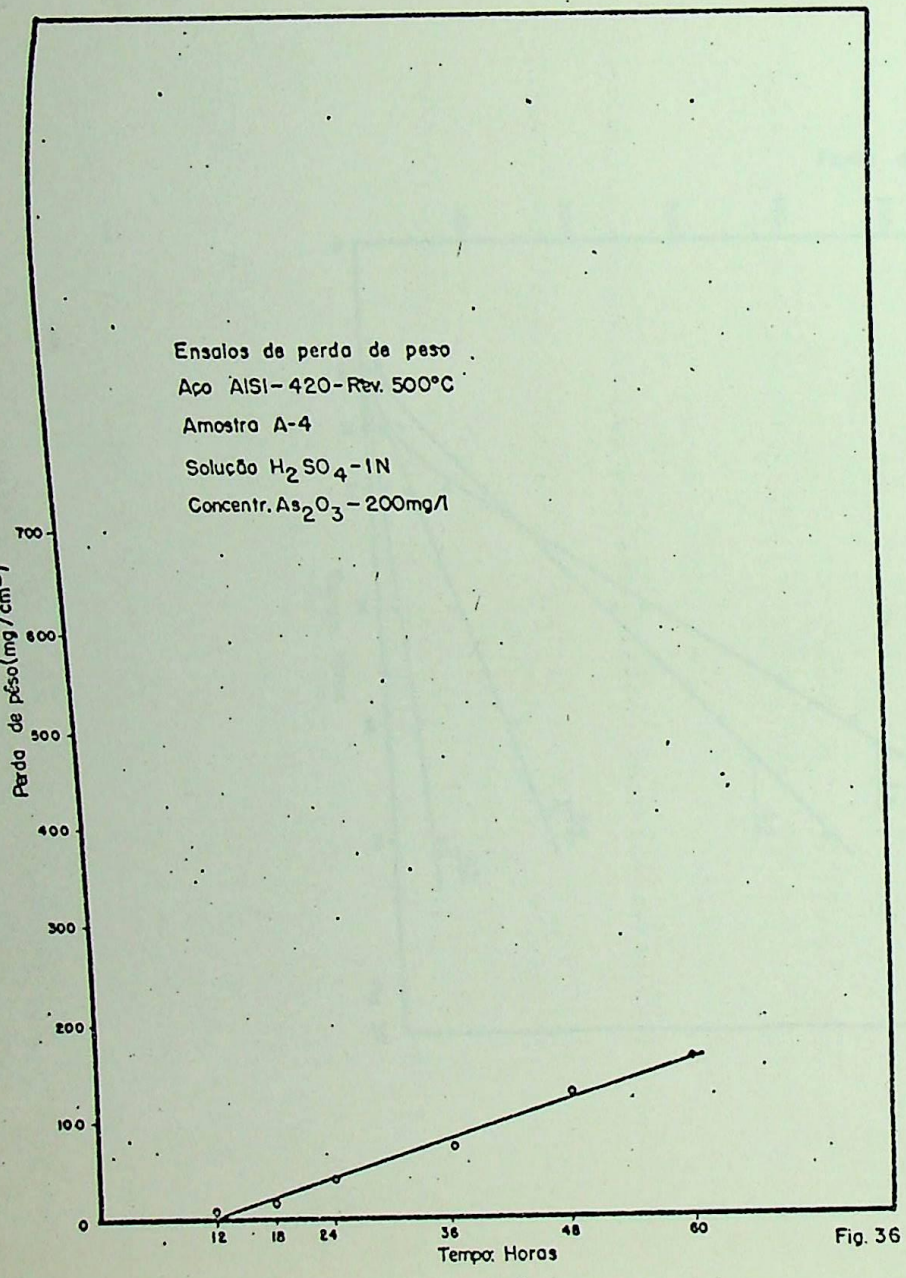

Ensaios de perda de peso
Aço AISI-420-Rev. 500°C
Amostra A-4
Solução H_2SO_4-1N
Concentr. As_2O_3-200mg/l
Perda de peso(mg/cm²)
0
100
200
300
400
500
600
700
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 36

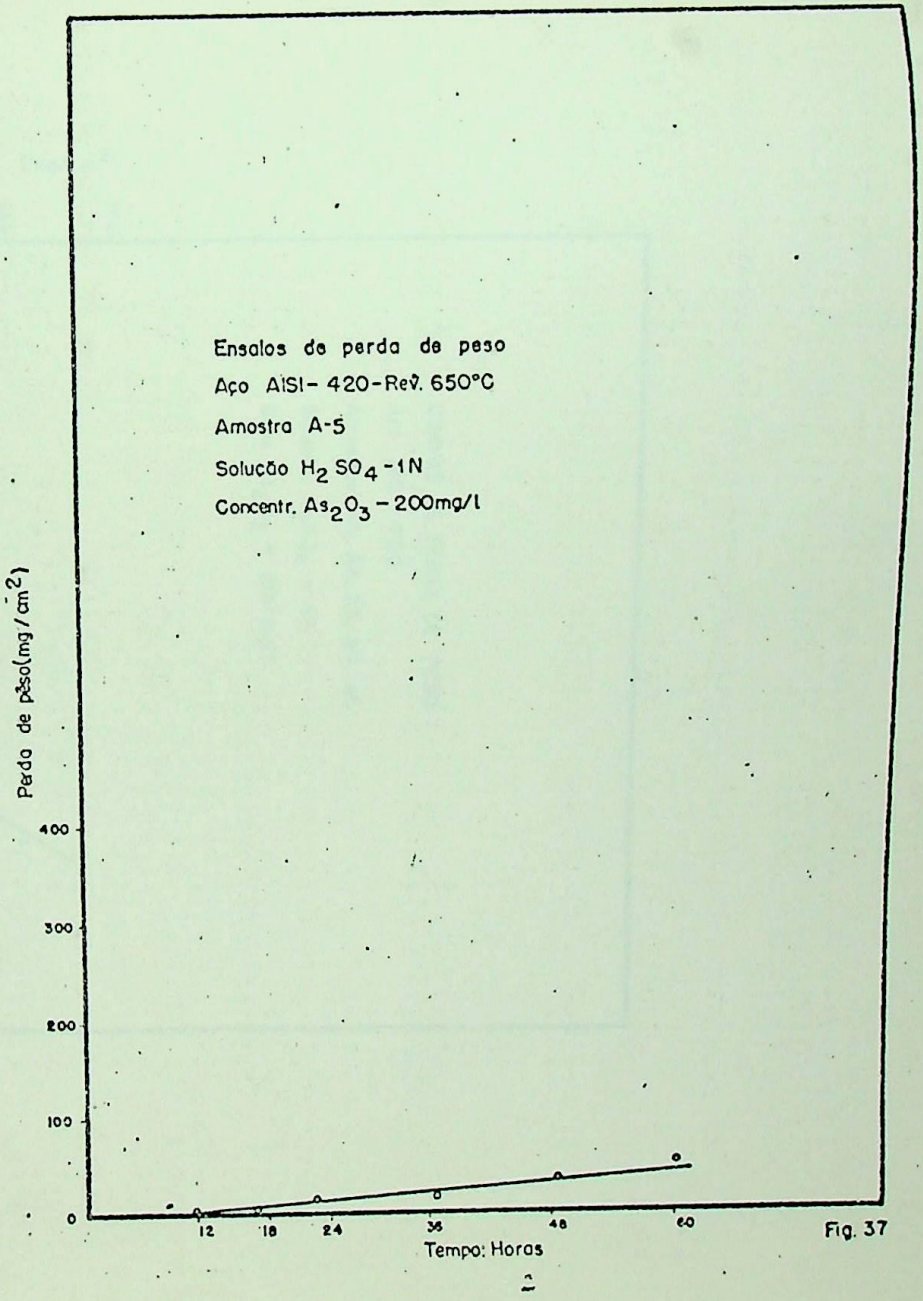

Ensaios de perda de peso
Aço AISI-420-Rev. 650°C
Amostra A-5
Solução H_2SO_4-1N
Concentr. As_2O_3-200mg/l
Perda de peso(mg/cm²)
0
100
200
300
400
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas

Fig. 37

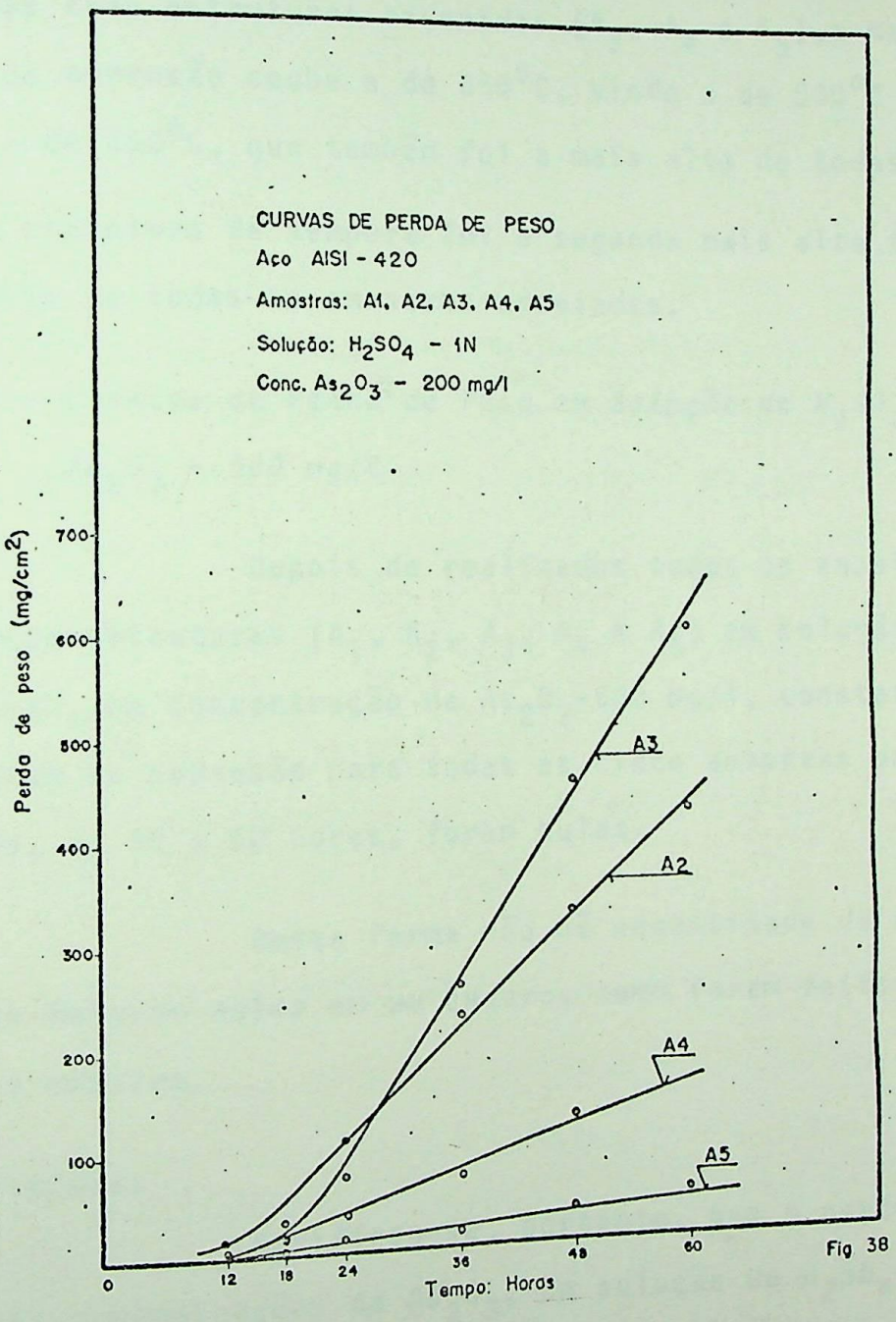

CURVAS DE PERDA DE PESO
Aço AISI - 420
Amostras: A1, A2, A3, A4, A5
Solução: H_2SO_4 - 1N
Conc. As_2O_3 - 200 mg/l
Perda de peso (mg/cm²)
700
600
500
400
300
200
100
0
12
18
24
36
48
60
Tempo: Horas
A3
A2
A4
A5

Fig 38

Observações:

1º) As taxas de corrosão cairam bem, apresentando-se nula para a estrutura de recozimento (A_1).

2º) Das três estruturas revenidas (A_3, A_4 e A_5), a mais baixa taxa de corrosão coube a de 650°C, vindo a de 500°C e por último a de 350°C, que também foi a mais alta de todas elas.

3º) A estrutura de têmpera foi a segunda mais alta taxa de corrosão de todas as amostras ensaiadas.

3.2.7 - *Ensaios de Perda de Peso em Solução de* H_2SO_4-1N *com* As_2O_3 - 500 mg/ℓ

Depois de realizados todos os ensaios com as diversas estruturas (A_1, A_2, A_3, A_4 e A_5) em solução de H_2SO_4-1N, em concentração de As_2O_3-500 mg/l, constatamos que as taxas de corrosão para todas as cinco amostras em diversos tempos, de 12 a 60 horas, foram nulas.

Desta forma não há necessidade de se colocar os valores nulos em um quadro, como foram feitos com os demais ensaios.

Observações:

Verificou-se, portanto, que a partir de 500 mg/l de concentrações de As_2O_3, em solução de H_2SO_4-1N, praticamente não há corrosão do Aço Martensítico AISI-420 nas cinco estruturas ensaiadas (Temp. 1050°C; Recoz.; Rev. 350°C, Rev. 500°C e Rev. 650°C).

3.2.8 - Taxas de Corrosão em Função da Concentração de Óxido de Arsênio

Uma vez obtidos os pontos dos ensaios de perda de peso das amostras (mg/cm^2), em função do tempo, verificou se "à priori" as imagens que os mesmos ofereciam nos diversos gráficos, correspondentes a cada concentração de As_2O_3.

Sentindo-se, então, que muitos deles tendiam para trechos retilíneos e que, segundo Milton-Stern, a taxa de corrosão é determinada pelo coeficiente angular (a_0) daqueles trechos das curvas, procurou-se entre os pontos distribuidos traçar-se os melhores segmentos de retas possíveis.

Desta forma foram determinados os parâmetros dos segmentos lineares (a_0, a_1) para cada curva.

A seguir, expomos a teoria dos Ajustes de Retas por mínimos quadrados adotada.

3.2.8.1 - Ajuste de Retas por Mínimos Quadrados

É a técnica a aplicar em resultados de experiências, medidas, etc., quando os dados vem em tabelas, e muitas vezes pouco confiáveis. O método consiste em duas etapas:

i - Da observação dos valores (preferivelmente representados em forma gráfica), escolher a função (polinômio ou outra função simples, tal como: equação linear, exponencial, logaritmica, trigonométrica, etc.) que se assemelhe à distribuição dos pontos.

ii - Determinar os parâmetros da função escolhida de maneira que a soma dos quadrados das distâncias das ordenadas dos pontos dados às ordenadas dos pontos da curva na mesma abcissa seja mínima.

Ajuste por Reta: Sejam, por exemplo, os valores da tabela 2, abaixo, também representados no gráfico da Figura nº 39.

TABELA 2	
x	f
0	2
1	3
2	5
3	5
4	9
5	8
6	10

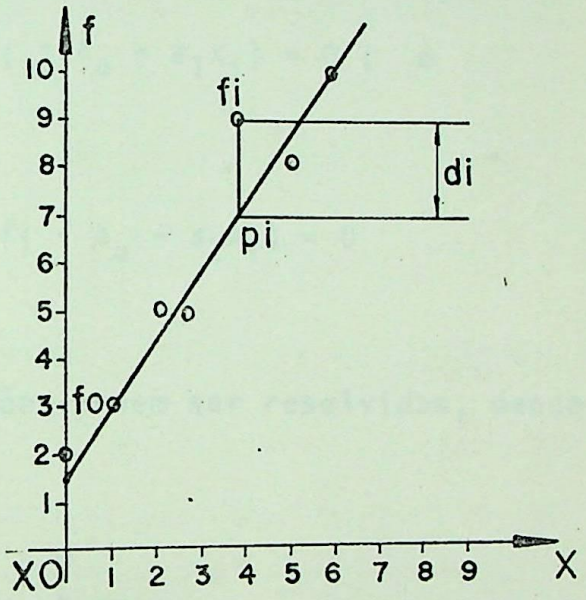


Fig. 39 - Gráfico P(xi)

Vê-se que os pontos parecem seguir a tendência da reta indicada. Seja a equação geral da reta:

$$P(x) = a_0 + a_1 x$$

Logo: $P(x_i) = a_0 + a_1 x_i$

As diferenças de ordenadas do ponto lido para o ponto da reta, ou as distâncias em ordenadas serão dadas por:

$$di = f_i - p_i = f_i - a_0 - a_1 x_i$$

A soma destas distâncias elevadas qo quadrado ē:

$$S = \sum_{i=1}^{m} (f_i - a_o - a_1 x_i)^2$$

Os coeficientes a_o e a_1 devem ser determinados de maneira que S seja mīnima. Logo, as derivadas parciais de S, com relação a a_o e a_1 devem ser nulas:

$$\frac{\partial S}{\partial a_o} = - \sum_{i=1}^{m} 2(f_i - a_o - a_1 x_i) = 0 \; ; \quad e$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = - \sum_{i=1}^{m} 2xi(f_i - a_o - a_1 x_i) = 0$$

Estas equações podem ser resolvidas, dando os valores de a_o e a_1, que são:

$$a_o = \frac{\sum_{i=1}^{m} f_i - a_1 \sum_{i=1}^{m} x_i}{m} \; ; \quad e$$

$$a_1 = \frac{m \sum_{i=1}^{m} x_i f_i - \sum_{i=1}^{m} x_i \cdot \sum_{i=1}^{m} f_i}{m \sum_{i=1}^{m} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{m} x_i \right)^2}$$

Estas fōrmulas permitem escrever diretamente a reta aproximadamente (também chamada de reta de regressão), dada a tabela de valores.

Para a Tabela 2, de valores, atrās, fica agora a Tabela 3.

TABELA 3				
i	xi	fi	xifi	xi^2
1	0	2	0	0
2	1	3	3	1
3	2	5	10	4
4	3	5	15	9
5	4	9	36	16
6	5	8	40	25
7	6	10	60	36
Soma	21	42	164	91

Logo, podemos calcular os coeficientes da reta de regressão, que são:

$$a_1 = \frac{7.164-21.42}{7.\ 91-21.21} = 1,357 \quad ; \quad e$$

$$a_o = \frac{42-a_1.21}{7} = \frac{42-1,357.21}{7} = 1,929$$

A equação de regressão é: $f(x) = 1,929 + 1,357x$.

Esta é pois a reta de máxima probabilidade de representatividade para erros aleatórios e não para erros sistemáticos.

Observação:

Assim para outros ajustes pode-se proceder com raciocínio análogo. O número de coeficientes a determinar dá exatamente o mesmo número de condições de mínimo, havendo sempre solução única.

3.2.8.2 - Determinação das Taxas de Corrosão

Procedendo-se como no ítem anterior, foram calculados pelo computador TELEFUNKEN os coeficientes das Retas de Regressão de cada curva: perda de peso (mg/cm^2) "versus" tempo (dia), bem como as coordenadas dos pontos para 24 e 48 horas de cada estrutura (A_1, A_2, A_3, A_4 e A_5), para cada concentração de óxido de Arsênio (0, 10, 20, 30, 100 e 200).

Pela expressão do ítem 1.3, a taxa de corrosão pode ser calculada por:

$$Rmdd = 100,00 \frac{W_o - W_f}{A.T} \ (mg/dm^2/dia),$$

obtendo-se o quadro 9 abaixo, que fornece os seus valores em função da variação de concentração de As_2O_3.

QUADRO 9 - TAXA DE CORROSÃO - $mg/dm^2/dia$

SOLUÇÃO DE H_2SO_4 - 1N

Amostras	Concentração de As_2O_3 - mg/l						
	0	10	20	30	100	200	500
A_1	25133,90	47910,00	21502,00	26242,86	500,00	0,00	0,00
A_2	35226,59	39472,76	43491,37	43220,73	38880,00	21630,00	0,00
A_3	37826,10	39751,58	41594,53	46638,29	34392,00	35166,00	0,00
A_4	40944,00	56918,29	41078,74	38926,74	35626,00	7804,00	0,00
A_5	35118,29	46573,90	40243,13	33892,20	13560,00	2250,53	0,00

As Curvas das Taxas de Corrosão em solução de H_2SO_4-1N, com va

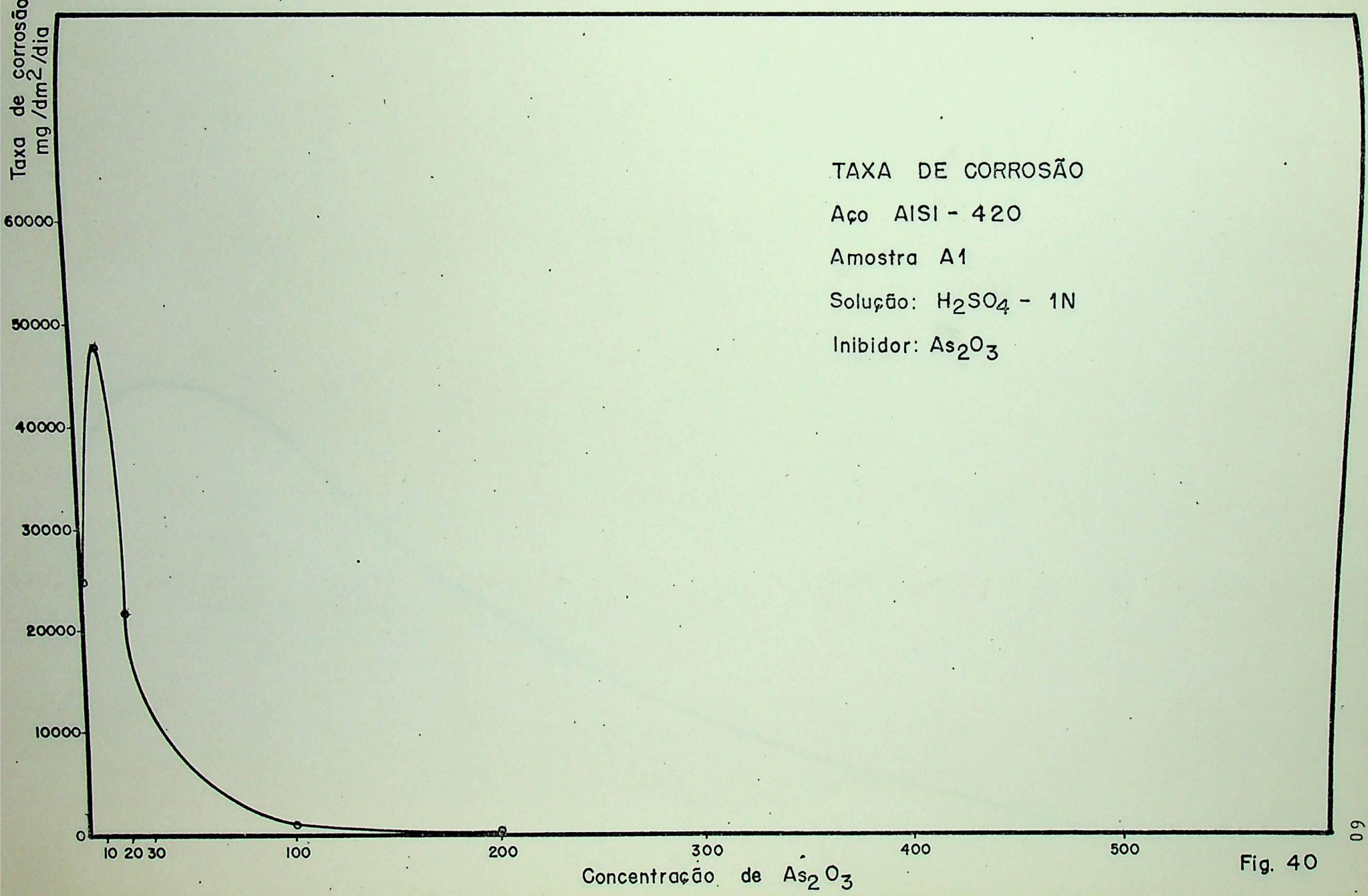

Taxa de corrosão
mg /dm2 /dia
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0
10 20 30
100
200
300
400
500
Concentração de As2O3
TAXA DE CORROSÃO
Aço AISI - 420
Amostra A1
Solução: H2SO4 - 1N
Inibidor: As2O3

Fig. 40

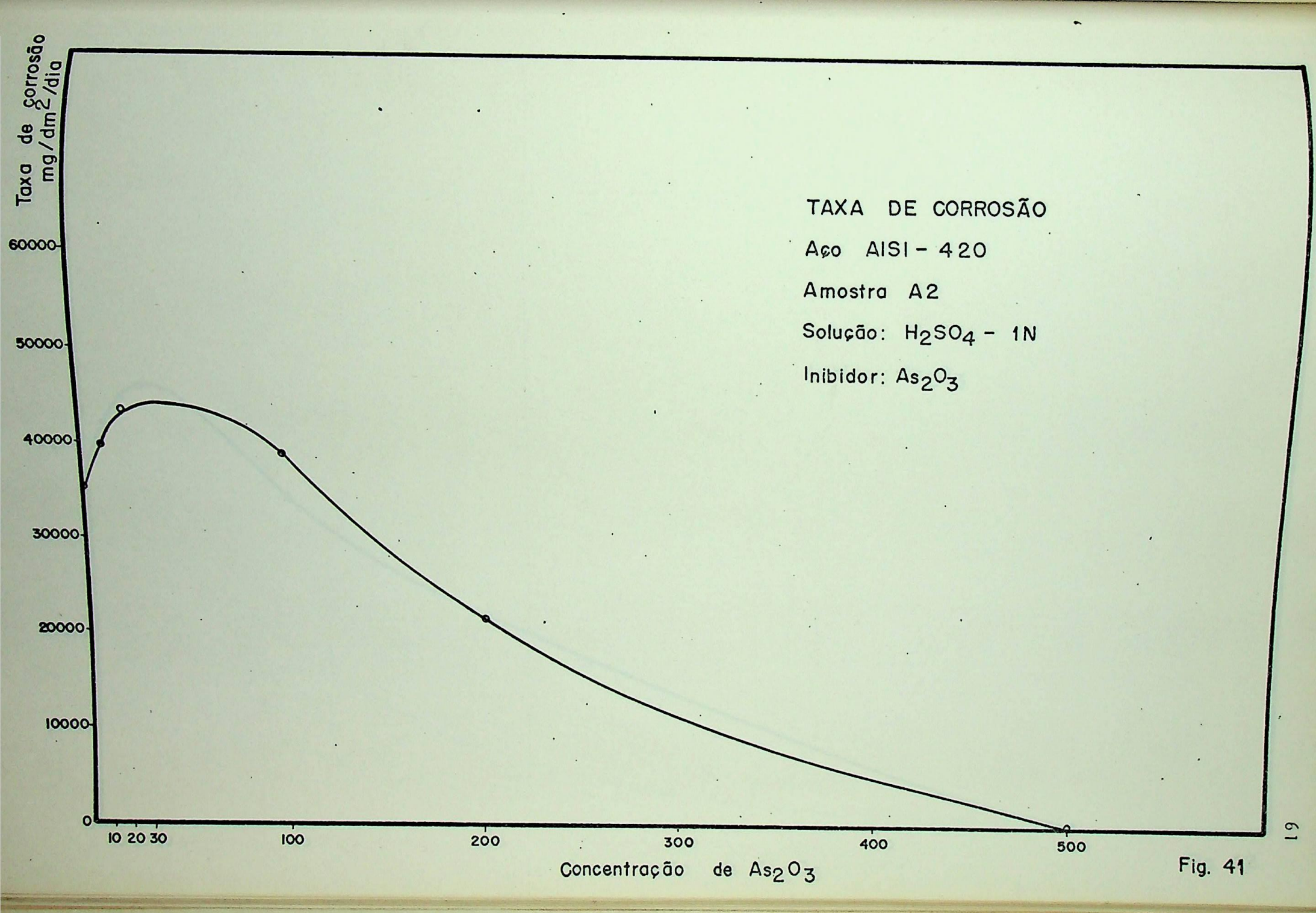

Taxa de corrosão mg/dm²/dia
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0
10 20 30
100
200
300
400
500
Concentração de As2O3
TAXA DE CORROSÃO
Aço AISI - 420
Amostra A2
Solução: H2SO4 - 1N
Inibidor: As2O3

Fig. 41

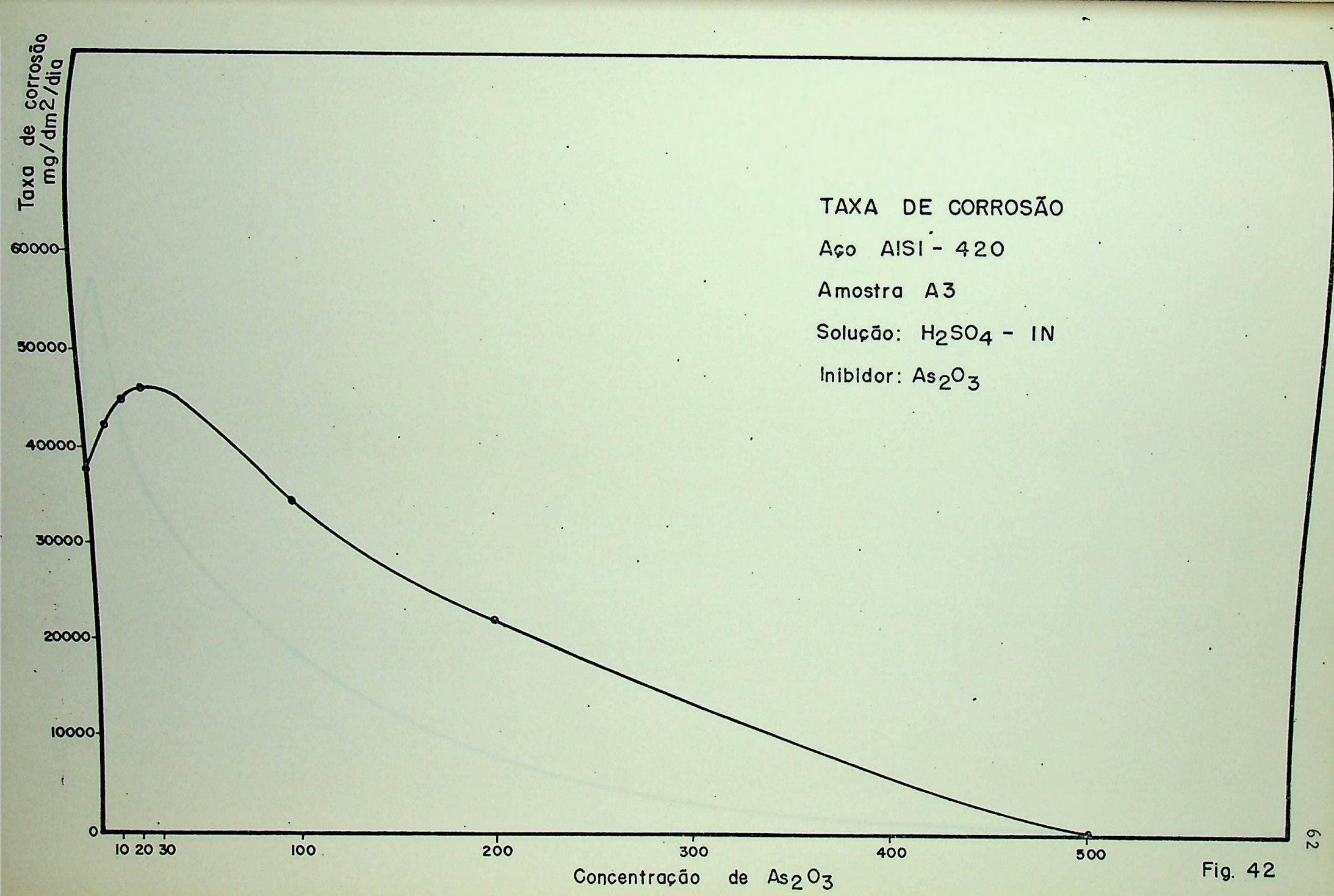

Taxa de corrosão mg/dm2/dia
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0
10 20 30
100
200
300
400
500
Concentração de As2O3
TAXA DE CORROSÃO
Aço AISI - 420
Amostra A3
Solução: H2SO4 - 1N
Inibidor: As2O3

Fig. 42

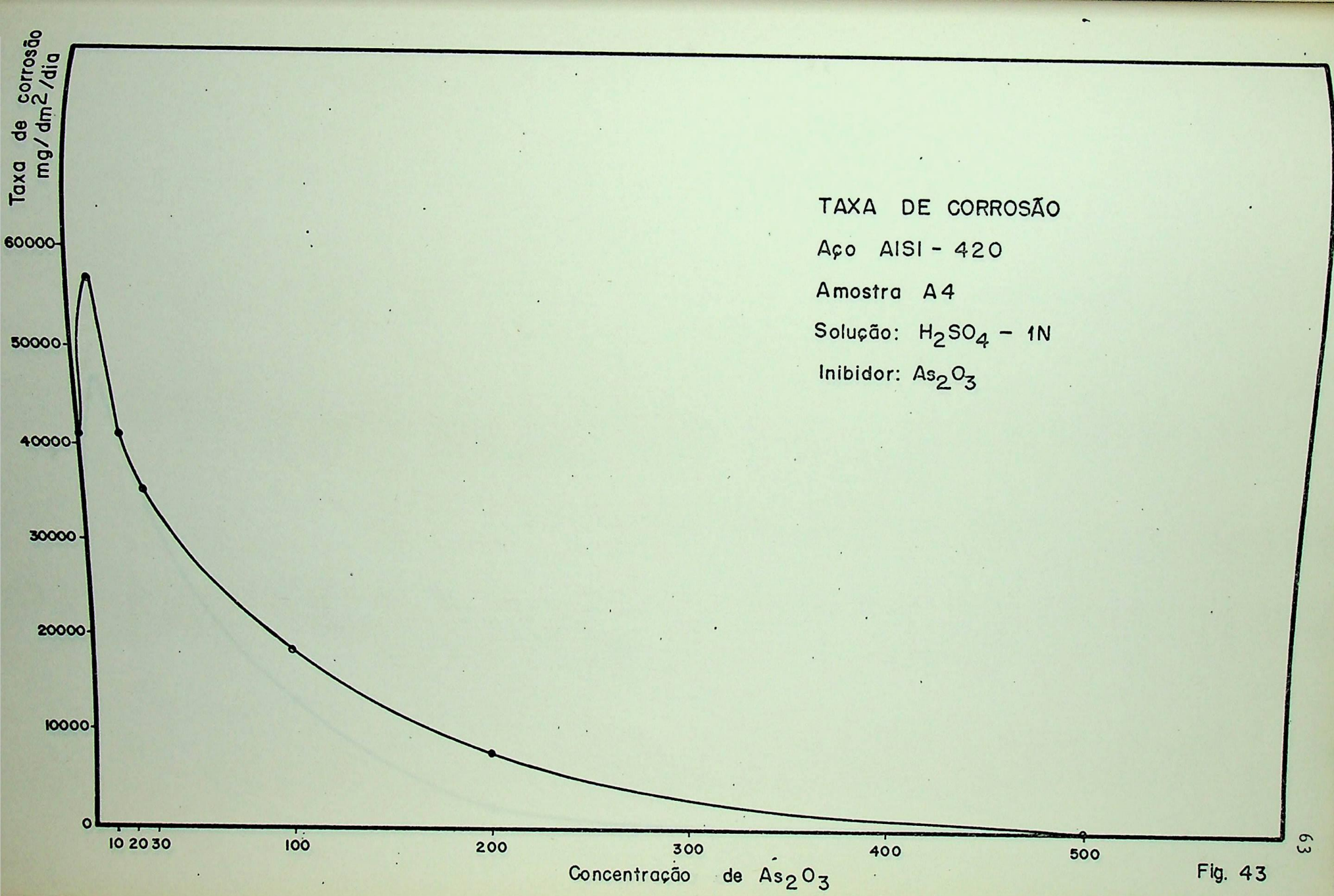

Taxa de corrosão mg/dm²/dia
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0
10 20 30
100
200
300
400
500
Concentração de As_2O_3
TAXA DE CORROSÃO
Aço AISI - 420
Amostra A4
Solução: H_2SO_4 - 1N
Inibidor: As_2O_3

Fig. 43

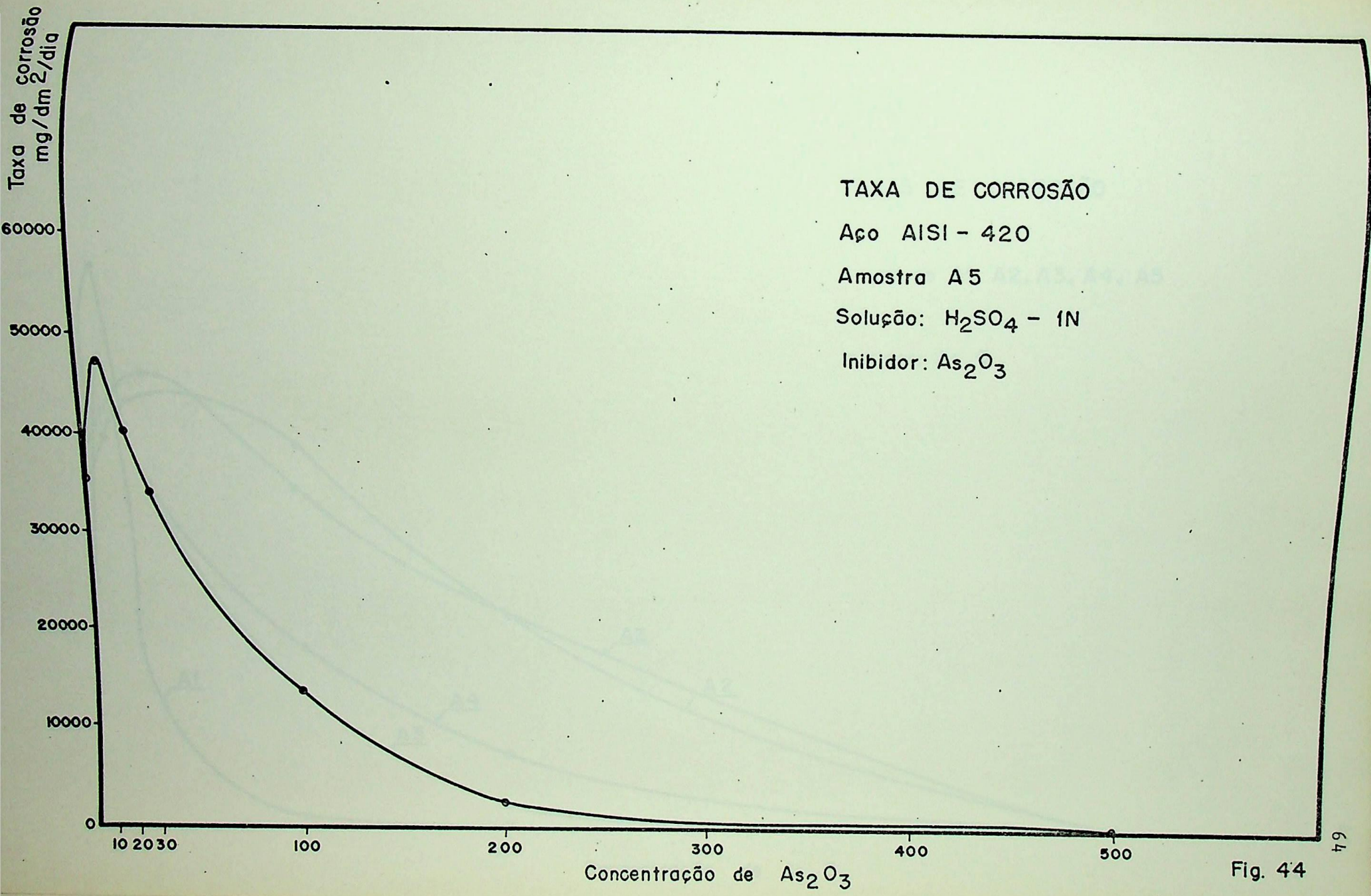

Taxa de corrosão mg/dm2/dia
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0
10 20 30
100
200
300
400
500
Concentração de As2O3
TAXA DE CORROSÃO
Aço AISI - 420
Amostra A5
Solução: H2SO4 - 1N
Inibidor: As2O3

Fig. 44

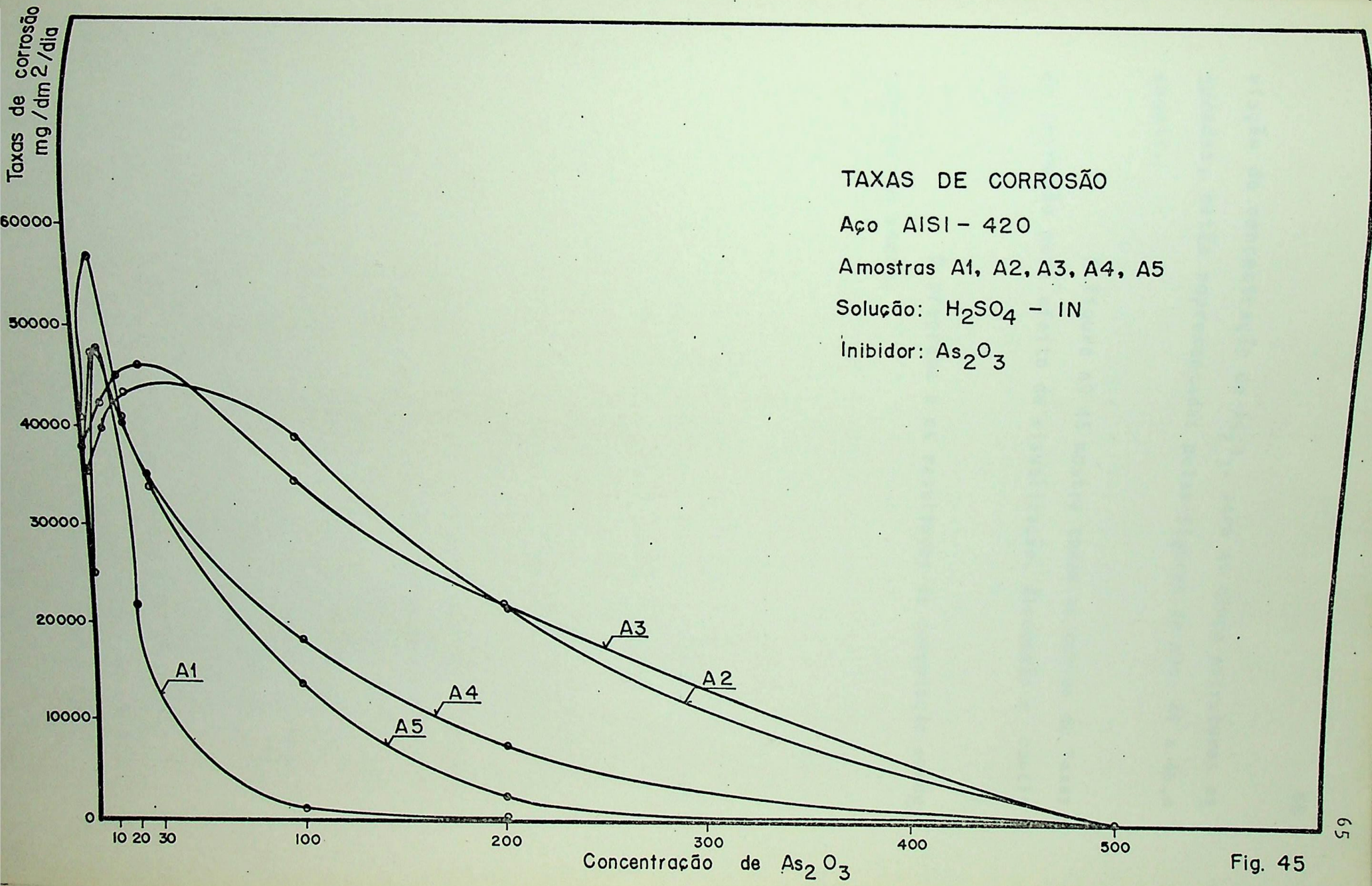

Taxas de corrosão mg/dm2/dia
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0
10 20 30
100
200
300
400
500
Concentração de As2O3
A1
A2
A3
A4
A5
TAXAS DE CORROSÃO
Aço AISI - 420
Amostras A1, A2, A3, A4, A5
Solução: H2SO4 - 1N
Inibidor: As2O3

Fig. 45

riação de concentração de As_2O_3, para as cinco estruturas estudadas, estão representadas pelas figuras de nºs. 41 a 45, a seguir.

A figura nº 45 mostra todas as curvas de Taxas de corrosão para efeito de visualização, discussão e conclusão.

O programa e os resultados de computação encontram-se no anexo.

4. DISCUSSÃO

4.1 - INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA NA TAXA DE CORROSÃO

Dos resultados obtidos vamos primeiramente discutir o comportamento da estrutura em meio corrosivo de ácido sulfúrico, um normal (H_2SO_4-1N), em presença do inibidor.

Analisando-se a figura nº 45, onde estão reunidas as taxas de corrosão em função da concentração de Óxido de Arsênio, verifica-se que o estado de recozimento apresenta-se com a menor taxa de corrosão. Esta estrutura foi obtida com austenitização a 1050°C, o que lhe assegurou a dissolução completa dos carbonetos de cromo na austenita, seguida de resfriamento ao forno até 600°C, e resfriamento em água a partir dessa temperatura.

Com esse tratamento foi garantida a dissolução dos carbonetos na austenita e evitada a precipitação dos carbonetos que ocorre na faixa entre 450 a 550°C, obtendo-se, assim, u'a matriz rica em cromo, constituida de, praticamente, ferrita e cementita, e de elevada resistência à corrosão. Foi mostrado em trabalho recente que um aço inoxidável (13,6% Cr ; 1,6% Ni ; e 0,05% C) apresentou um aumento na taxa de corrosão quando submetido a diferentes resfriamentos mais lentos, após a austenitização. O fenômeno foi interpretado como devido ao maior empobrecimento correspondente das regiões adjascentes aos contornos de grãos pela precipitação de carbonetos de cromo, favorecendo, assim, a dissolução preferencial destas regiões.

Durante os ensaios não nos preocupamos com a velocidade de resfriamento, mas submetemos o aço inoxidável a diferentes temperaturas de aquecimento, favorecendo , em alguns casos, a precipitação de carbonetos. Embora o teor de carbono no do aço ensaiado seja maior do que o citado acima, nossos resultados confirmaram que as mais elevadas taxas de corrosão são para as estruturas em que foram mais favoráveis à formação de carbonetos.

Na têmpera a 1050°C houve dissolução completa dos carbonetos na austenita, porém, devido ao resfriamento ao ar agitado ocorreu precipitação dos carbonetos nos contornos de grão, acarretando um empobrecimento de cromo das regiões adjascentes aos contornos de grãos, e favorecendo assim a dissolução preferencial destas regiões.

No revenido a 350°C, após a têmpera a 1050°C, a estrutura apresentada é aproximadamente a mesma da estrutura de têmpera, sendo que os valores das taxas de corrosão estão muito próximos.

No revenido a 500°C, após a têmpera a 1050°C, a estrutura se apresentou com intensa precipitação de carbonetos e com isto maior empobrecimento das regiões adjascentes aos contornos de grãos, com elevada dissolução preferencial destas regiões. Pode-se, contudo, admitir ainda que, entre a região dos contornos de grãos, onde predominam os carbonetos de cromo, e o interior dos grãos constituidos de ferri

ta, há uma diferença de potencial, constituindo micro-células de eletrodos diferentes.

No revenido a 650°C, após a têmpera de 1050°C, a estrutura ficou constituida de ferrita e cementita e, segundo Speller, após revenida em temperaturas elevadas, tem-se poucas células em virtude da aglomeração de cementita, justificando, assim, a baixa taxa de corrosão.

4.2 - INFLUÊNCIA DE INIBIDOR NA TAXA DE CORROSÃO

Pela figura 45 verifica-se que o aço em estudo, imerso em solução de H_2SO_4-1N, é ativado, ocorrendo, portanto, a dissolução do ferro a íon Fe^{2+}, conforme já mostrado no ítem 1.2.

Hensler propôs as seguintes equações para o fenômeno da dissolução:

$$Fe + OH \rightarrow (Fe\ OH)_{ads} + e^-$$

$$Fe(OH)_{ads} + Fe + OH^- \rightarrow (FeOH)_{ads} + FeOH^+ + 2e^-$$

$$Fe\ OH^+ + H^+ \rightarrow Fe^{2+} + H_2O$$

Por outro lado Brockris indica o seguinte mecanismo:

$$Fe + OH^- \rightarrow (Fe\ OH)_{ads} + e^-$$

$$(Fe\ OH)_{ads} \rightarrow Fe\ OH^{+} + e^{-}$$

$$Fe\ OH^{+} + H^{+} \rightarrow Fe^{2+} + H_2O$$

Como já vimos no ítem 1.4.1.2, Hudson trabalhando com aço ao carbono, e Foroulis e Uhlig estudando o efeito de impurezas no ferro verificaram que o Arsênio pode apresentar um duplo papel,como catalisador ou como inibidor de corrosão, respectivamente, a baixas concentrações ou a concentrações mais elevadas, quando adicionado ao eletrólito de trabalho.

Lembram ainda, alguns autores que o efeito de inibição é atribuido à elevada sobretensão de hidrogênio sobre o Arsênio depositado nas áreas catódicas da superfície metálica.

Assim, pelos resultados apresentados na figura 45, praticamente as maiores taxas de corrosão ocorreram na concentração de 10 mg/l de óxido de Arsênio, principalmente para a estrutura de revenimento a 500°C (A_4).

Com o aumento da concentração de As_2O_3 a taxa a partir de 30 mg/l cai razoavelmente bem, já na altura dos 200 mg/l,e atinge zero em 500 mg/l.

Pode ser que para outras concentrações próximas de 500 mg/l, óxido de Arsênio o sal tenha um papel predominantemente de inibidor, como afirmam alguns autores que a inibição se dará entre 450 e 500 mg/l.

5. CONCLUSÕES

1ª.) Em solução de ácido sulfúrico de um normal (H_2SO_4-1N) o aço inoxidável martensítico AISI-420 é ativado em circuito aberto, ou seja, não está passivado e, portanto, corroi-se facilmente qualquer que seja sua microestrutura (A_1, A_2, A_3, A_4 e A_5).

2ª.) A estrutura de recozimento (A_1) praticamente foi a que menor taxa de corrosão apresentou em todos os meios ensaiados.

3ª.) A estrutura de revenimento a 650°C (A_5) foi a seguinte melhor, em presença do As_2O_3, apresentando-se em condições bem próximas do estado de recozimento.

4ª.) A_3 (Rev. 350°) foi a que praticamente apresentou a pior condição de inibição, só chegando a uma inibição total com a concentração de 500 mg/l.

5ª.) A estrutura A_2 (Temp.) apresentou condições bem próximas às da estrutura A_3.

6ª.) A concentração de 10 mg/l de óxido de Arsênio, dissolvido em solução sulfúrica - 1N, a taxa de corrosão aumentou para todas as cinco estruturas, indicando que o As_2O_3 ativou o ataque, trabalhando como catalizador.

7ª.) A estrutura de Revenimento a 500°C (A_4) foi a que apresentou resultado intermediário.

8ª.) Praticamente a partir de 30 mg/l de óxido de Arsênio em

solução de um normal de ácido sulfúrico, o As_2O_3 começou a trabalhar como inibidor, retardando a velocidade de ataque do meio corrosivo.

9ª.) Em 100 mg/l de concentração de As_2O_3 as taxas já começaram a abaixar.

10ª.) Na concentração de 200 mg/l de óxido de Arsênio em solução sulfúrica, as taxas se apresentaram bem baixas.

11ª.) Verificou-se que a partir de 500 mg/l de As_2O_3, em solução de H_2SO_4-1N, não houve corrosão do aço martensítico nas cinco estruturas ensaiadas (A_1 - Temp. 1050°C; A_2- Recoz. ; A_3 - Rev. 350°C; A_4 - Rev. 500°C; e A_5 - Rev. 650°C), donde se conclui que a partir dessa concentração o óxido de Arsênio é um inibidor para o aço inoxidável AISI-420.

B I B L I O G R A F I A

1 - ANDREWS, DONALD H & KOKES, RICHARD J. - "Química Geral" Ao Livro Técnico S.A e Editora da Universidade de São Paulo - São Paulo - 1968.

2 - ASTM DESIGNATION, 61-67 - "Preparing, Cleaning and Evolu ation Corrosion Test Specimens" - ASTM, Part 31 July 1971.

3 - GENTIL, VICENTE - "Corrosão", Almeida Neves Editores Ltda, Rio de Janeiro - 1970.

4 - CHIAVERINI, VICENTE - "Aços Carbono e Aços Liga" - Asso ciação Brasileira de Metais, São Paulo - 1965.

5 - COLOMBIER, L. & HOCKMANN, J. - "Aciers Inoxydables Aciers Refractaires" - 2ª Ed. Dunod, Paris, France - 1965.

6 - HUDSON, R.M: & STRAGAND, P.L. - "Influence of Arsenic on Picking of and Hydrogen Absorption by Mild Steel in Sulphuric Acid Solutions", Corrosion, Vol. 18, Págs.259-261 - July, 1962.

7 - MAHAN, BRUCE, H. - "Mahan.Química, um curso Universitá - rio" - Editora Edgard Blucher Ltda e Editora da Universi dade de São Paulo - SP - 1970.

8 - OHLWEILER, O.A. - "Química Analítica Quantitativa" Vol. 1, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A/MEC - Rio de Janeiro - 1974.

9 - OLIVEIRA FILHO, O. - "Influência de Tratamentos Térmicos e de Inibidores nas Caracteristicas de Perda de Peso de um Aço Inoxidável Martensítico" - DME, EFEI, Itajubá - 1974.

10- PIMENTEL, G.C. & SPRATLEY, RICHARD. D. - "Química um Tratamento Moderno", Vols. I e II, Editora Edgard Blucher Ltda e Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo - MEC - 1974.

11- ROCKEL, M.B. - "Interpretation of the Second Anodic Current Maximum on Polarization Curves of Sensitized Chromium Steels in 1N-H_2SO_4 Corrosion", Vol. 27 Págs. 95 a 103 - 1971.

12 - RODRIGUES, V.L.K. e CABRAL U.O. - "Influência da Concentração de Arsênico sobre as caracteristicas de perda de peso de dois Aços Inoxidáveis", XXIX Congresso Anual da ABM, Porto Alegre, Julho - 1974.

13- SANTOS, J.A.R. - "Cálculo Numérico e Computação" - Notas de Aula, Editora da EFEI, Itajubá - 1974.

14 - SILVA, PAULO FURTADO - "Corrosão e Proteção das Superfícies Metálicas" - Edições Engenharia da UFMG, Belo Horizonte - MG - 1967.

15 - STERN, MILTON - "The Electrochemical Behavior, Including Hydrogen Over Voltage", of Iron in Acid Environments Journal, of the Elect. Soc. Vol. 102, Págs. 609 a 616 - 1955.

16 - STERN, M. - "The Effect of Alloying Elements in Iron on Hydrogen Over Voltage and Corrosion Rate in Acid Enviroments", Journal of the Electrochemical Society, Vol. 102 - Pág. 663 a 668, December - 1955.

17 - UHLIG, HERBERT H. - "Corrosion y Control de Corrosion" Ediciones Urmo, Bilbao - España - 1970.

18 - VAN VLACK, LAWRENCE H. - "Principio de Ciência dos Materiais", Editora Edgard Blucher Ltda e Editora da Universidade de São Paulo - São Paulo - 1970.

19 - WEST, J.M. - "Electrode position and Corrosion Processes" - D.Van Nostrand Company Ltda, London - 1965

ANEXO

PROGRAMA E RESULTADOS DE COMPUTAÇÃO

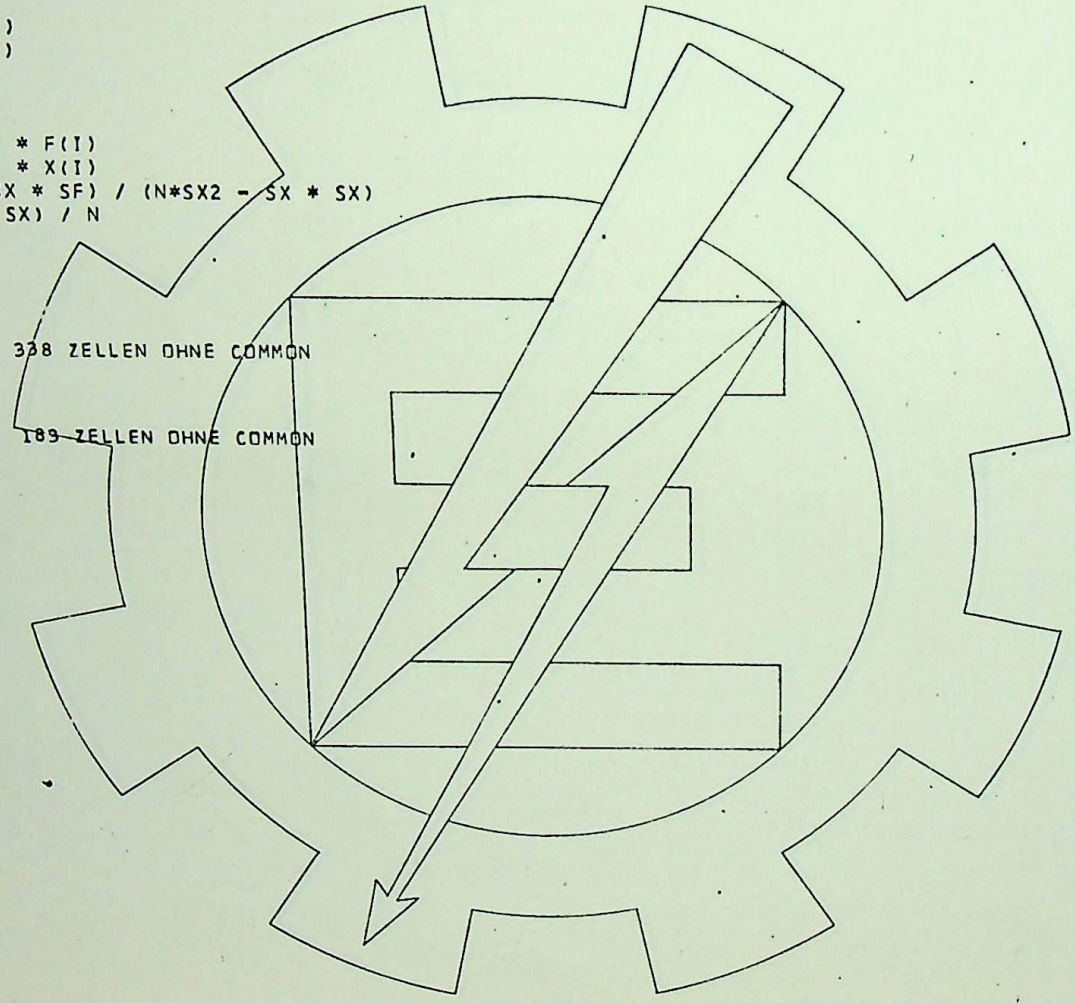
```
C          PROGRAMA PARA DETERMINAR A TAXA DE CORROSAO
C          FREDMARCK G LEAO      EFEI      1975
      DIMENSION X(10), F(10)
      WRITE(1, 6)
    6 FORMAT (1H1)
    5 READ(12,1) N, (X(I),F(I),I=1,N)
    1 FORMAT( I2/ (2F10.0) )
      IF ( N .EQ. 0 ) STOP
      CALL REGLIN(X,F,N,A0,A1)
      WRITE(1,10) A0, A1
   10 FORMAT(/43X,'OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO'//,42X,'A0 ='
     1 , F15.5, 5X, 'A1 =', F15.5 / )
      Y24 = A0 + A1 * 24.
      Y48 = A0 + A1 * 48.
      DY = (Y48 - Y24) * 100.
      WRITE(1, 4) Y24, Y48, DY
    4 FORMAT (40X, 'EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE ', F8.2, '  MG/CM*2'
     1 /      40X, 'EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE ', F8.2, '  MG/CM*2'
     2 // 32X, 'TAXA DE CORROSAO ( (Y48 - Y24) * 100. ) =',
     3 F10.2, 2X, 'MG/DM*2/DIA'/// )
       GO TO 5
       END
```

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ - BIBLIOTECA

```
C       SUB-ROTINA  REGLIN  -  PARA REGRESSAO LINEAR
      SUBROUTINE REGLIN(X,F,N,A0,A1)
      DIMENSION X(N),F(N)
      SX = X(1)
      SF = F(1)
      SFX = X(1) * F(1)
      SX2 = X(1) * X(1)
      DO 1 I = 2, N
      SX = SX + X(I)
      SF = SF + F(I)
      SFX = SFX + X(I) * F(I)
    1 SX2 = SX2 + X(I) * X(I)
      A1 =(N * SFX - SX * SF) / (N*SX2 - SX * SX)
      A0 = (SF - A1 * SX) / N
      RETURN
      END
```

```
HP        FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:   338 ZELLEN OHNE COMMON

UP REGLIN FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:   189 ZELLEN OHNE COMMON
```



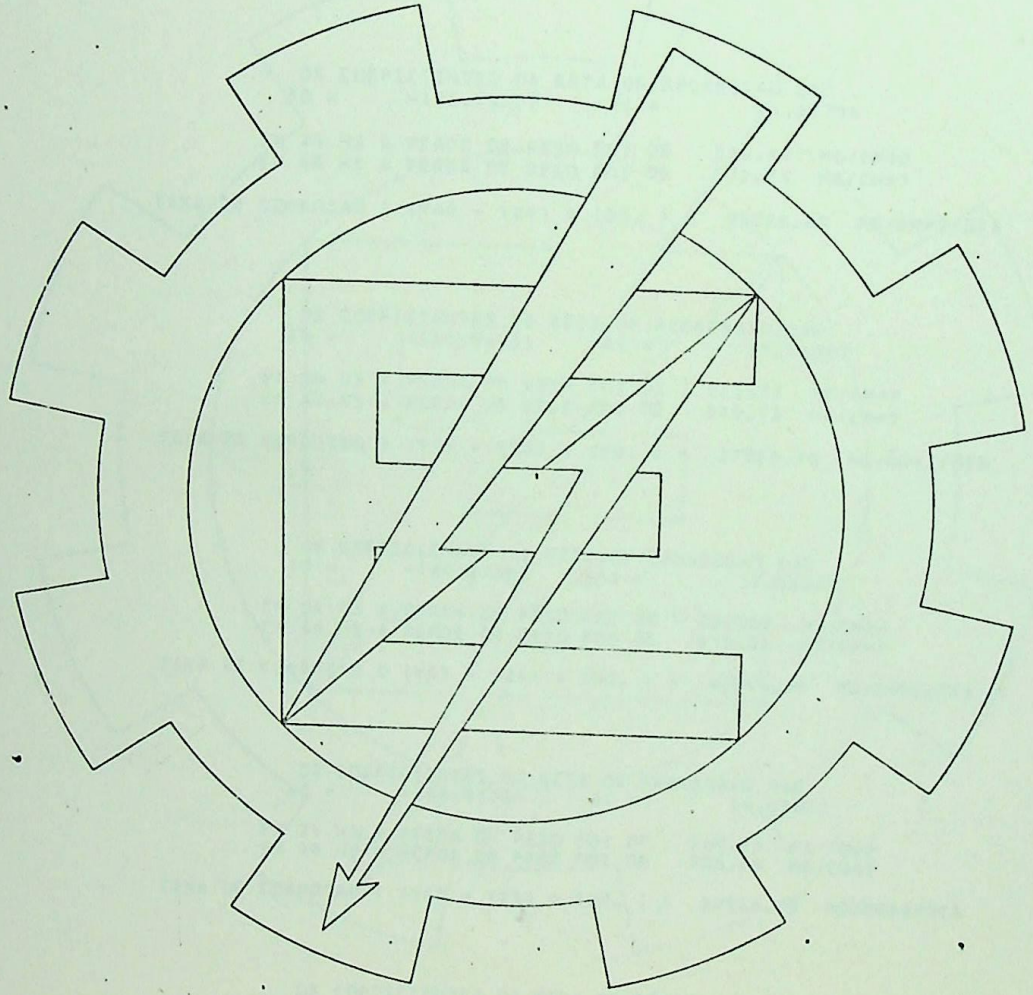
ESCOLA FEDERAL DE E

TR86 FTN-COMPILER MV08(70) 131173 STARTET

04.03.1975

PROGRAMMLAENGE 6783

ENDE DER COMPILATION



ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -122.55549 A1 = 10.47246

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 128.78 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 380.12 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 25133.90 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -131.79207 A1 = 14.67774

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 220.47 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 572.74 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 35226.59 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -166.74451 A1 = 15.76087

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 211.52 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 589.78 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 37826.10 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -187.82000 A1 = 17.06000

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 221.62 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 631.06 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 40944.00 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -181.83354 A1 = 14.63262

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 169.35 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 520.53 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 35118.29 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -418.15000 A1 = 19.96250

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 60.95 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 540.05 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 47910.00 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -54.37672 A1 = 16.44698

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 340.35 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 735.08 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 39472.76 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -132.78421 A1 = 16.56316

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 264.73 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 662.25 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 39751.58 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -277.23354 A1 = 23.71596

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 291.95 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 861.13 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 56918.29 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -112.85549 A1 = 19.40579

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 352.88 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 818.62 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 46573.90 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -179.41000 A1 = 8.95917

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 35.61 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 250.63 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 21502.00 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
AO = -156.77298 A1 = 18.12140

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 278.14 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 713.05 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 43491.37 MG/DM*2/DIA

ESCOLA FEDERAL

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -150.94140 A1 = 17.33105

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 265.00 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 680.95 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 41594.53 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -101.96596 A1 = 17.11614

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 308.82 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 719.61 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 41078.74 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -217.62000 A1 = 16.76797

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 184.81 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 587.24 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 40243.13 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -47.51429 A1 = 10.93452

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 214.91 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 477.34 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 26242.86 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -217.32134 A1 = 18.00864

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 214.89 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 647.09 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 43220.73 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -250.93354 A1 = 19.43262

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 215.45 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 681.83 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 46638.29 MG/DM*2/DIA

ESCOLA FEDERAL

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -105.29263 A1 = 16.21947

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 283.97 MG/CM*?
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 673.24 MG/CM*?

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 38926.74 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -170.18902 A1 = 14.12175

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 168.73 MG/CM*?
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 507.65 MG/CM*?

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 33892.20 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -4.33333 A1 = 0.20833

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 0.67 MG/CM*?
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 5.67 MG/CM*?

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 500.00 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -265.20000 A1 = 16.20000

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 123.60 MG/CM*?
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 512.40 MG/CM*?

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 38880.00 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -216.51000 A1 = 14.33000

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 127.41 MG/CM*?
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 471.33 MG/CM*?

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 34392.00 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -205.58000 A1 = 14.84417

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 150.68 MG/CM*?
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 506.94 MG/CM*?

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 35626.00 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -114.36667 A1 = 5.65000

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 21.23 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 156.83 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 13560.00 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -104.38333 A1 = 9.01250

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 111.92 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 328.22 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 21630.00 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -264.33000 A1 = 14.65250

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 87.33 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 438.99 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 35166.00 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -39.35000 A1 = 3.25167

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 38.69 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 116.73 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 7804.00 MG/DM*2/DIA

OS COEFICIENTES DA RETA DE REGRESSAO SAO
A0 = -16.11579 A1 = 0.93772

EM 24 HS A PERDA DE PESO FOI DE 6.39 MG/CM*2
EM 48 HS A PERDA DE PESO FOI DE 28.89 MG/CM*2

TAXA DE CORROSAO ((Y48 - Y24) * 100.) = 2250.53 MG/DM*2/DIA

STOP !

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA