USO DE SOLOS FINOS RESIDUAIS EM SISTEMAS DE SOLO REFORÇADO COM ELEMENTOS METÁLICOS

Nelson Lopes Queiroz

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof Maurício Ehrlich, D.Sc.
(Presidente)

Prof Willy Alvarenga Lacerda, Ph.D.

Prof Luiz Roberto Martins de Miranda, D.Sc.

Prof Franklin dos Santos Antunes, D.Sc.

Eduardo Torres Serra, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JANEIRO DE 1996

QUEIROZ, NELSON LOPES

Uso de Solos Finos Residuais em Sistemas de Solo Reforçado com Elementos Metálicos [Rio de Janeiro] 1995.

x, 115 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1995)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

I. COPPE/UFRJ II. Título (série).

"o gênio é 1% inspiração e 99% transpiração"

(Thomas Alva Edison)

A meus pais, Heitor e Nair

e minhas irmãs, Silvia e Marcia.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Maurício Ehrlich, pela orientação e experiência transmitidas ao longo do desenvolvimento desta tese.

Ao Prof. Luiz Roberto Miranda, pela atenção e colaboração dedicadas durante grande parte deste trabalho.

Ao Prof. Lúcio Sathler, pelas opiniões e sugestões apresentadas.

Ao Prof. Márcio Almeida, pela atenção em vários momentos.

Ao Prof. Francisco Casanova, fundamental em diversas passagens deste trabalho.

Ao Prof. Fernando Danziger, pelo incentivo e amizade durante os anos de graduação e mestrado na UFRJ .

Ao Prof. Renato Clementino, por fornecer grande parte do material ensaiado no laboratório de solos.

À Prof. Helena Polivanov, do Instituto de Geologia da UFRJ, pela análise detalhada das fotografias dos solos obtidas a partir do MEV.

À Engenheira Maria Stella Borges, pelo material didático oferecido.

Ao Geólogo André Avellar, pela classificação pedológica dos solos estudados.

Ao Engenheiro Osvangivaldo Oliveira, meu único colega de turma em tempo integral, pelo tempo que compartilhamos juntos, bem como a Audrey, Sérgio, Cláudio, Ester, Francisca, Teresa, Luís Carlos, Bergman, Fátima, Márcia, José Márcio, Adriana, Ioná, Dulce, Eliane e Cláudia.

Ao Artista Plástico Ricardo Galvão, pelos desenhos e ilustrações que muito ajudaram a enriquecer este trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao CEPEL, pela determinação dos parâmetros de resistividade elétrica dos solos.

Ao Instituto de Física da UFRJ, pela utilização do equipamento de difração de raios X.

Ao Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE, pela permissão da utilização de todo o material e equipamento necessários para a confecção desta tese, dentre eles o Microscópio Eletrônico de Varredura.

Ao Jornal "O Grito Serrano", pela permissão do uso de todo o software e hardware necessários.

À Empresa Terra Armada, que facilitou a pesquisa de campo permitindo a instalação de sensores, para o acompanhamento da corrosão, junto aos elementos metálicos galvanizados na obra.

À Escola de Música da UFRJ, pelo empréstimo do equipamento de projeção (episcópio).

Ao Engenheiro Antônio Jorge Delle Vianna, pela colaboração em diversos pontos desta pesquisa, principalmente em laboratório.

Aos engenheiros, técnicos e administrativos do Laboratório de Mecânica dos Solos da COPPE, sobretudo ao Eng. Sérgio Iório, pelo apoio na realização dos ensaios triaxiais.

Finalmente, a todos que contribuíram e ajudaram na elaboração desta tese e, principalmente, ao Engenheiro, Professor e Amigo, Ivan Napoleão Bastos, que, com certeza, foi o meu braço direito durante um bom tempo.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

USO DE SOLOS FINOS RESIDUAIS EM SISTEMA DE SOLO REFORÇADO COM ELEMENTOS METÁLICOS

Nelson Lopes Queiroz

JANEIRO, 1996

Orientador: Prof Maurício Ehrlich

Programa: Engenharia Civil

A técnica de construção denominada solo reforçado é bastante atraente do ponto de vista técnico-econômico. É prática comum neste tipo de obra rejeitar-se solos com elevada porcentagem de finos por considerá-los, além do aspecto de menor resistência, em se tratando de reforços metálicos, o problema de corrosão, já que acredita-se que os finos tenham um papel de potencializador neste processo. Esse tipo de exigência acarreta aumento de custo no transporte, encarecendo desnecessariamente a obra.

Na presente tese comparam-se solos de origem residual, com finos, freqüentemente encontrados no Rio de Janeiro, com o que foi utilizado na construção de uma rampa de acesso em solo reforçado (padrão Terra Armada), na segunda fase da Linha Vermelha e que atende às especificações convencionais.

Estes solos foram submetidos a ensaios de resistência mecânica, monitoramento do potencial de eletrodo e polarização eletroquímica em meio aquoso e diretamente no próprio solo, além do acompanhamento de campo da própria obra.

Os resultados obtidos mostram que o comportamento dos solos alternativos é equivalente ao do solo que preenche o padrão convencional, tanto do ponto de vista de

resistência mecânica quanto de resistência à corrosão, levando a crer que não existem justificativas para que se restrinja, genericamente, o uso de solos residuais, com finos, em obras de solo reforçado.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

RESIDUAL FINE GRAINED SOIL ON REINFORCED SOIL SISTEMS USING METALLIC REINFORCEMENTS

Nelson Lopes Queiroz

JANUARY, 1996

Thesis Supervisor: Prof. Maurício Ehrlich

Department: Civil Engineering

The soil reinforcement technique is quite atractive on technical and economic point of view. The conventional technique reject high percentage fine grained soil because it is assumed, beside its low shear resistance, when metallic reinforcement is considered, that the soil fines increase the corrosion rate process. This restricted standard usually means higher costs, due to the increase of the soil transport distance.

In this paper tests results of some residual fine grained soil, usually found in Rio de Janeiro, is compared with the results of a soil that met the standards, wich was used in a reinforced earth wall for the construction of a highway access in the second phase of Linha Vermelha construction.

Tests include soil resistance, electrod potential accompaniment and electrical-chemical polarization in water ambience and directly in the soil, field measurements for reinforcements corrosion were also performed.

The results show that the standart and alternative soils have similar behavior, on mechanical and corrosion point of view. This lead to the conclusion that there his no rason for a generic restriction to fine grained residual soils on reinforced soil construction.

ÍNDICE

	Página
INTRODUÇÃO	12
CAPÍTULO 1 - O SOLO REFORÇADO	14
1.1 - HISTÓRICO	14
1.2 - CONCEPÇÃO	15
1.3 - TIPOS DE SISTEMAS	19
1.4 - MECANISMO DE COMPORTAMENTO	22
1.5 - FILOSOFIA DE PROJETO	27
CAPÍTULO 2 - CORROSÃO DOS REFORÇOS METÁLICOS	29
2.1 - INTRODUÇÃO	29
2.2 - CORROSÃO	30
2.2.1 - GENERALIDADES	30
2.2.2 - CORROSÃO ELETROQUÍMICA	32
2.2.3 - FORMAS DE CORROSÃO	34
2.2.4 - POLARIZAÇÃO	36
2.3 - CORROSÃO PELO SOLO	45
CAPÍTULO 3 - ESTUDOS EXPERIMENTAIS	59
3.1 - INTRODUÇÃO	59
3.2 - OS SOLOS ESTUDADOS	59
3.2.1 - DESCRIÇÃO	59
3.2.2 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	60
3.2.3 - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	66

3.2.4 - ESTUDOS FÍSICO-QUÍMICOS 68

3.3 - RESIST. AO CISALHAMENTO DOS SOLOS EM ESTUDO 71

3.3.1 - INTRODUÇÃO 71

3.3.2 - ENSAIOS DE RESISTÊNCIA 72

3.4 - ENSAIOS DE CORROSÃO 77

3.4.1 - CURVAS DE POLARIZAÇÃO 77

3.5 - ESTUDOS DE CAMPO 95

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 104

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 109

ANEXO I - CARACTERIZAÇÃO DAS TIRAS METÁLICAS 110

ANEXO II - AS CÉLULAS ELETROQUÍMICAS 111

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 113

A presente tese apresenta uma pesquisa conjunta do Programa de Engenharia Civil (PEC) e do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PEMM) da COPPE/UFRJ onde o objetivo é mostrar a viabilidade do emprego de solos com elevada percentagem de finos (solos argilosos e/ou siltosos) na execução de muros ou aterros de solo reforçado com elementos metálicos, figura 1.

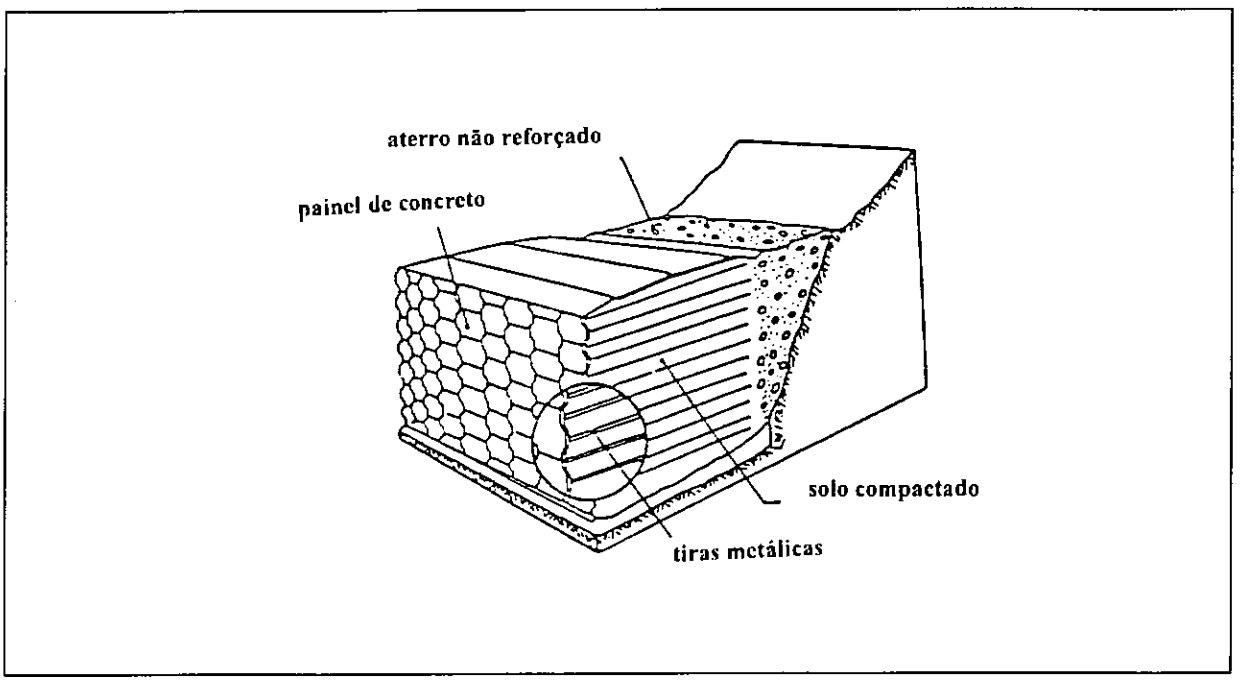


Fig. 1: diagrama esquemático do solo reforçado com elementos metálicos

Referência: Christopher et al, 1990

O emprego de solo reforçado com elementos metálicos e/ou sintéticos é uma técnica recente, a nível internacional, que vem se popularizando visto suas vantagens técnico-econômicas.

O solo é um material de construção barato que adequadamente compactado apresenta resistências à compressão e ao cisalhamento satisfatórias, porém, com resistência à tração baixa. O emprego de reforços supre esta deficiência; o solo reforçado torna-se um material potencialmente mais adequado à construção.

Esta técnica é particularmente interessante para o nosso país. Extensa área do território brasileiro é constituída por solos adequados a este tipo de projeto, grande parte deles de origem residual, geralmente ricos em finos, resultantes do intemperismo das rochas e permanecendo no seu local de origem.

Nos climas tropicais, diversamente do que ocorre nas regiões temperadas, os solos residuais se apresentam em camadas espessas e normalmente possuem características mecânicas adequadas a este tipo de obra. A engenharia nacional tem larga e bem sucedida experiência no uso destes tipos de solos na construção de aterros compactados não reforçados para fins rodoviários, barragens de terra dentre outras obras.

Os procedimentos comumentes utilizados para projeto de obras em solo reforçado foram estabelecidos com base, principalmente, em trabalhos de pesquisa desenvolvidos na França, nos Estados Unidos e na Inglaterra, países de clima temperado. Esta técnica foi transposta para o Brasil trazendo as especificações desenvolvidas para as condições particulares desses países de clima temperado. De acordo com estas especificações, os solos com finos devem ser evitados por apresentarem características mecânicas inadequadas, quanto à drenagem e resistência, e, no caso de reforços metálicos, por funcionarem como catalisadores no processo de corrosão. Daí, tem-se vetado o uso de solos residuais, que apesar da significativa fração de finos, poderiam ser utilizados sem prejuízos técnicos. Tal atitude normalmente resulta em significativos e desnecessários aumentos de custos, principalmente no que diz respeito ao item transporte.

Na presente pesquisa foram analisados quatro solos de diferentes origens. Estes estudos envolveram ensaios de resistência mecânica e potencial de corrosão dos solos e dão uma forte indicação de que, quer sob o aspecto mecânico, quer sob o ponto de vista de corrosão, estes solos finos residuais podem ser empregados, com vantagens técnicas e principalmente econômicas, em obras de solo reforçado.

O SOLO REFORÇADO

Capítulo 1

1.1 - HISTÓRICO

Entende-se por reforço de solos a utilização de elementos (que podem ser tiras ou grelhas, plásticas ou metálicas, ou mantas de geotêxteis), no interior da massa de solo com a finalidade de conferir ao conjunto uma maior resistência e menor deformabilidade.

A utilização de reforço na base de aterros de baixa altura para estradas de acesso ou vicinais traz como benefícios a redução no consumo do material de aterro, aumento da vida útil da estrada e diminuição do número de manutenções periódicas necessárias para a otimização do tráfego. No caso de aterros mais altos sobre solos moles, a presença do reforço faz com que seja aumentado o fator de segurança contra a ruptura, utilização de taludes mais íngremes e uma melhor distribuição de pressões no solo de fundação com uma conseqüente maior uniformidade nos recalques superficiais. Em estruturas de arrimo e taludes íngremes a presença das camadas de reforço geram forças de tração estabilizadoras que permitem a manutenção de geometrias que não seriam possíveis na ausência destas camadas. Outras aplicações de reforços que podem ser citadas são: reforços de pavimentos rodoviários e ferroviários, estruturas de contenção de avalanches, pequenas barragens, silos, etc.

A utilização de inclusões para reforço da massa de solo remonta aos tempos da antigüidade. Um exemplo claro disto são as muralhas de Ziggurat de Agar Quf, na Mesopotâmia, construída em 1400 a.C., utilizando mantas feitas de raízes como elementos de reforço. A Muralha da China também possui trechos em solo reforçado com raízes. Os Incas utilizavam misturas de argila e lã de lhamas para reforço de pavimentos e a estrada para o Templo de La Luna, no Peru, é um exemplo deste tipo de aplicação. Apesar da antigüidade, tais obras resistem ao tempo. Modernamente, na década de 60, o engenheiro francês Henri Vidal, através da utilização de solos compactados reforçados por tiras metálicas, visando a construção de muros de contenção, fez reviver a técnica de reforço de solos.

PALMEIRA (1993) cita que o crescimento no emprego de soluções em solo reforçado para obras de Engenharia Geotécnica pode ser explicado através dos seguintes fatores: baixo custo em relação às soluções convencionais; facilidades executivas, melhoria das características mecânicas e propriedades dos elementos de reforço, em particular os de origem sintética; maior conhecimento do comportamento de estruturas em solo reforçado adquirido através de resultados de pesquisas e observações de obras reais.

Como é comum em técnicas de construção inovadoras, a utilização da técnica de reforço de solos em obras geotécnicas cresceu a uma velocidade muito superior à do desenvolvimento de pesquisas na área. Assim, é bastante provável que a maioria destas obras tenham sido projetadas conservativamente, embora alguns exemplos de arrojo já sejam relativamente comuns. Diversos centros de pesquisa, empresas geotécnicas e indústrias petroquímicas espalhadas pelo mundo têm feito grande esforço para aumento do conhecimento sobre o comportamento de estruturas em solo reforçado. Tais instituições têm se dedicado a pesquisas com modelos físicos e matemáticos, experiências de campo e testes com materiais, com o intuito de obter uma maior compreensão dos mecanismos de comportamento e uma maior acurácia nos métodos de projeto. Esta tarefa é aumentada a medida que surgem novos tipos de elementos de reforço com características mecânicas e geométricas diferentes dos já existentes.

1.2 - CONCEPÇÃO

O solo é o mais abundante e o mais barato material de construção encontrado na natureza. Na sua maioria, estes solos, desde que adequadamente compactados, podem apresentar uma resistência ao cisalhamento e à compressão de forma a possibilitar o seu uso como elemento estrutural.

Como o concreto, o solo é pouco resistente à tração, limitando-se a valores muito baixos dessa resistência. O solo reforçado, como o concreto armado, utiliza os mesmos elementos acessórios para resistência à tração, ou seja, os reforços, sejam eles metálicos ou sintéticos. Esses reforços é que estão submetidos aos esforços de tração.

Essa baixa resistência à tração é um fator que limita suas aplicações, por isso é que, em areias, tem-se o taludamento máximo limitado ao ângulo de repouso do solo, como representado na figura 1.1. O material resultante após a inclusão de reforços torna-se potencialmente mais utilizável em Engenharia Civil. O talude vertical torna-se, então, possível como visto na figura 1.2.

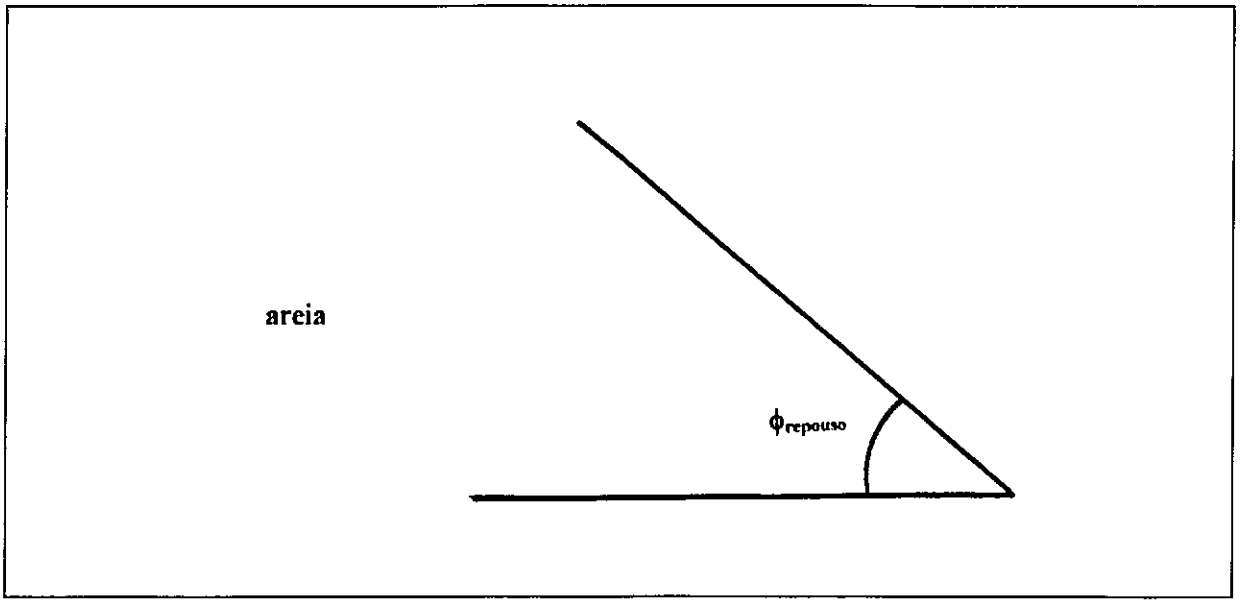


Fig. 1.1: influência dos reforços (solo sem reforço)

Referência: Ehrlich e Silva, 1992

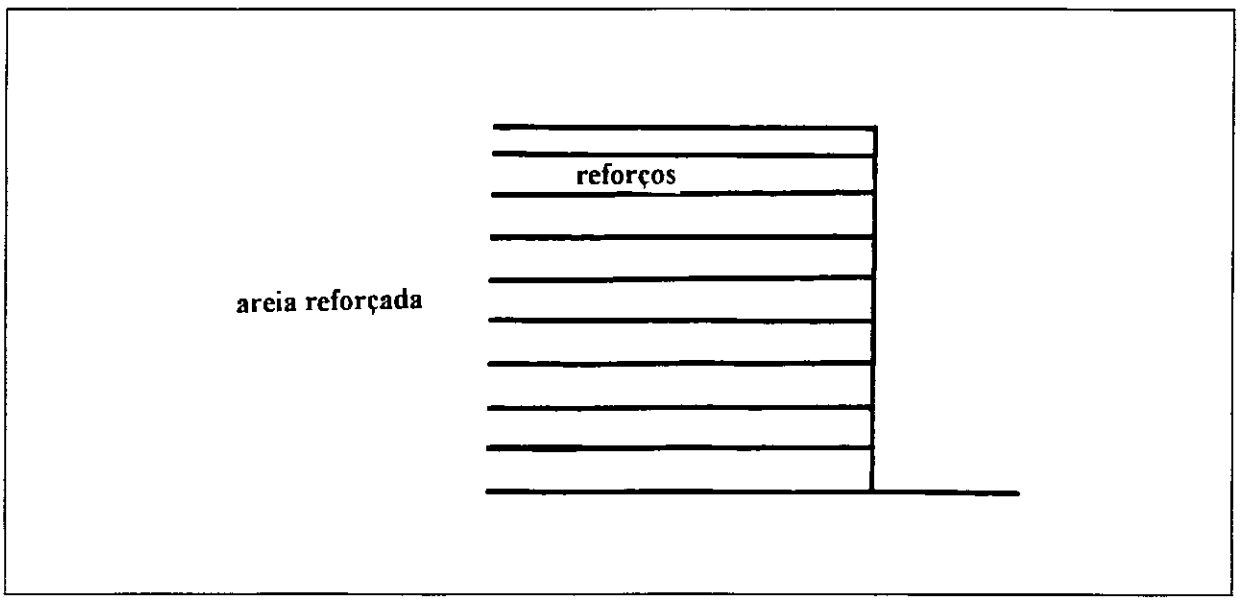


Fig. 1.2: influência dos reforços (solo reforçado)

Referência: Ehrlich e Silva, 1992

Na construção de sistemas de contenção de solo reforçado não são necessários equipamentos pesados. Quanto às vantagens técnicas, tem-se que estes sistemas toleram muito bem as deformações. Uma outra característica é o revestimento da face que não tem função estrutural outra além da estabilidade local. Assim sendo, a face pode ser estruturalmente leve. Tal condição possibilita, além da diminuição de custos, uma maior preocupação com o acabamento estético da obra, sendo comum a utilização de pré-moldados para este fim.

Na figura 1.3 apresenta-se exemplos de utilização de solo reforçado em obras de engenharia comparadas, quanto ao custo, a soluções convencionais.

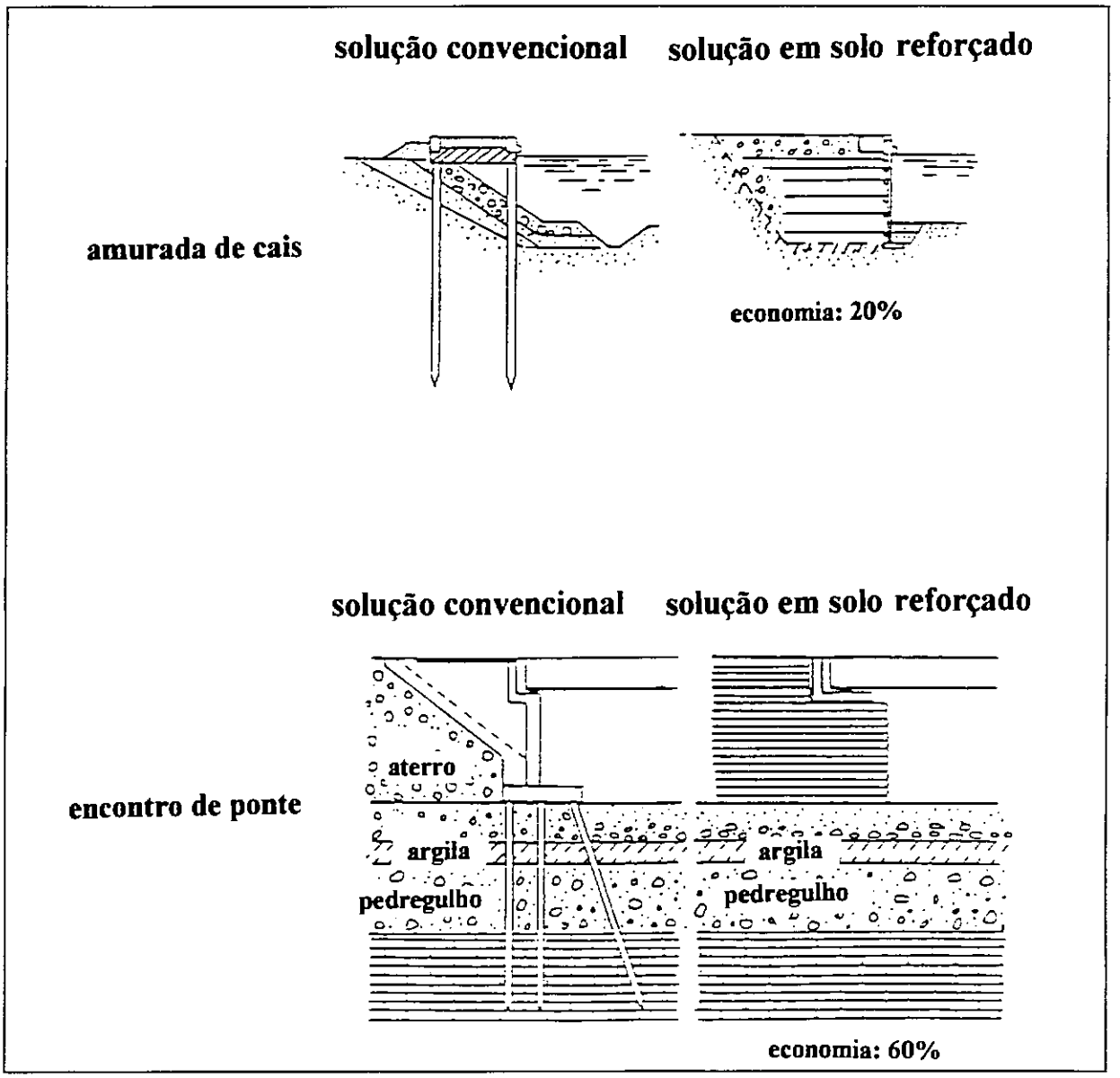


Fig. 1.3.a: solução convencional X solução em solo reforçado

Referência: Christopher et al, 1990

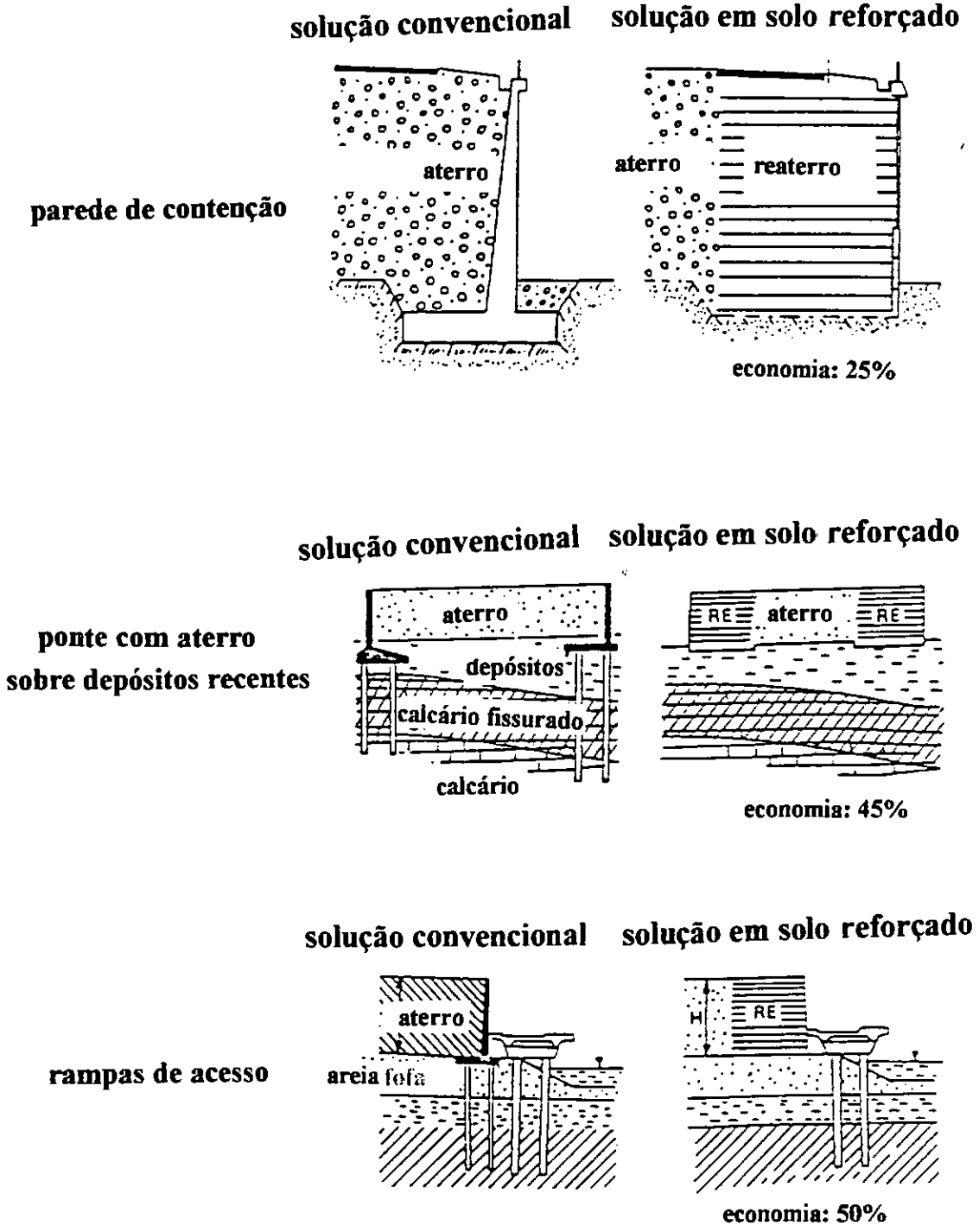


Fig. 1.3.b: solução convencional X solução em solo reforçado

Referência: Christopher et al. 1990

1.3 - TIPOS DE SISTEMAS

Um sistema de solo reforçado tem três componentes principais a saber: o material de aterro, os reforços e os elementos de face, como mostrados na figura 1.4.

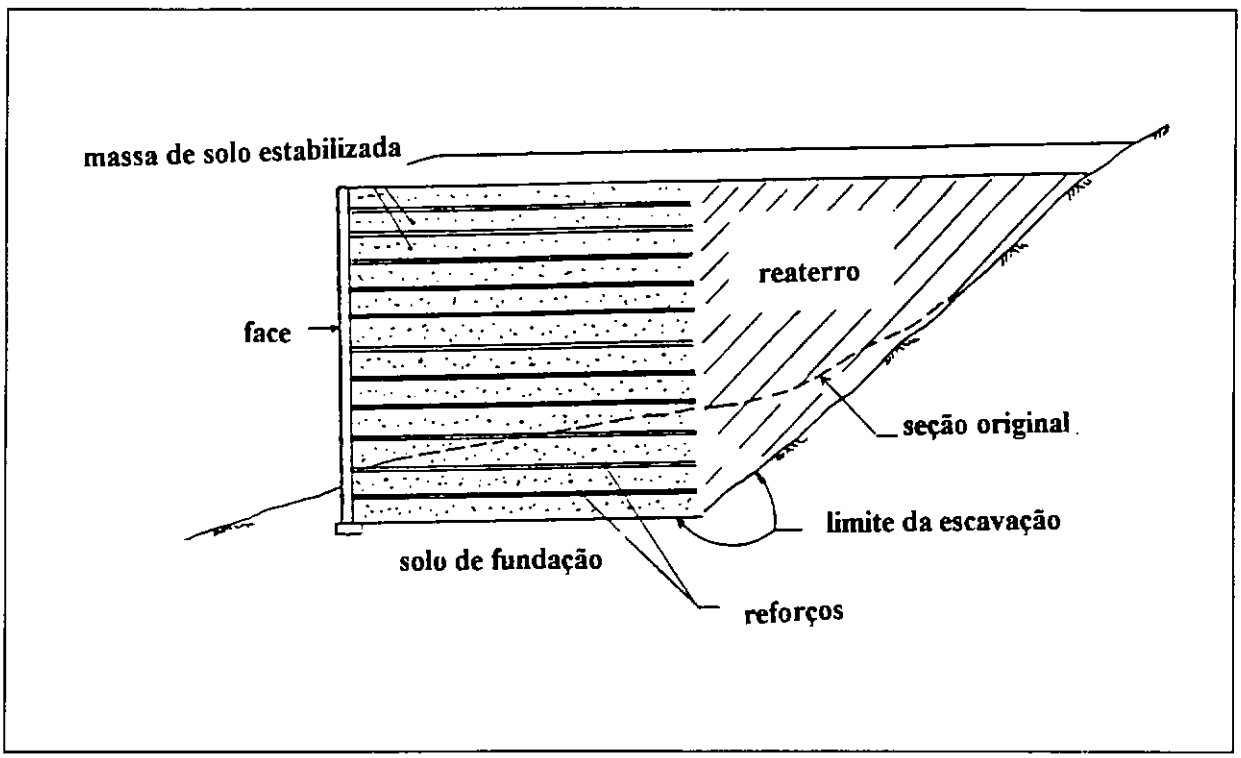


Fig. 1.4: solo reforçado com os seus principais componentes

Referência: Christopher et al, 1990

As camadas de solo compactado têm espessura que variam entre 20 e 80 cm. Geralmente são utilizados solos arenosos por serem um material drenante e é comum evitar-se os solos com finos, em se tratando de reforços metálicos, por, entre outros aspectos, acreditar-se que os finos têm um papel de acelerador no processo de corrosão desses elementos metálicos.

Os elementos de face têm função estrutural secundária que é a de garantir a estabilidade localizada e evitar erosões. Esses revestimentos incluem lâminas metálicas, pré-fabricados de concreto, gabiões, etc.

Existem diferentes tipos de sistemas de contenção compostos de solos reforçados, fotografias 1.1.a, 1.1.b, 1.1.c e 1.1.d, sob condições de trabalho e comportamento basicamente similares, diferenciados apenas pelos tipos de reforços que podem ser metálicos e não

metálicos onde sua geometria pode ser caracterizada como tiras, grelhas, células e mantas (geotêxteis). Segundo EHRLICH e MITCHELL (1994) os diferentes tipos de sistemas têm comportamento intrinsecamente similar; o que os diferencia são os reforços que, conforme sua rigidez, possibilitam uma maior ou menor deformação horizontal e conseqüente confinamento da massa reforçada.

Foto. 1.1.a: solo reforçado com tiras metálicas

Referência: Catálogo Informativo Terra Armada

Foto. 1.1.b: solo reforçado com grelhas plásticas

Referência: Catálogo Informativo Fortrac (Geogrelhas de Poliéster)

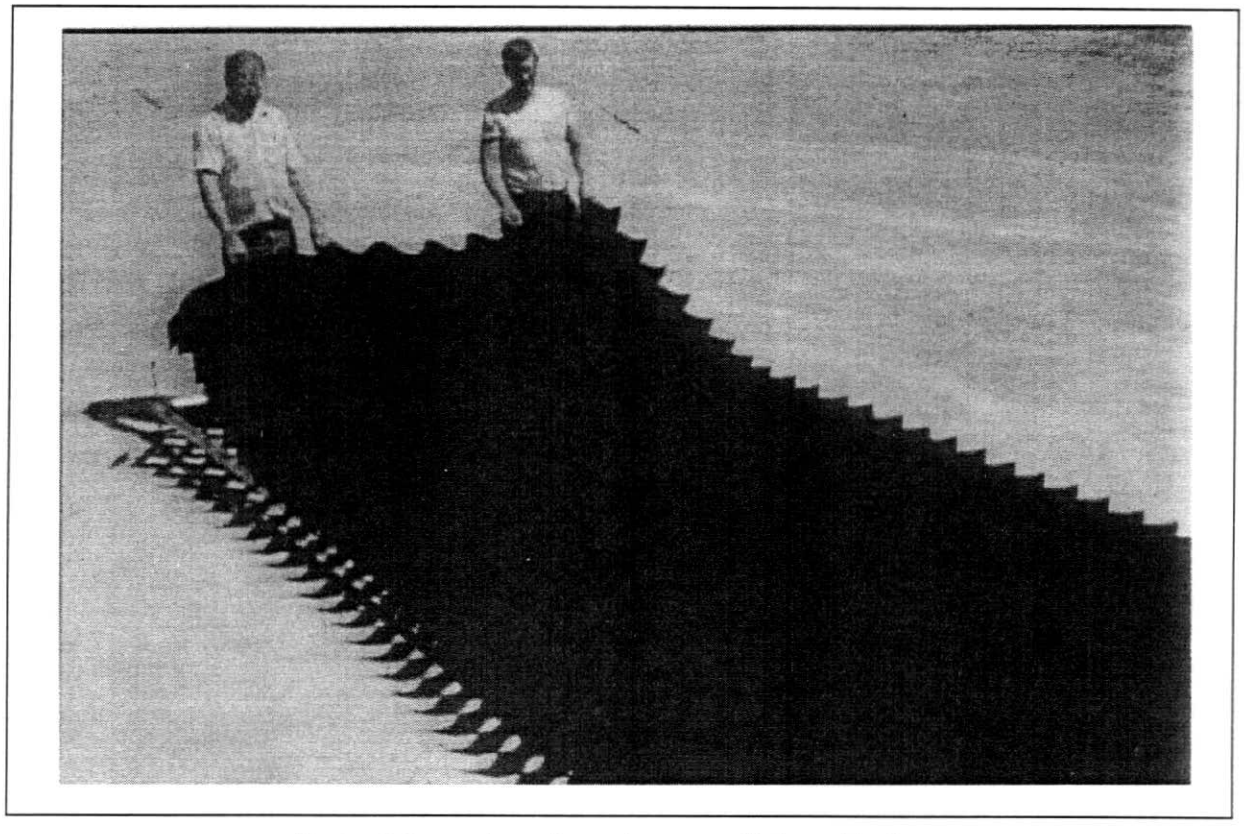


Foto. 1.1.c: solo reforçado com células plásticas

Referência: Catálogo Informativo Geoweb (Sistema de Confinamento Celular)

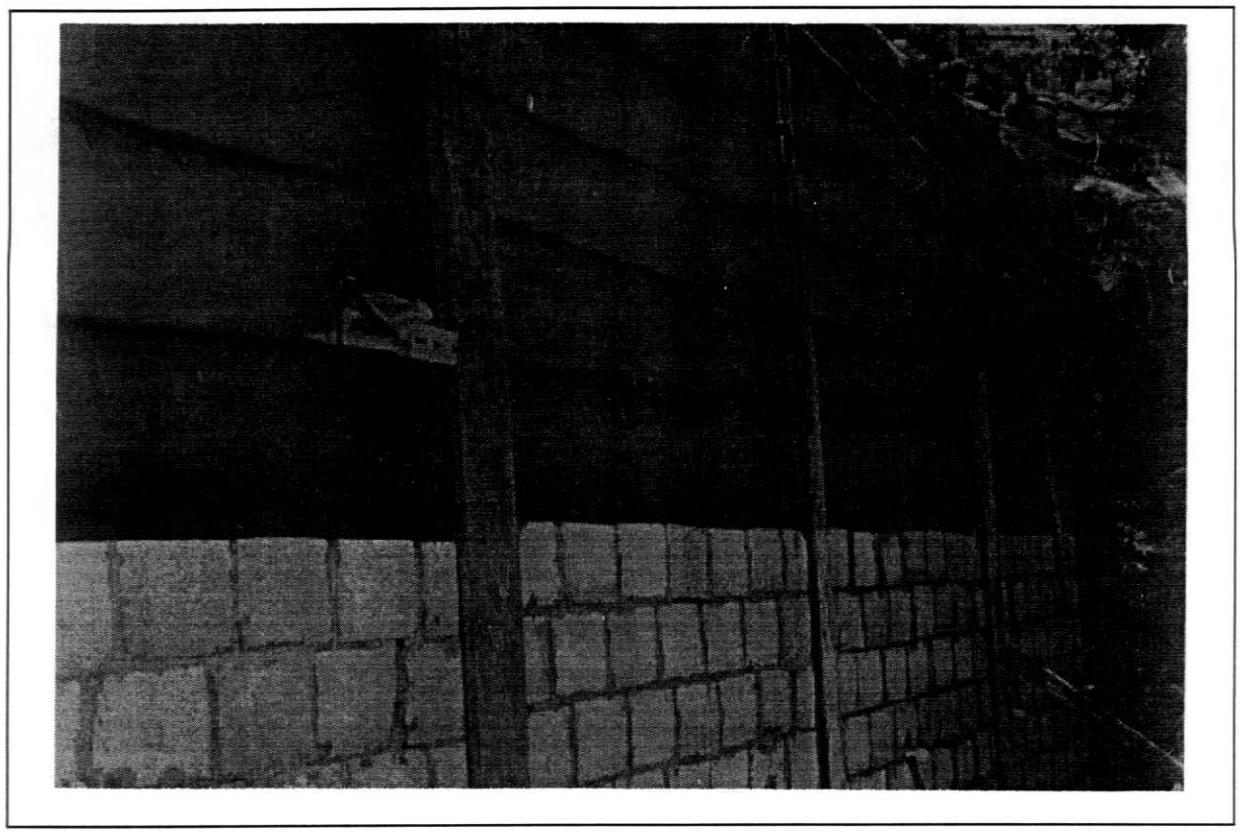


Foto. 1.1.d: solo reforçado com mantas de geotêxtil

Foto do Autor

1.4 - MECANISMOS DE COMPORTAMENTO

No solo reforçado a interação dos dois materiais produz uma composição estrutural que combina as melhores características de cada elemento separadamente.

Conforme EHRLICH e SILVA (1992) as inclusões diminuem as deformações no interior da massa reforçada, conferindo ao solo um confinamento. Este confinamento leva a que o material resultante dessa associação apresente um melhor comportamento mecânico. O solo reforçado comporta-se como um material coerente e a zona reforçada, como um todo, atua similarmente como um muro de peso convencional.

O colapso de um sistema de solo reforçado pode ocorrer interna ou externamente à zona reforçada. O comportamento quanto à estabilidade externa é similar ao das estruturas convencionais, isto é, pode-se verificar tombamento, deslizamento, falência das fundações, ou

uma instabilização geral externa. A rotura geral externa refere-se a uma superfície de rotura profunda passando bem abaixo da base da estrutura de contenção. Na figura 1.5 verifica-se a estabilidade das estruturas em solo reforçado.

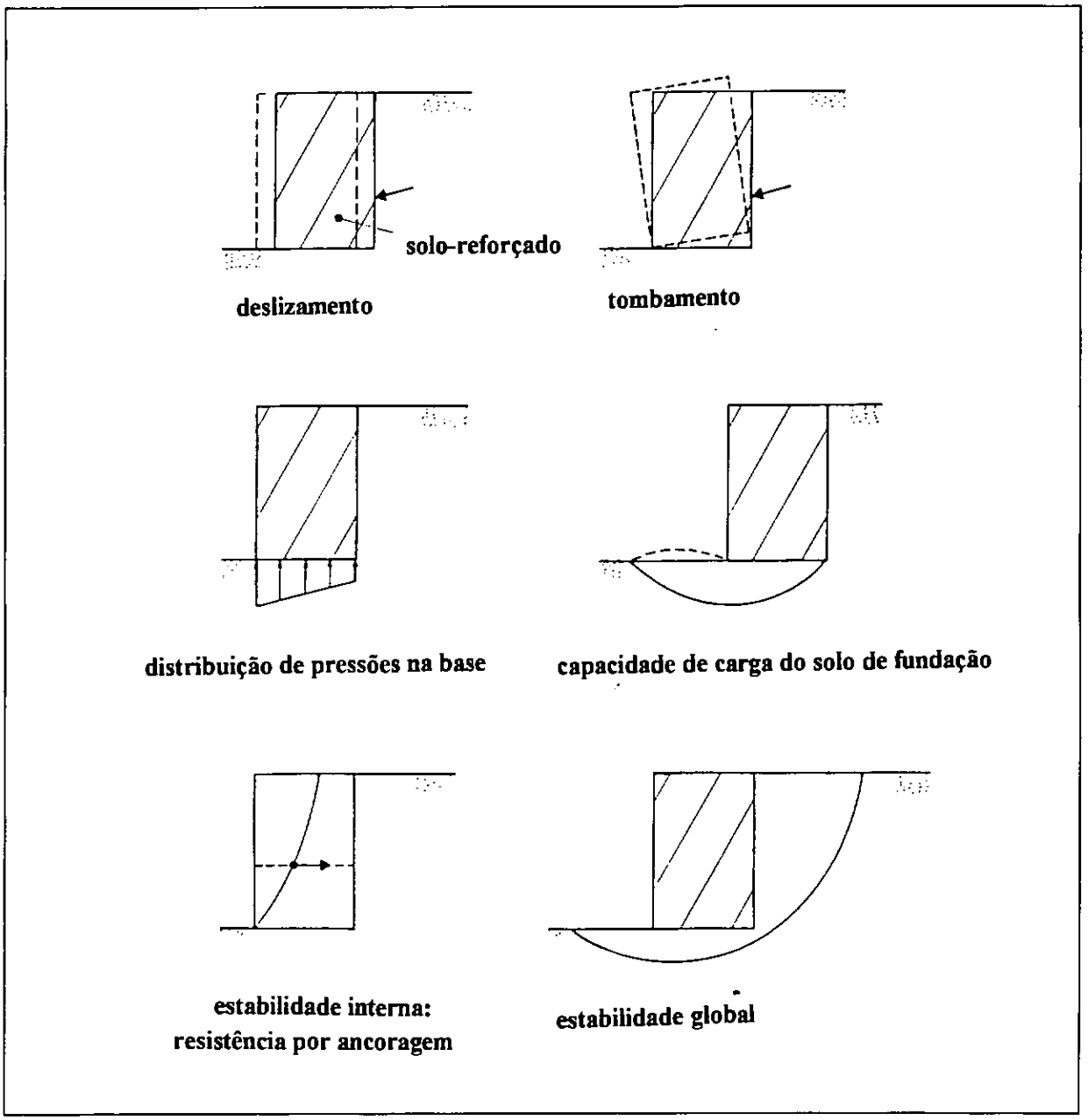


Fig. 1.5: verificação da estabilidade de estruturas em solo reforçado

Referência: Palmeira, 1993

Quanto à estabilidade interna, a transferência de tensões entre o solo e os reforços envolvem dois mecanismos básicos, atrito e resistência passiva do solo. A importância relativa de cada uma destas parcelas é função do tipo de reforço. No caso de mantas ou tiras lisas tem-se somente atrito, no caso de grelhas os dois efeitos têm sua parcela de contribuição. Na figura 1.6 apresenta-se esquematicamente um reforço metálico "padrão Terra Armada". Os ressaltos opõem uma resistência passiva à rotura, provavelmente neste caso o deslizamento não ocorre no contato solo/reforço, a saliência obriga a superfície de rotura a se processar inteiramente no solo, aumentando assim a resistência ao arrancamento, já que o atrito metal/solo costuma ser mais baixo que o atrito do solo.

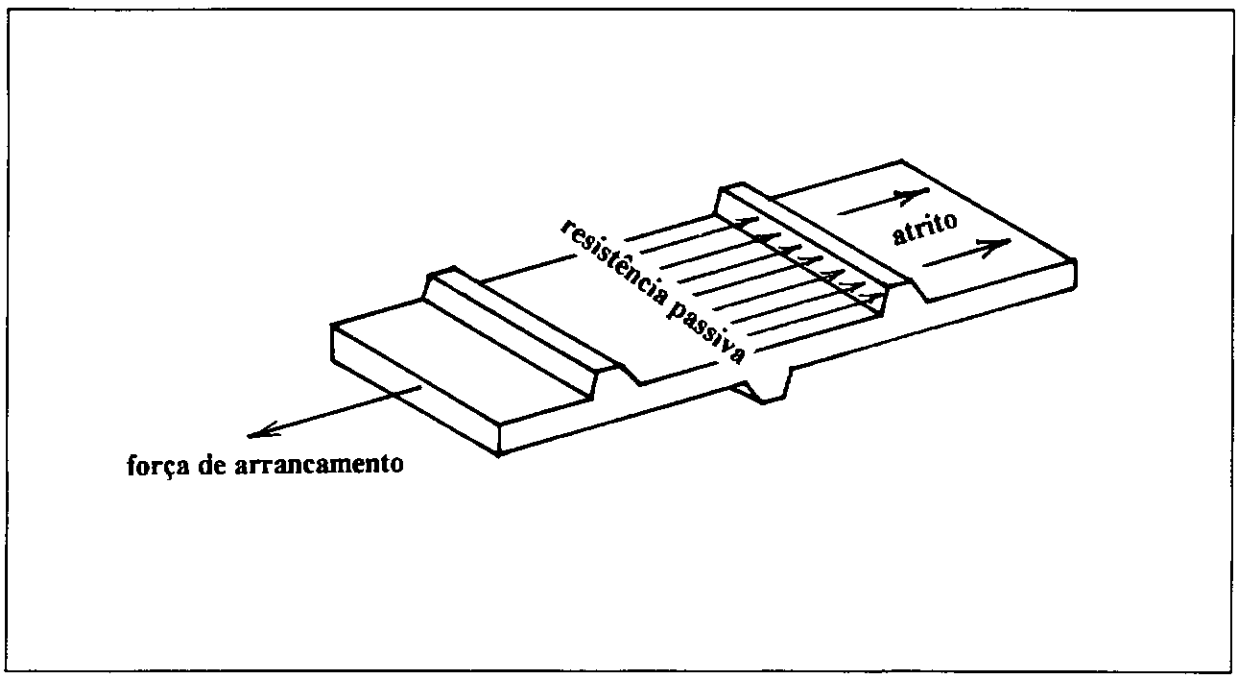


Fig. 1.6: mecanismo de transferência de carga solo X reforço

Referência: Ehrlich e Silva, 1992

A transferência de tensões entre o solo e o reforço controla a taxa máxima da mudança da força axial no reforço ao longo do seu comprimento. A tração nos reforços passa por um valor máximo e considera-se que os pontos de máximo ocorrem na intercessão com a superfície potencial de rotura, figura 1.7.

Também na figura 1.7 apresentam-se esquematicamente as zonas ativas e resistente no interior de um sistema de contenção em solo reforçado. Na zona ativa tem-se a estabilidade garantida pelos reforços. A instabilidade interna pode ocorrer caso haja rotura dos reforços ou arrancamento destes da zona resistente.

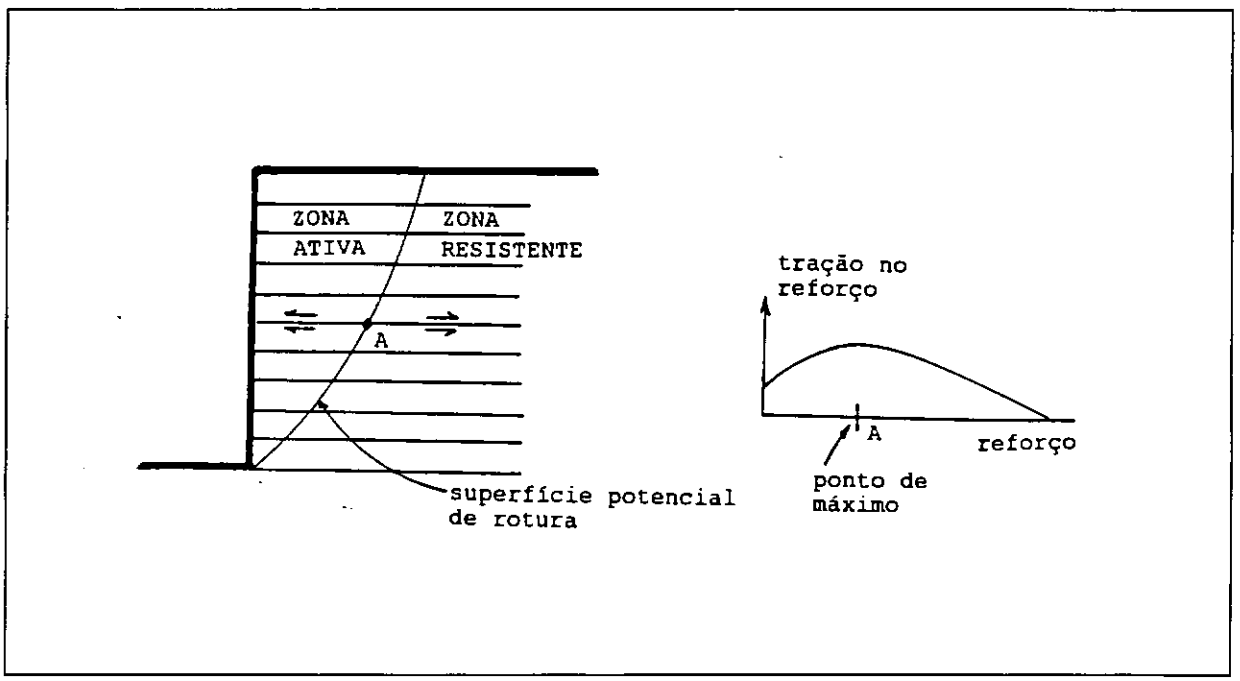


Fig. 1.7: zona ativa, resistente e ponto de máxima tração nos reforços

Referência: Ehrlich e Silva, 1992

Nos reforços flexíveis, normalmente utilizados nos muros de solo compactado reforçado, a tração predomina como fator estabilizador. Nos reforços mais rígidos a resistência à flexão e ao cisalhamento são também importantes, figura 1.8.

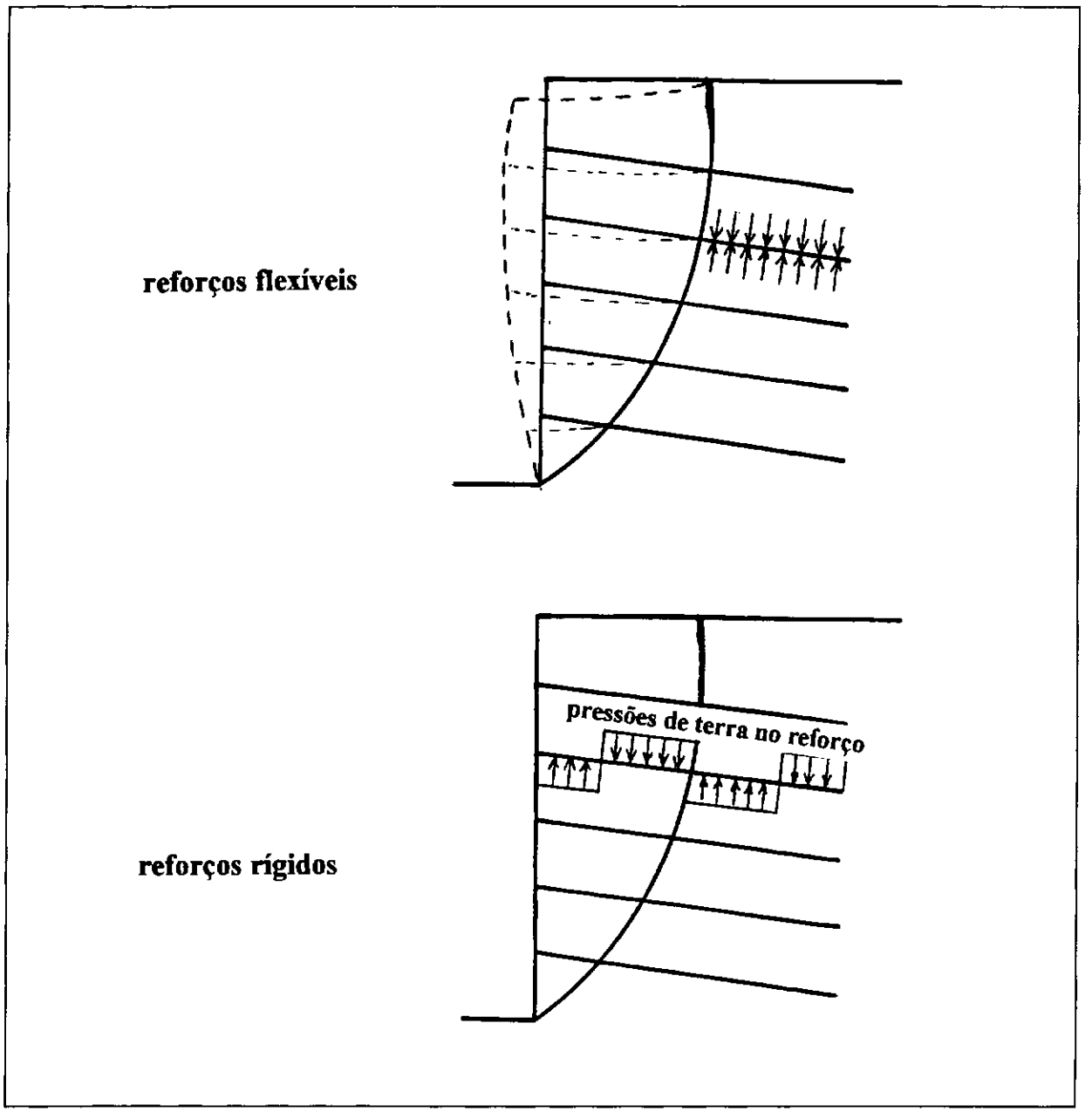


Fig. 1.8: efeito da flexibilidade dos reforços

Referência: Mitchell e Villet, 1987

As tensões nos reforços são função das tensões no solo e estas dependem daquelas. A rigidez do reforço, quanto à deformação por tração e a compactação no solo, são fatores de importância nas tensões atuantes nos reforços e no solo reforçado, EHRLICH e MITCHELL (1994).

1.5 - FILOSOFIA DE PROJETO

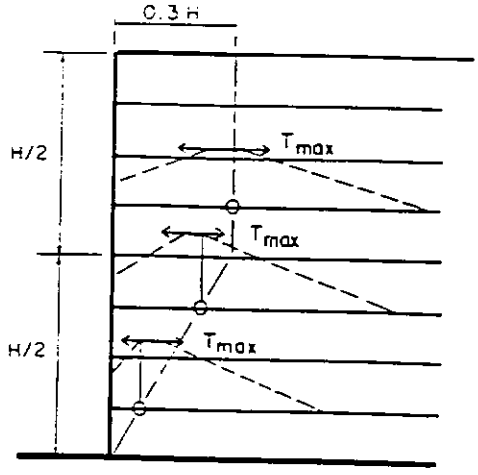
O projeto deve ser encaminhado de forma a garantir a estabilidade interna e externa. Em se tratando da estabilidade interna o projeto deve garantir segurança quanto à rotura e arrancamento dos reforços. Procedimentos para dimensionamento de sistemas de solo reforçado são descritos em MITCHELL e VILLET (1987) e CHRISTOPHER et al. (1990).

Os muros de solo reforçado são projetados utilizando os mesmos critérios de estabilidade externa dos muros convencionais. Faz-se necessária uma análise quanto ao tombamento, deslizamento, capacidade de carga das fundações, além da estabilidade externa global. Os critérios convencionais têm se mostrado adequados a esta parte do projeto.

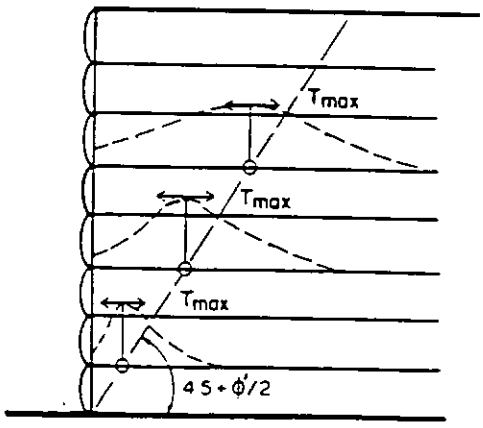
EHRLICH e MITCHELL (1990) apresentam um método, com base analítica, para projeto e análise de estabilidade interna de estruturas de solo reforçado. Esta metodologia, que pode ser aplicada de maneira geral, leva explicitamente em consideração a influência da rigidez do reforço e da compactação nas tensões atuantes no solo e no reforço.

A determinação da máxima tensão atuante nos reforços é um dos aspectos de maior importância nesta parte do projeto, a densidade e o comprimento dos reforços é função desta tensão. No dimensionamento da seção de reforços deve-se levar em consideração uma possível deterioração dos mesmos com o tempo. No caso de reforços metálicos o aço galvanizado tem sido extensivamente utilizado. O projeto é conduzido de forma a ter-se garantida uma seção mínima após o tempo definido como a vida útil da obra.

O comprimento dos reforços é estabelecido levando-se em consideração a estabilidade interna e externa; normalmente esse comprimento varia entre 60 e 80% da altura do muro. Os reforços devem ter embutimento suficiente na zona resistente de forma a evitar-se o arrancamento. Na figura 1.9 apresentam-se hipóteses usualmente consideradas com relação à forma da superfície potencial de rotura.



(a) Reforços Metálicos



(b) Geotêxteis e Geogrelhas

Fig. 1.9: superfície potencial de rotura e tensão máxima nos reforços

Referência: Ehrlich e Silva, 1992

CORROSÃO DOS REFORÇOS METÁLICOS

Capítulo 2

2.1 - INTRODUÇÃO

Como apresentado anteriormente, uma grande variedade de elementos são utilizados como reforços de solo, dentre eles, os reforços metálicos.

Estes materiais apresentam características favoráveis ao uso como reforço, dentre elas: sua elevada resistência à tração, elevado módulo de deformação, baixa susceptibilidade à fluência, alto grau de interação com o solo envolvente, durabilidade e resistência a esforços de instalação na obra. Um dos aspectos desfavoráveis diz respeito à corrosão, onde é comum a utilização de uma proteção galvânica sobre o aço, bem como o superdimensionamento desses elementos metálicos para compensar a perda da seção com o tempo.

Considera-se que os solos com uma certa percentagem de finos provocam um processo de corrosão mais acelerado nos reforços metálicos. Na presente pesquisa, envolvendo quatro diferentes solos tropicais com finos, teve-se a indicação de que no caso destes tipos de solos estas especificações são extremamente rigorosas. Estas especificações, DARBIN, JAILLOUX E MONTUELLE (1978), estão baseadas em estudos envolvendo solos de regiões temperadas.

Discutir-se-ão a seguir, de forma ampla, os processos que envolvem a corrosão metálica, centrando-se após, os aspectos particulares dos elementos enterrados.

2.2 - CORROSÃO

2.2.1 - GENERALIDADES

Em geral, conforme DUTRA e NUNES (1987) os metais reagem com os elementos não metálicos presentes no meio, particularmente o oxigênio e o enxofre, produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos. Conclui-se, portanto, que nesses casos a corrosão corresponde ao inverso dos processos metalúrgicos, como ilustrado na figura 2.1.

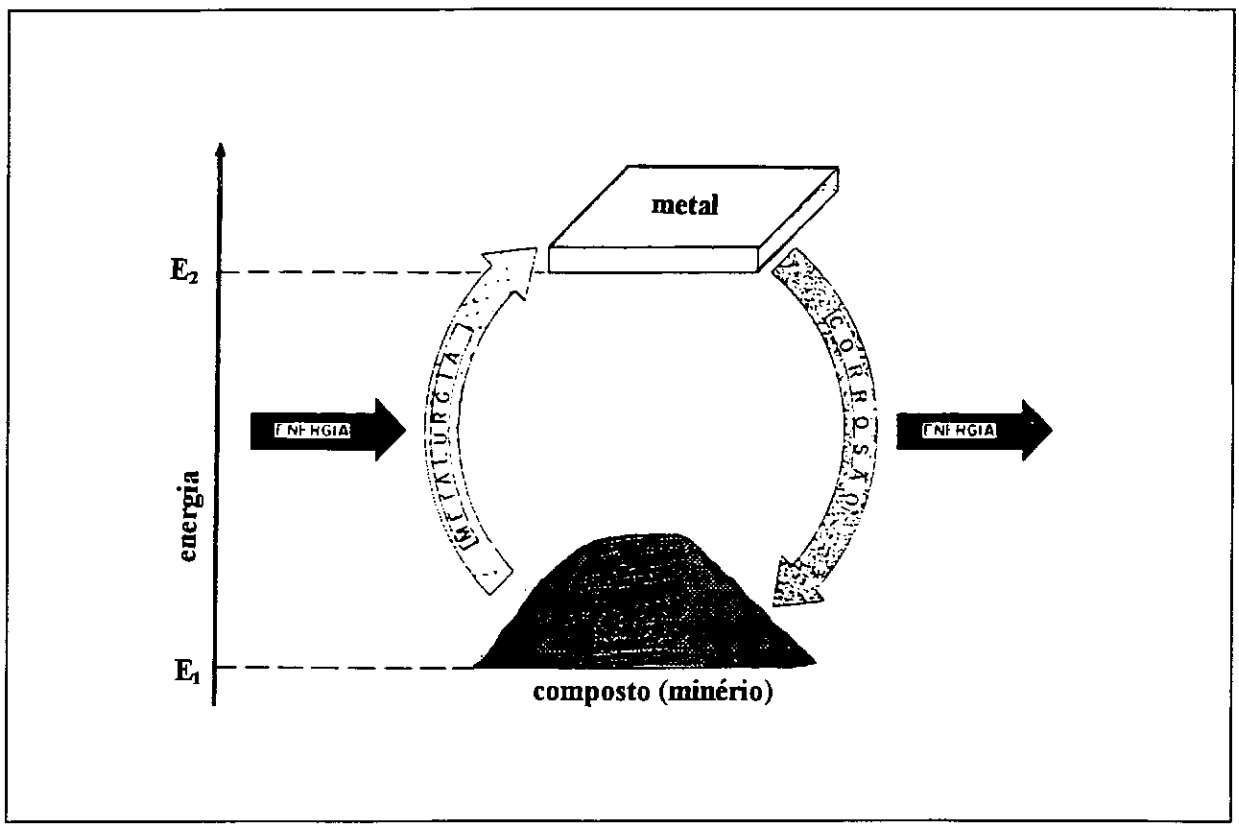


Fig. 2.1: o ciclo dos metais

Referência: Dutra e Nunes, 1987

A corrosão pode ser definida como sendo a deterioração de um material, na maioria das vezes metálico, por uma ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos.

CRAVO (1979) descreve a corrosão como sendo um fenômeno natural que altera o estado dos átomos metálicos e o meio que os rodeia a um nível mínimo de energia. Os processos de corrosão são reações que ocorrem na superfície do metal e obedecem a princípios bem estabelecidos. Na corrosão os átomos do metal passam de um estado elétrico neutro ao estado iônico; simultaneamente ocorre transformação de matéria e transferência de cargas elétricas.

Segundo GENTIL (1982) sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que sua durabilidade e desempenho deixam de satisfazer os fins a que se destinam. Se não fossem utilizados mecanismos protetores haveria a destruição total dos materiais metálicos. Esse fenômeno assume grande importância na vida moderna, que não pode prescindir dos metais e suas ligas.

Quando se avalia a estabilidade de um material, deve-se considerar as possíveis variações em composição e na estrutura interna durante serviço. Um material estável seria aquele que pudesse subsistir em vários ambientes sem sofrer alterações de ordem químicas ou estruturais.

SEBRÃO (1992) afirma que a corrosão de estruturas metálicas em contato com o solo sempre foi um sério problema de engenharia, quer sob os aspectos técnicos como econômicos. Aos custos diretos, decorrentes dos reaterros e da aplicação de sistemas anticorrosivos, devem ser acrescidos outros indiretos, provavelmente muito maiores. Dentre eles pode-se citar o superdimensionamento desnecessário das estruturas enterradas e a utilização de materiais mais nobres e caros por desconhecimento da magnitude real dos fenômenos de corrosão.

Na figura 2.2 apresenta-se esquematicamente o mecanismo de crescimento de uma película de ferrugem segundo SILVA (1981).

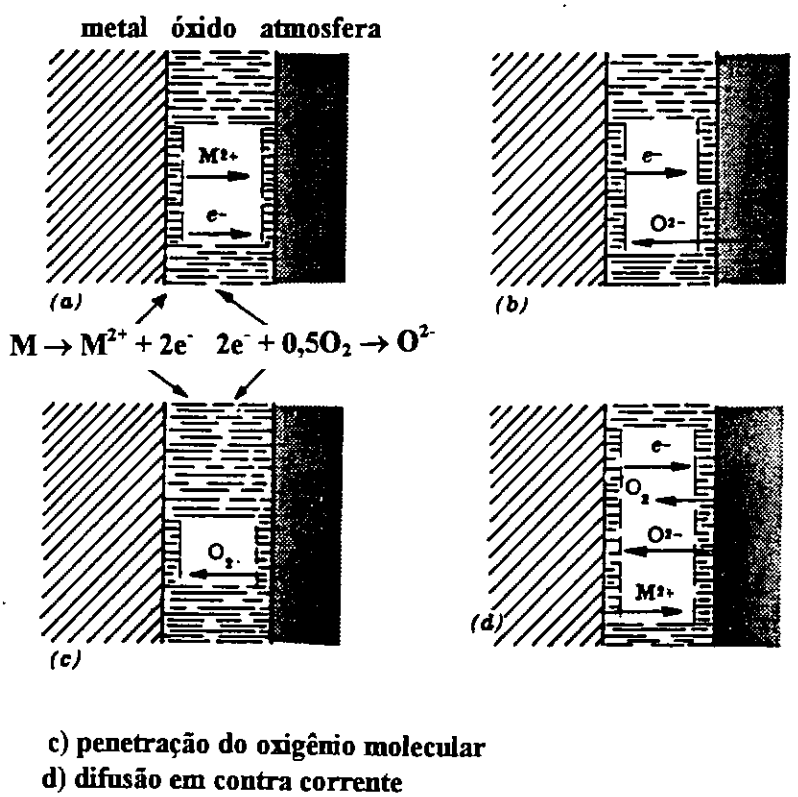


Fig. 2.2: crescimento da película de ferrugem

Referência: Silva, 1981

2.2.2 - CORROSÃO ELETROQUÍMICA

O tipo mais comum de corrosão envolve um processo de oxidação eletroquímica. Rigorosamente falando, a oxidação é a remoção de elétrons de um átomo. Por exemplo, a expressão 2.1 representa a oxidação do ferro para íons ferrosos e a expressão 2.2 mostra a oxidação de íons ferrosos a férricos.

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \quad (2.1)$$

$$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^- \quad (2.2)$$

Essa combinação de reação química e perda de elétrons permite que se suceda uma outra reação que leva à formação de ferrugem. A ferrugem é o hidróxido férrico e se forma de acordo com a seguinte expressão 2.3, global,

$$4Fe + 3O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 \quad (2.3)$$

Neste processo, as expressão 2.1 e 2.2 devem ocorrer e tanto o oxigênio como a umidade devem estar presentes. O ferro não enferrujará em uma atmosfera seca ou sem oxigênio. Entretanto, na prática, a quantidade de umidade necessária para que a expressão 2.3 se desenvolva pode ser surpreendentemente baixa.

O potencial de oxidação varia de metal para metal, função da energia necessária para a remoção de elétrons.

O processo de corrosão do aço no solo é um fenômeno eletroquímico tal qual o que ocorre com qualquer outro metal em um ambiente agressivo. SERRA (1992) afirma que para que ocorra corrosão do aço há necessidade da presença dos quatro elementos presentes numa pilha eletroquímica: uma região anódica onde se desenvolvem as reações de oxidação, uma região catódica na qual ocorrem as reações de redução, um condutor metálico entre as regiões anódicas e catódicas e um eletrólito. Extraindo-se um desses componentes desabilita-se a pilha e, conseqüentemente, o processo de corrosão. Pode-se retirar o catodo, a ligação metálica ou o eletrólito. A própria estrutura metálica que se deseja proteger representa o anodo, portanto não pode ser removida.

A reação que ocorre na região anódica, expressão 2.1, corresponde à oxidação do ferro, enquanto que na região catódica ocorre a redução do oxigênio segundo a expressão 2.4,

$$2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH \quad (2.4)$$

O produto de corrosão é inicialmente o $Fe(OH)_2$, hidróxido de ferro II, que posteriormente, em função do teor de oxigênio presente, transforma-se em Fe_3O_4 de coloração preta ou esverdeada, característico da baixa aeração ou em $Fe_2O_3.nH_2O$ que representa uma coloração castanho alaranjada, predominantes nos meios aerados.

A figura 2.3 representa uma pilha de corrosão do aço imerso no solo.

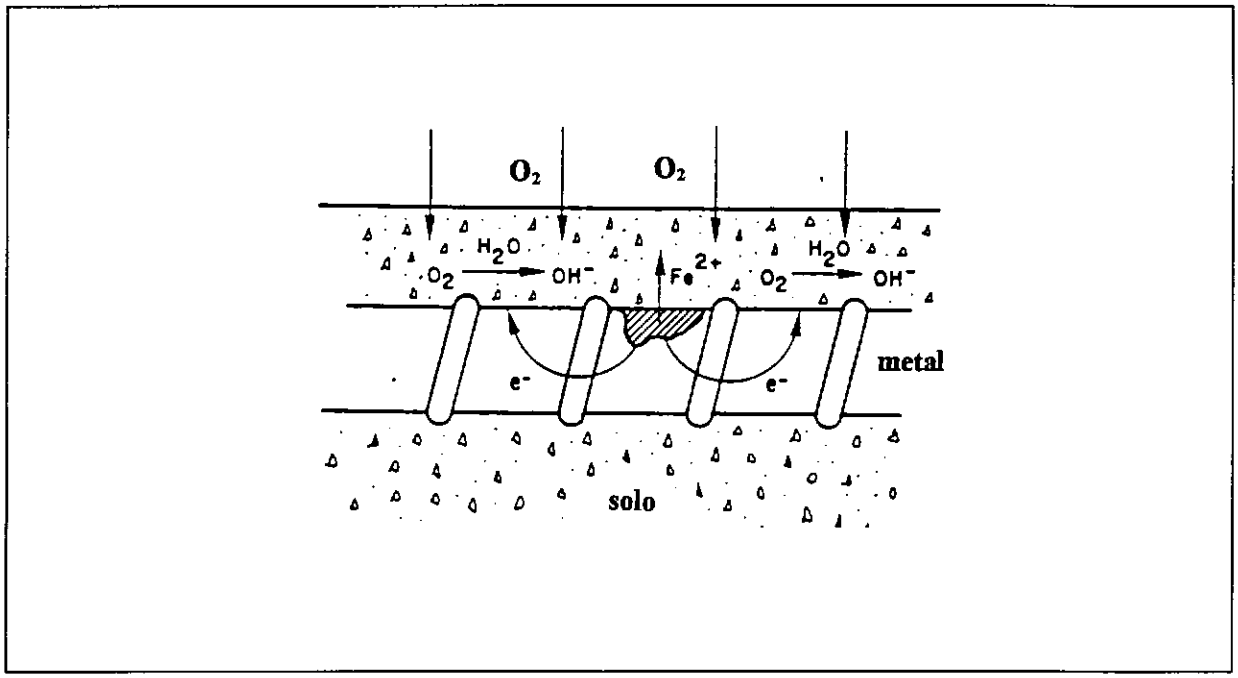


Fig. 2.3: pilha de corrosão do aço imerso no solo

Referência: Serra, 1982

2.2.3 - FORMAS DE CORROSÃO

A corrosão ocorre, principalmente, na superfície de separação entre o metal e o meio corrosivo. A "contaminação" pode apresentar-se das mais variadas formas, função dos inúmeros aspectos envolvidos. Para controle, cada tipo de contaminação exige um sistema próprio de proteção.

Descreve-se, a seguir, algumas formas mais comuns de apresentação de processos corrosivos (figura 2.4).

corrosão uniforme: a corrosão se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura. É também conhecida por corrosão generalizada.

corrosão por placas: a corrosão se localiza em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com sulcos.

corrosão alveolar: a corrosão se processa na superfície metálica produzindo sulcos semelhantes a alvéolos. Estes sulcos apresentam fundo arredondado e profundidade menor que o seu diâmetro.

corrosão puntiforme: a corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior que o seu diâmetro. É também conhecida por corrosão por pite ou por pitting.

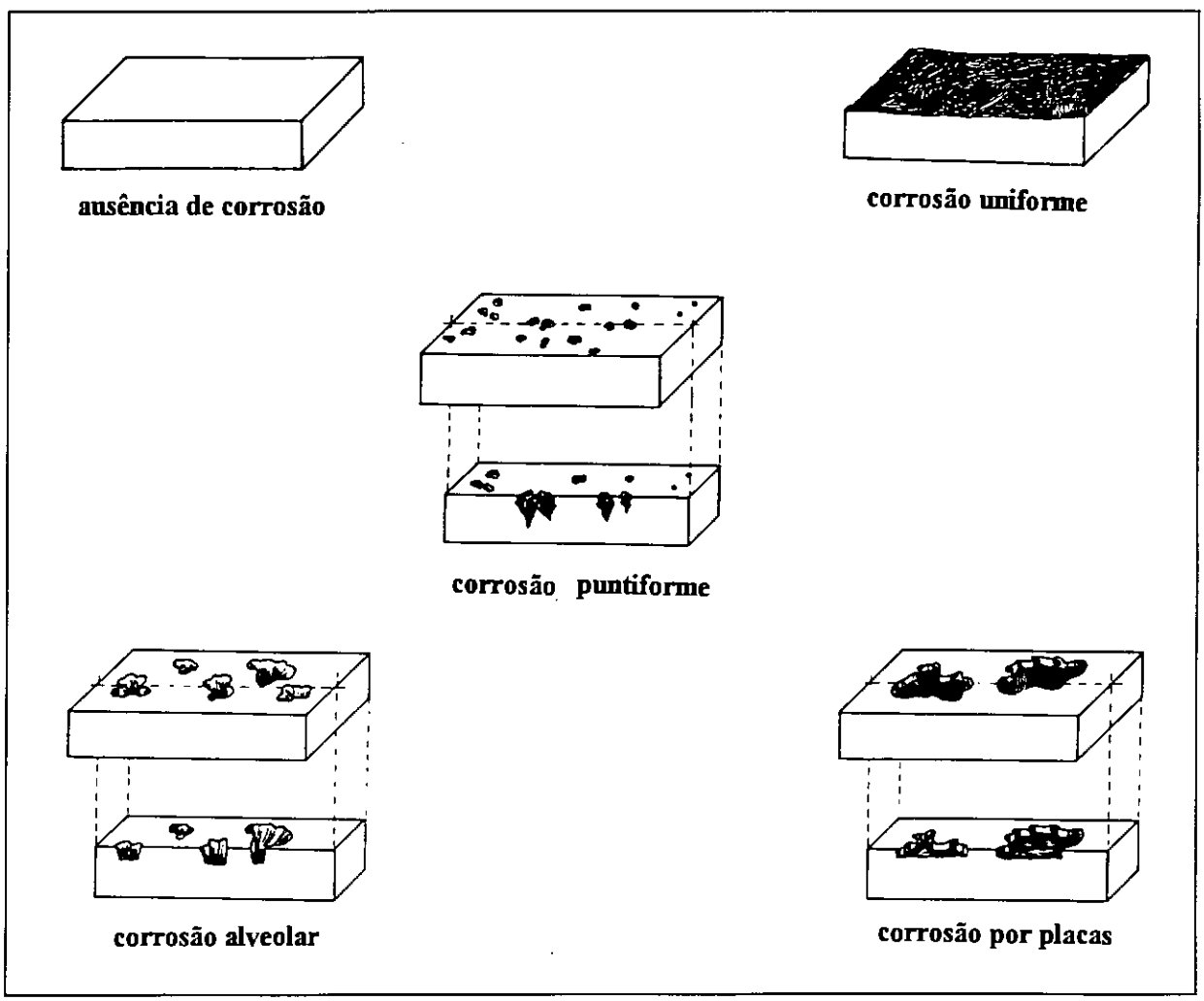


Fig. 2.4: formas de corrosão

Referência: Gentil, 1982

2.2.4 - POLARIZAÇÃO

A corrosão de um metal depende das características do meio que o envolve e do potencial eletroquímico em que se encontra. Controlando o potencial do metal e o pH da solução é possível impedir que a transferência dos elétrons se processe no sentido da expressão 2.5 e portanto impedir a corrosão, podendo até inverter-se o seu sentido. Um exemplo prático desta reversão é a deposição de revestimentos metálicos por eletrólise.

$$Me \rightarrow Me^{2+} + 2e^{-} \qquad (2.5)$$

Quando um metal está imerso numa solução aquosa ocorrem uma infinidade de reações. Considere a figura 2.5, onde esquematicamente apresenta-se um pedaço de ferro imerso em água de distribuição.

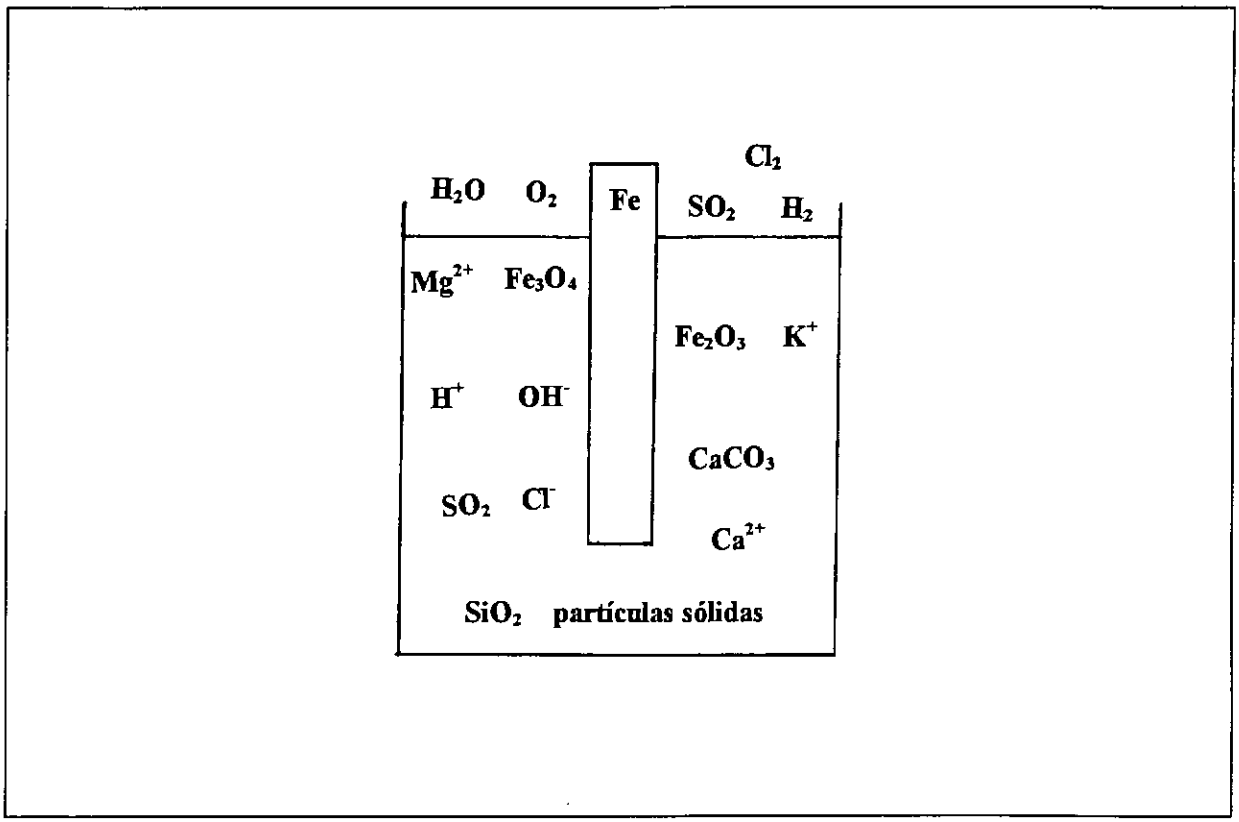


Fig. 2.5: ferro imerso em água de distribuição

Desenho do Autor

Nesta figura pode-se observar:

corpos sólidos: Fe, Fe_2O_3, Fe_3O_4, $CaCO_3$, $MgSO_4$, SiO_2, etc.

corpos dissolvidos: H^+, OH^-, Ca^{2-}, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}, Cl^-, H_2O, etc.

corpos gasosos: H_2O, O_2, H_2, Cl_2, SO_2, etc.

Assim sendo, o estudo cartesiano de todos os equilíbrios possíveis entre estas espécies se torna muito complexo, quando não impossível.

Foi Pourbaix, em 1948, que criou um sistema simplificado de representação gráfica dos equilíbrios químicos e eletroquímicos que possibilitou uma análise sistemática de situações como a representada na figura 2.6. Esse procedimento é capaz de prever as condições sob as quais pode-se ter corrosão, imunidade e passivação, a partir de considerações de ordem termodinâmica sobre a possibilidade ou impossibilidade de formação de compostos conhecidos e definidos nas condições acima descritas.

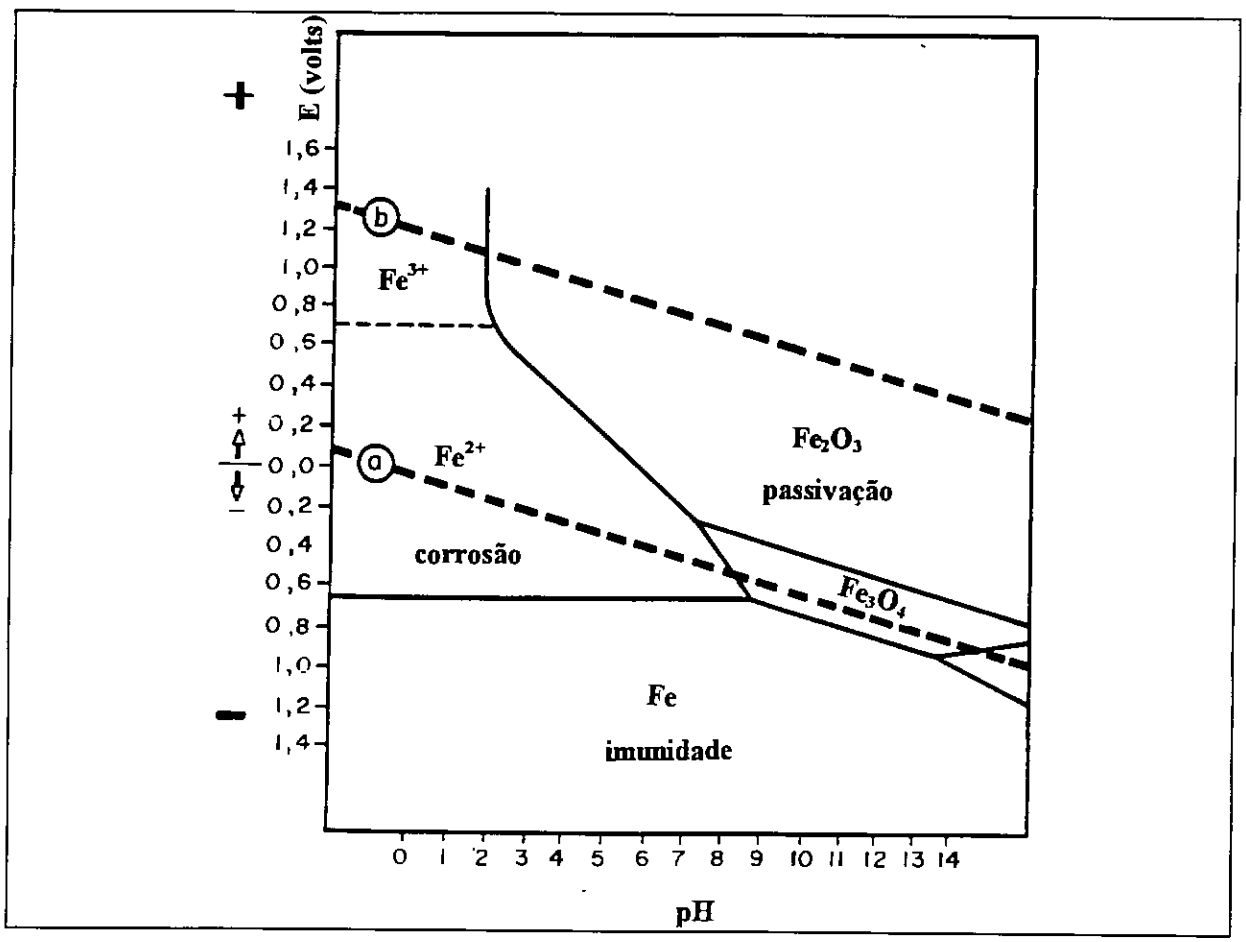


Fig. 2.6: diagrama de Pourbaix (equilíbrio para o sistema ferro/água a 25^{0}C)

Referência: Pourbaix, 1987

Na condição dita de corrosão o processo corrosivo se desenvolverá no sentido da expressão 2.1. Na condição de passivação o processo é possível, mas improvável, por se formarem camadas protetoras de óxidos, por exemplo, o Fe_2O_3. Este, quando se desenvolve, pode provocar o aparecimento de pites. Já na condição de imunidade o processo é impossível, pelas condições não propiciarem a perda de elétrons do átomo do metal, isto é, no sentido contrário da expressão 2.1.

GENTIL (1982) afirma que os diagramas de Pourbaix representam os vários equilíbrios químicos e eletroquímicos que podem existir entre o metal e o eletrólito líquido. Como representam condições de equilíbrio, não podem ser usados para prever velocidades de reações de corrosão.

A figura 2.6 representa o diagrama de Pourbaix para o sistema $|\mathbf{Fe - H_2O}|$, a 25^0C e 1 atm onde se observa as circunstâncias de formação dos óxidos Fe_2O_3 e Fe_3O_4, bem como as regiões de estabilidade das formas iônicas (dissolvidas) possíveis de serem formadas.

A título de exemplificação, consideremos o equilíbrio entre o Fe e o óxido de ferro, Fe_2O_3, expressão 2.6,

$$\mathbf{2Fe + 3H_2O = Fe_2O_3 + 6H^+ + 6e^-} \qquad \mathbf{(2.6)}$$

Assim escrita, a expressão 2.6 nos indica que a transformação $Fe \rightarrow Fe_2O_3$ envolve $6H^+$ e $6e^-$ ou seja, a transformação dependerá tanto do pH (influência dos H^+) quanto do potencial eletroquímico, E, (influência dos e^-). Por esta razão é que os eixos do diagrama de Pourbaix são E e pH. Neste caso, o equilíbrio Fe/ Fe_2O_3 obedece à seguinte expressão 2.7, onde E_0 é o potencial de equilíbrio,

$$\mathbf{E_0 = - 0{,}075 - 0{,}0591\ pH} \qquad \mathbf{(2.7)}$$

Consideremos, agora, um sistema simples como o da figura 2.7 onde uma amostra de zinco está imersa numa solução aquosa contendo seus próprios íons, como a de $ZnSO_4$.

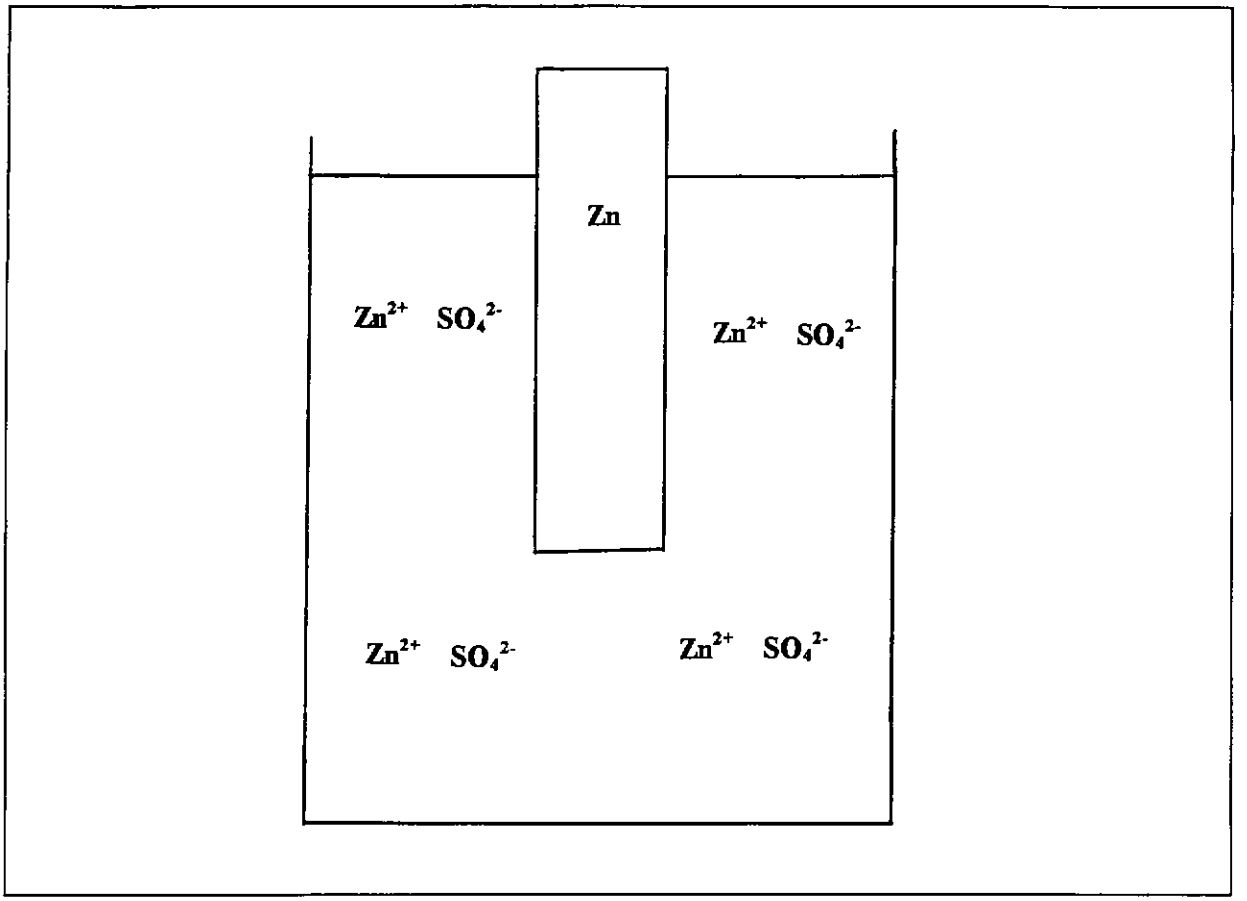


Fig. 2.7: amostra de zinco imersa em solução contendo íons Zn

Desenho do Autor

Nestas condições o equilíbrio entre o Zn e os íons Zn^{2+} se escreve da seguinte maneira, (expressão 2.8),

$$Zn = Zn^{2+} + 2e^- \quad (2.8)$$

A condição de equilíbrio nestes sistemas obedece à Lei de Nernst, ou potencial de dissolução sólido/íon do mesmo nome. No caso presente, representada pela expressão 2.9, onde

$$E_0 = -0{,}758 + 0{,}0295 \log (Zn^{2+}) \quad (2.9)$$

E_0 está expresso em volts em relação ao eletrodo normal de hidrogênio e Zn^{2+} em ionsgrama por litro. Esta relação conduz aos seguintes valores (tabela 2.1) de potencial de equilíbrio da reação para diferentes atividades do zinco em solução,

$\log (Zn^{2+})$	E_0
0	-0,758
-2	-0,817
-4	-0,876
-6	-0,935

Tab. 2.1: valores do potencial de equilíbrio da expressão 2.9 para diferentes Zn^{2+}

Portanto, no caso do zinco em equilíbrio com uma solução perfeita que contém 0,01 ionsgrama de Zn/l (636 mg Zn/l), o zinco apresenta um potencial E igual ao potencial de equilíbrio E_0 da reação (-0,817V, em relação ao eletrodo normal de hidrogênio), nesta condição a reação não ocorrerá nem num sentido nem no outro, não se desenvolvendo nem corrosão nem eletrodeposição do metal.

Suponhamos agora que, sem que nada modifique o potencial de equilíbrio, E_0, da reação, o potencial do zinco se eleve, por uma razão qualquer, do valor de equilíbrio, -0,817 V e atinja, por exemplo, - 0,758 V; o sistema não mais estará em equilíbrio e a expressão 2.10 se dará no sentido da busca de uma nova condição de estabilidade,

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^- \text{ (corrosão do Zn - oxidação)} \qquad (2.10)$$

De igual maneira, se por qualquer circunstância o potencial do metal diminuir abaixo do potencial de equilíbrio, -0,876 V , a expressão 2.11 tenderá a ocorrer no sentido contrário de 2.10,

$$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn \text{ (depósito de Zn eletrolítico - redução)} \qquad (2.11)$$

Outro exemplo: se está em contato o ferro com uma solução que contém íons ferrosos, a condição de equilíbrio da reação $Fe = Fe^{2+} + 2e^-$, é a 25^0C, $E_0 = - 0,441 + 0,0295 \log (Fe^{2+})$. No caso de uma solução contendo 10^{-6} ionsgrama de Fe/l o potencial de equilíbrio é representado pela expressão 2.12,

$$E_0 = -0,441 + 0,0295 \times (-6) = - 0,62 \text{ V} \quad (2.12)$$

Assim, se E for superior a - 0,62 V, a expressão 2.13 ocorrerá no sentido,

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \text{ (corrosão do ferro - oxidação)} \quad (2.13)$$

Se E for inferior a -0,62 V, a expressão 2.14 se processará no sentido contrário de 2.13,

$$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe \text{ (eletrodeposição do ferro - redução)} \quad (2.14)$$

Deste procedimento pode-se concluir que:

Quando o potencial E de um eletrodo for superior (mais positivo) ao potencial de equilíbrio E_0 de uma reação, esta reação não poderá ocorrer em outro sentido que não o da oxidação.

Quando o potencial E de um eletrodo for inferior (mais negativo) ao potencial de equilíbrio E_0, a reação não poderá ocorrer em outro sentido que não o da redução.

Resumindo:

Se $E > E_0$, possibilidade de oxidação, ou seja, corrosão

Se $E < E_0$, possibilidade de redução, ou seja, deposição

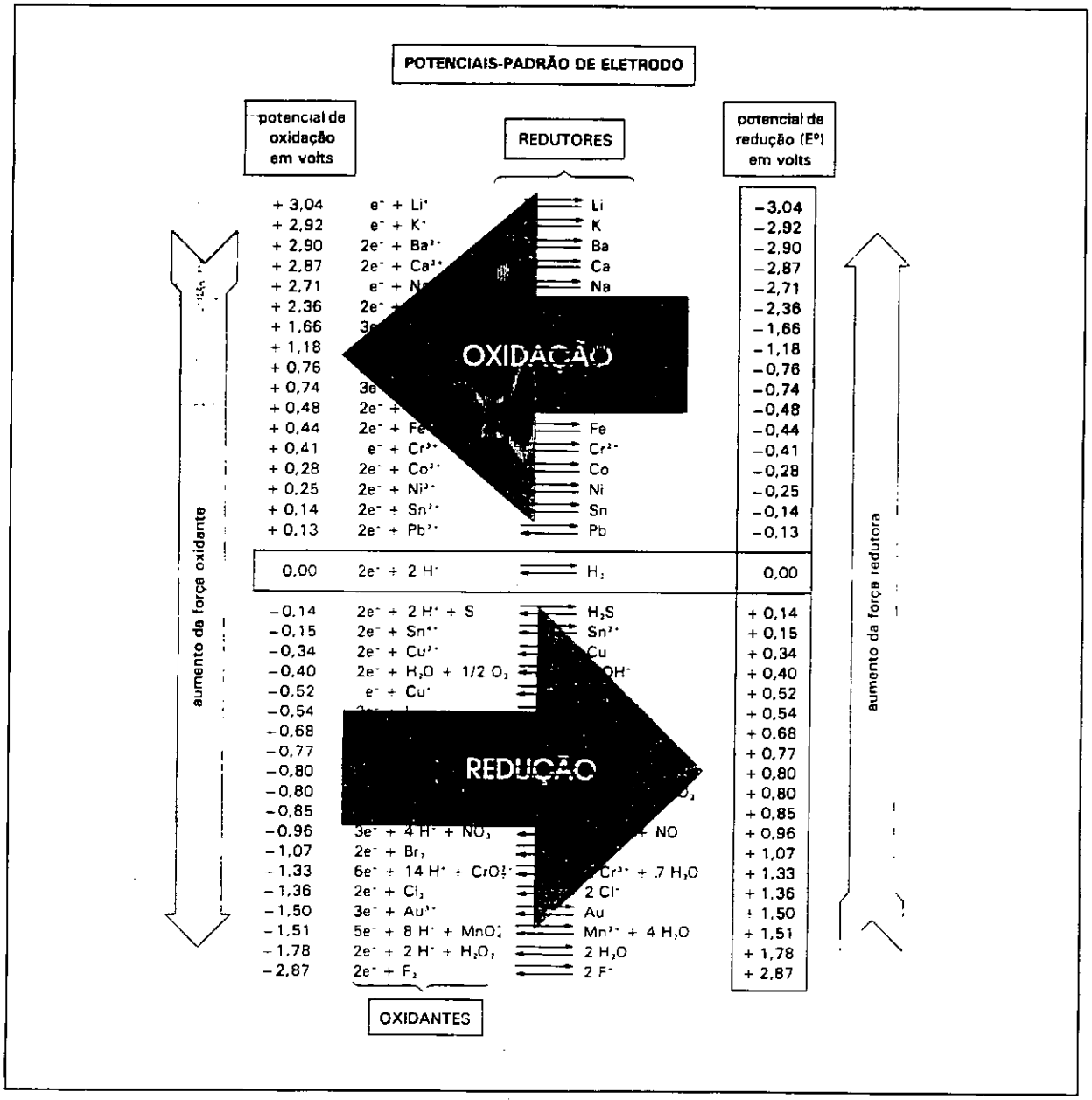
Segundo GENTIL (1982), um fator de importância na corrosão resultante do contato entre metais diferentes, é o valor da diferença de potencial entre estes. Um metal acoplado a outro metal, próximo a ele na tabela de potenciais, será corroído mais lentamente que quando

ligado a um outro mais afastado. Assim, o zinco unido ao ferro será corroído mais lentamente do que se unido ao cobre, de acordo com as diferenças de potenciais,(expressões 2.15 e 2.16),

$$Zn - Fe: +0{,}323\ V \qquad (2.15)$$

$$Zn - Cu: +1{,}1\ V \qquad (2.16)$$

A seguir apresenta-se a tabela 2.2 de potenciais eletroquímicos de diversos metais.



Tab. 2.2: tabela de potenciais eletroquímicos

Referência: Gentil, 1982

De uma outra maneira, GENTIL (1982) explica que todo metal imerso em uma solução contendo seus próprios íons, na ausência de reações que interfiram, possui um potencial E_0. Se uma corrente circular por esse eletrodo, o potencial variará, e o novo valor de potencial E' dependerá da corrente aplicada. A diferença entre os dois potenciais, expressão 2.17, é conhecida como sobretensão η, onde,

$$\eta = E' - E_0 \qquad (2.17)$$

Pode ocorrer que o potencial inicial seja diferente do potencial de equilíbrio termodinâmico devido a reações e fenômenos que interferem no processo. Este é o caso mais comum, sendo o valor conhecido como potencial de corrosão. O potencial de eletrodo também varia ao circular uma corrente pelo eletrodo, sendo esta variação conhecida como polarização.

Quando dois metais diferentes são ligados e mergulhados em um eletrólito estabelece-se uma diferença de potencial entre os eletrodos resultantes. Fechando-se o circuito externo observa-se uma diminuição dessa diferença de potencial com o tempo. O potencial do anodo se aproxima ao do catodo e o do catodo se aproxima do anodo. Tem-se o que se chama de polarização dos eletrodos: polarização anódica no anodo e polarização catódica no catodo.

Ainda segundo GENTIL (1982), se um metal se encontra no potencial de equilíbrio termodinâmico haverá uma troca de íons entre o metal e a solução, porém, sem passagem de corrente em nenhuma das duas direções. Quando o potencial varia, o valor da sobretensão criada define o comportamento do metal. Se a sobretensão criada for positiva circulará pela interface metal-solução uma corrente positiva (corrente anódica) e o metal se corroerá através de uma reação de oxidação. Se a sobretensão for negativa, isto é, $E' < E_0$, uma corrente catódica se estabelecerá e ter-se-á uma reação de redução.

Entre os numerosos métodos de estudo da corrosão eletroquímica aqueles que se baseiam na medição e avaliação da sobretensão ocupam lugar de destaque. Esses métodos consistem em realizar uma eletrólise, onde se utilizam, como eletrodo e eletrólito, respectivamente, o metal e o meio cuja interação se deseja estudar. O ensaio pode ser conduzido a potenciais de eletrodo controlados (neste caso medindo-se os valores de corrente em função do potencial aplicado), ou então a corrente de eletrólise controlada (anotando-se os valores de potencial em função de corrente). Representando-se graficamente a relação $E = f(I)$

ou I = f(E), entre o potencial de eletrodo e a corrente de eletrólise, obtém-se uma curva de polarização.

SCHWERDTFEGER et al (1952) propuseram um método de determinação da corrente de corrosão I_c, baseados na observação das curvas de polarização anódica e catódica do metal no solo. O método consistia na determinação das correntes que produziam mudanças de inclinação nas curvas de polarização, conforme a figura 2.8.

A corrente de corrosão I_c seria calculada a partir da expressão 2.18,

$$I_c = I_p x I_q / (I_p + I_q) \qquad (2.18)$$

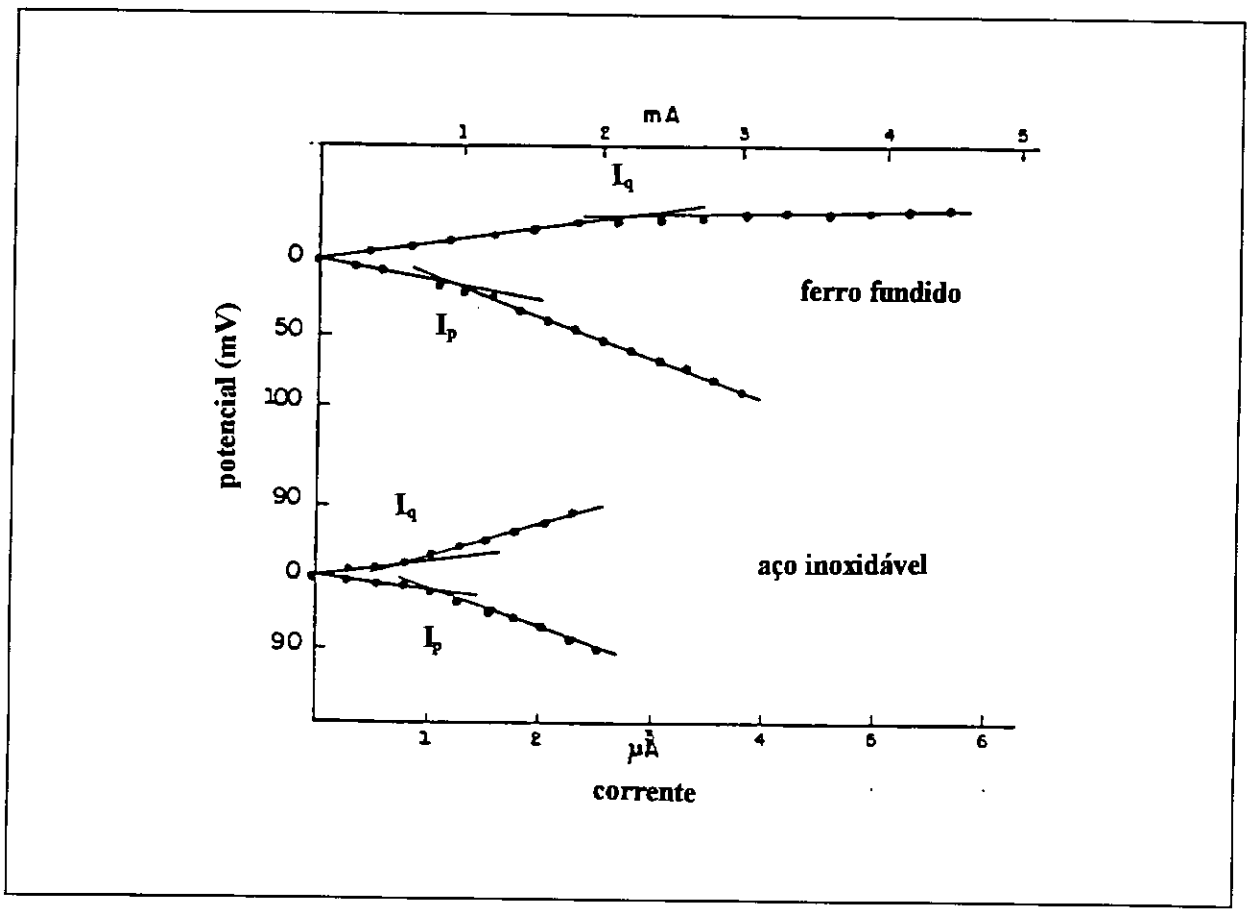


Fig. 2.8: curvas de polarização para o ferro fundido e para o aço inoxidável

Referência: Schwerdtfeger et al, 1952

onde I_p e I_q correspondem respectivamente às correntes anódicas e catódicas onde ocorrem as mudanças de inclinação nas curvas de polarização.

Este método, apesar da dificuldade e da incerteza na determinação das correntes I_p e I_q, foi utilizado em diversos estudos de corrosão pelo solo desenvolvidos no National Bureau of Standards dos EEUU.

SERRA et al (1979) realizaram uma avaliação dos métodos de medida de taxa instantânea de corrosão denominados de resistência de polarização, de dois eletrodos e de três pontos, com relação a sua aplicabilidade à estimativa da agressividade dos solos. Os seus métodos eletroquímicos de medida da taxa instantânea de corrosão possuem a vantagem de não produzir alterações significativas no estado superficial das amostras ou nas características do meio próximo à amostra. Da comparação entre a perda de peso real das amostras e a perda do peso calculada pela Lei de Faraday utilizando-se as correntes de corrosão, concluiu-se que os métodos de resistência de polarização e dos três pontos se mostravam adequados à avaliação de taxa de corrosão de metais enterrados.

2.3 - CORROSÃO PELO SOLO

O fato de as estruturas metálicas enterradas estarem sujeitas à corrosão sempre foi um complicado e dispendioso problema de engenharia. As estatísticas referentes aos custos da corrosão pelo solo também são poucas, porém, existe uma concordância de que a corrosão dos elementos metálicos que envolvem o sistema solo-metal é responsável por uma enorme parcela dos custos globais de uma obra de engenharia.

A figura 2.9 mostra o mecanismo da formação da corrosão por pite em um reforço metálico imerso no solo.

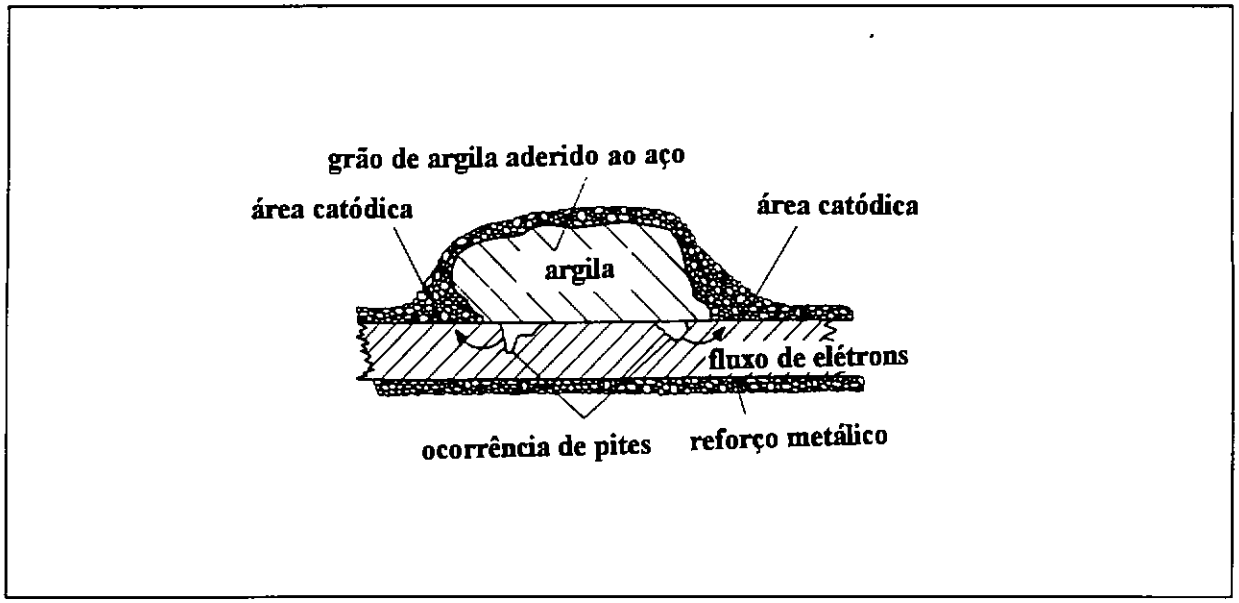


Fig. 2.9: mecanismo, envolvendo solo, da corrosão por pite em reforços metálicos

Referência: Blight e Dane, 1989

A figura 2.10 mostra o detalhe do local onde se dá o início da corrosão pelo solo.

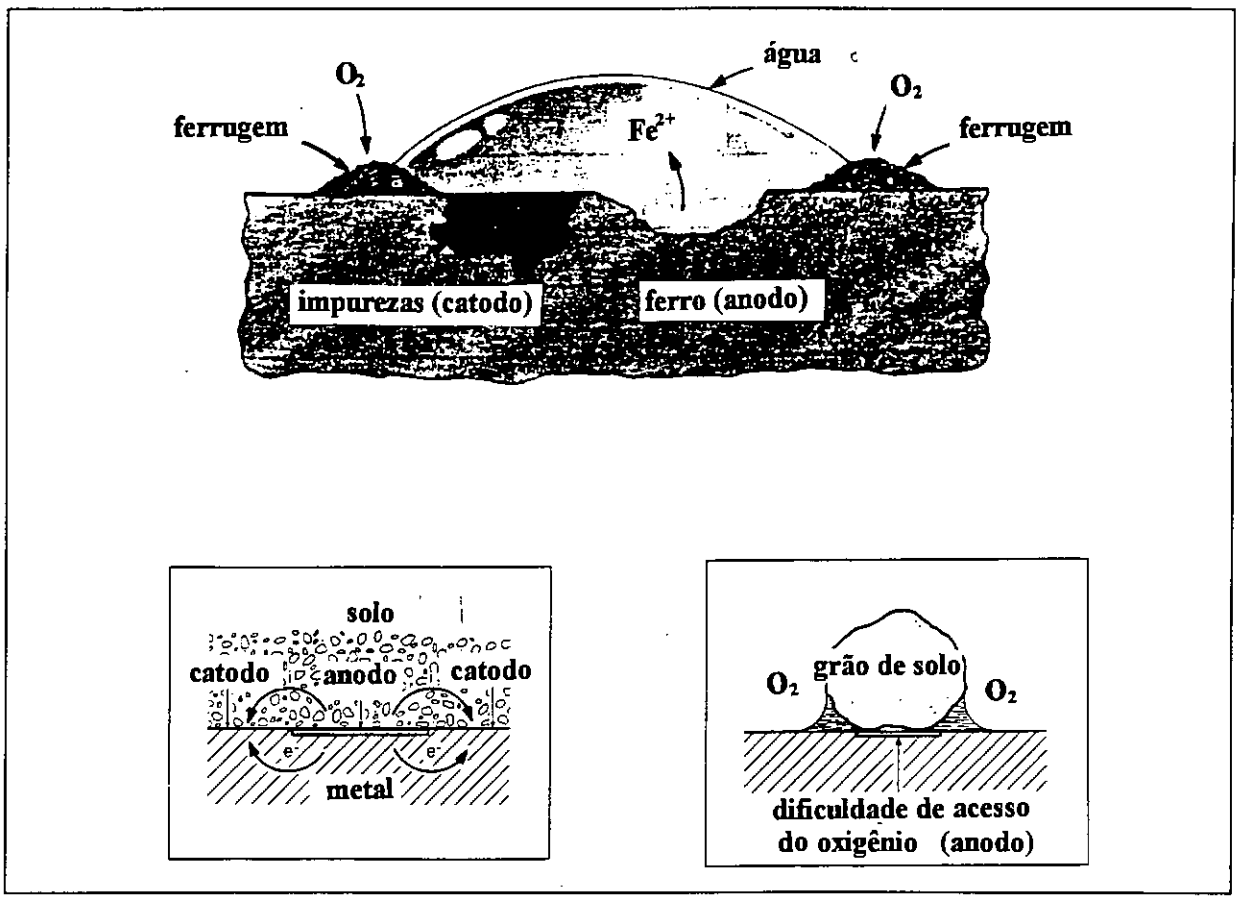


Fig. 2.10: o detalhe da corrosão pelo solo

Referência: Darbin, Jailloux e Montuelle, 1978

A maioria dos solos são constituídos de uma mistura de materiais inertes onde suas características em um determinado local estão diretamente relacionadas com o material de origem, o clima, a topografia, enfim, com todos os fatores que contribuíram para o desenvolvimento do solo.

SERRA (1982) afirma que as características físico-químicas de um determinado solo são fundamentais para a sua classificação como elemento potencializador da corrosão.

SILVA (1981) descreve os fatores dos quais dependem as propriedades corrosivas dos solos. São eles:

acidez do solo: em solos ácidos o mecanismo de corrosão será idêntico àquele de desprendimento de hidrogênio onde a velocidade vai depender, principalmente, do pH do solo e da presença de sais. A presença de oxigênio acelera a corrosão, pois este age como despolarizante catódico, facilitando o desprendimento gasoso.

resistividade elétrica do solo: a resistividade é função da presença de umidade, de água e de sais solúveis no solo. Solos com baixa resistividade (portanto bons condutores), entre 10 e 2000 ohm.cm são fortemente agressivos. Solos com resistividade acima de 2000 ohm.cm são fracamente agressivos.

natureza da textura do solo: a textura influi decisivamente no poder corrosivo do solo. Em terrenos arenosos, muito porosos e portanto muito aerados, o metal sofrerá a corrosão como se estivesse exposto à atmosfera. Em terrenos argilosos, que retém a umidade por muito tempo, a corrosão será a mesma que sofrerá o metal mergulhado numa solução eletrolítica. Estes solos são considerados mais agressivos.

Discute-se a seguir, com maior profundidade, cada um dos fatores anteriormente citados:

a) acidez do solo

Grande é a quantidade de elementos químicos existentes nos solos, em sua maioria formando compostos pouco solúveis e que portanto não atuam diretamente no processo de corrosão. A análise química dos solos está limitada, nos estudos de corrosão, à determinação dos componentes solúveis em água nas condições normais, principalmente os formadores de ácidos, isto é, os cloretos, Cl^-, e os sulfatos, SO_4^{2-}, dentre outros íons de menor importância.

A presença de íons cloretos e sulfatos em um determinado solo indica diretamente a sua relação com a agressividade. Esses íons são os mais prejudiciais ao sistema aço-solo no que diz respeito ao aspecto corrosivo.

Deve-se considerar também que, em locais onde ocorrem precipitações elevadas a remoção parcial dos íons básicos provoca um aumento da acidez dos solos. Essa acidez ou alcalinidade é verificada a partir da concentração de íons de hidrogênio e expressa sob a forma de pH.

Em se tratando de solos residuais das regiões de clima tropical não é possível definir uma faixa limite de valores de pH, cloretos e sulfatos, pois, estes dependem de diversos fatores, dentre eles a composição mineralógica da rocha de origem, do clima, da lixiviação, da ação do homem, etc. Também não existe um estudo estatístico, para solos residuais tropicais, como o da tabela 2.3 que se refere a estudos de solos temperados.

Na tabela 2.3, segundo DARBIN, JAILLOUX E MONTUELLE (1978), apresentam-se resultados de observações de 46 obras em solo reforçado construídas depois de 1968 e em utilização após 10 anos. Os muros foram reforçados com tiras metálicas de aço galvanizado. Tais estudos visavam identificar o ambiente geoquímico ideal para este tipo de solução, objetivando o controle da corrosão. Ficou evidenciado que os locais nos quais a corrosão foi mais intensa estavam relacionados a ambientes muito oxidantes e à elevada presença de cloretos e sulfatos.

pH	%
pH < 5	1,0
5 < pH < 6	1,0
6 < pH < 8,5	96,1
pH > 8,5	1,9

CLORETOS	%
Cl < 10 ppm	80,7
10 < Cl < 50 ppm	14,0
50 < Cl < 100 ppm	1,9
100 < ppm < 200 ppm	1,0
Cl > 200 ppm	2,4

Tab. 2.3: resultados estatísticos de diferentes solos utilizados em obras de solo reforçado

SULFATOS (medidos como SO_3)	%
$SO_3 < 50$ ppm	72,0
$50 < SO_3 < 200$ ppm	16,9
$200 < SO_3 < 500$ ppm	4,8
$500 < SO_3 < 1000$ ppm	3,4
$SO_3 > 1000$ ppm	2,9

Tab. 2.3: resultados estatísticos de diferentes solos utilizados em obras de solo reforçado

MITCHELL E VILLET (1987) definiram, a partir desses estudos, o seguinte padrão para obras de solo reforçado com elementos metálicos, como apresentado na tabela 2.4.

$4,5 < pH < 9,5$
cloretos < 200 ppm
sulfatos < 1000 ppm

Tab. 2.4: limites recomendados para obras em solo reforçado

b) resistividade elétrica do solo

Quanto à resistividade elétrica verifica-se que esta pode estar relacionada com a presença de resíduos de vegetação e matéria orgânica, comumente encontradas em solos sedimentares localizados em vales e cursos de rios. Já os solos com alta resistividade elétrica são característicos de regiões áridas e sem vegetação. São também fatores de importância na resistividade a presença de água, a natureza e a quantidade de sais solúveis.

Novamente, em se tratando de solos residuais das regiões de clima tropical, não é possível definir uma faixa limite de valores de resistividade elétrica, pois, como visto para cloretos, sulfatos e pH, esta depende de diversos fatores, dentre eles a composição mineralógica da rocha de origem, do clima, da lixiviação, etc. Também não existe um estudo

estatístico, para solos residuais tropicais, como o da tabela 2.5 que se refere a estudos de solos temperados.

Na tabela 2.5, segundo DARBIN, JAILLOUX E MONTUELLE (1978), apresentam-se resultados de observações de 46 obras em solo reforçado construídas depois de 1968 e em utilização após 10 anos, referidas anteriormente.

RESISTIVIDADE DOS SOLOS SATURADOS	%
$\rho > 10000$ ohm.cm	47,6
$5000 < \rho < 10000$ ohm.cm	23,7
$3000 < \rho < 5000$ ohm.cm	14,0
$1000 < \rho < 3000$ ohm.cm	11,6
$\rho < 1000$ ohm.cm	2,9

Tab. 2.5: resultados estatísticos de diferentes solos utilizados em obras de solo reforçado

MITCHELL E VILLET (1987) definiram, a partir desses estudos, o seguinte padrão para obras de solo reforçado com elementos metálicos, como apresentado na tabela 2.6.

resistividade > 1000 ohm.cm

Tab. 2.6: limite recomendado para obras de solo reforçado

c) textura do solo

Quanto à textura do solo tem-se que o arranjo granulométrico bem como as dimensões das partículas afetam a permeabilidade ao ar e à água que são de grande importância no processo de corrosão dos elementos metálicos que envolvem o sistema aço-solo.

A distribuição granulométrica é determinante na condição natural de aeração e umidade do solo. Solos arenosos possuem baixa capacidade de retenção da água, baixa plasticidade e facilitam uma boa aeração. Já os solos ricos em finos apresentam uma elevada capacidade de retenção da água e plasticidade, bem como um baixo grau de aeração.

Diversos autores têm contestado a aplicabilidade dos procedimentos convencionais de análise granulométrica aos solos residuais. Questiona-se que os resultados obtidos não expressam a realidade do comportamento no campo.

TAYLOR (1948) ressalta que uma das características dos solos residuais é o fato de sua granulometria ser indefinida, isto é, sendo o material parcialmente desintegrado, a granulometria dependerá da energia e do tempo de peneiramento.

VARGAS (1971) diz que por causa da maior ou menor quantidade de glóbulos de microcristais coloidais, presentes nos solos residuais, provenientes dos ciclos climáticos sucessivos de secagem e umedecimento, é muito difícil executar ensaios livres de críticas.

MELLO (1972) alerta que tais ensaios são úteis para caracterização de solos que foram erodidos, transportados e sedimentados e não para solos residuais cujo comportamento pode ser bastante dominado pelo arranjo inerente à nucleação dos grãos.

MENDOZA (1985) realizou estudos muito interessantes onde se verifica a grande variação dos limites de consistência em função das energia empregada para homogeneização da amostra ou devido ao processo de secagem prévia do material. Estes estudos demonstram que os resultados de ensaios de granulometria em solos residuais, feitos de acordo com as normas convencionais, têm valores simplesmente comparativos, não podendo ser tomados como valores absolutos e independentes da forma com que foi conduzido o ensaio. Tal, por si só, já representa uma dificuldade para o emprego das recomendações convencionais, quanto à granulometria, no caso de solos residuais.

CHRISTOPHER et al (1990) recomenda as seguintes características granulométricas para solos a serem utilizados em sistemas de solo reforçado com elementos metálicos como apresentado na tabela 2.7.

PENEIRA	MATERIAL PASSANDO (%)
N° 4 - (4,76 mm)	100
N° 40 - (0,420 mm)	0 - 60
N° 200 - (0,074 mm)	0 - 15

Tab. 2.7: limites recomendados para obras em solo reforçado com elementos metálicos

A seguir apresentaremos alguns outros estudos que correlacionam as propriedades físico-químicas e a corrosividade dos solos:

TRABANELLI et al (1972) apresentam uma relação de índices parciais atribuídos ao solo e relativos à sua agressividade. Esses índices parciais são compostos de modo a fornecer o índice total de agressividade como mostrado na tabela 2.8.

RESISTIVIDADE (ohm.cm)	
PARÂMETROS DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL
> 12000	0
12000 A 5000	-2
5000 A 2000	-1
< 2000	-4

E redox (mV/ENH)	
PARÂMETRO DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL
> 400	+2
400 a 200	0
200 a 0	-2
< 0	-4

pH	
PARÂMETRO DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL
> 5	0
< 5	-1

UMIDADE (%)	
PARÂMETRO DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL
< 20	0
> 20	-1

Cl^- (mg/kg)	
PARÂMETRO DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL
< 100	
100 a 1000	-1
> 1000	-4

SO_4^{2-} (mg/kg)	
PARÂMETRO DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL
< 200	0
200 a 300	-1
> 300	-2

S^{2-} (mg/kg)	
PARÂMETRO DO SOLO	ÍNDICE PARCIAL
ausente	0
< 0,5	-2
> 0,5	-4

CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	ÍNDICE TOTAL DE AGRESSIVIDADE
NÃO AGRESSIVO	0
LIGEIRAMENTE AGRESSIVO	-1 A -8
MEDIANAMENTE AGRESSIVO	-8 A -10
MUITO AGRESSIVO	< -10

Tab. 2.8: índice total de agressividade dos solos

KING (1977) apresenta os seguintes estudos, conforme a tabela 2.9, de corrosão para aço doce e aço galvanizado:

PROPRIEDADES DO SOLO		MATERIAL	
		AÇO DOCE	AÇO GALVANIZADO
RESISTIVIDADE (ohm.cm)	< 700	****	***
	700 - 4000	***	***
	> 4000	*	*
POTENCIAL DE OXI-REDUÇÃO	> 400	*	*
	200 - 400	**	**
	< 200	****	****
UMIDADE (%)	> 80	**	**
	10 - 80	***	***
	< 10	*	*
SAIS DISSOLVIDOS		***	***
CLORETOS		***	***
pH	< 6	***	****
	6 - 8	*	*
	> 8	**	***
ÁCIDOS ORGÂNICOS		***	***

Tab. 2.9: corrosão em aço doce e aço galvanizado

*** - geralmente não afetado neste ambiente**

**** - apenas ligeiramente afetado**

***** - afetado**

****** - visivelmente afetado**

TOMASHOV E MIKHAILOVSKY (1959) citam que de uma forma geral os solos com baixa resistividade elétrica são mais agressivos e que propriedades e características atuam de uma forma conjunta. A análise isolada de uma ou outra propriedade do solo pode, portanto, mascarar a caracterização da sua agressividade.

ROMANHOFF (1957) apresenta a tabela 2.10 com os resultados de estudos de diversos solos onde se compara a corrosividade com a presença no solo de cloretos, sulfatos, resistividade e pH.

SOLO (tipo)	Cl (mg/100g de solo)	SO_4 (mg/100g de solo)	pH	RESISTIVIDADE (ohm.cm)	CORROSIVIDADE (10=a mais corrosiva)
SILTE ORGÂNICO	1,12	5,57	9,4	278	1
ARGILA COLOIDAL	0,99	0,89	6,8	408	2
ORGÂNICO MOLE	1,69	2,30	4,2	1270	3
ÁLCALINO NÃO IDENTIFICADO	0,18	11,98	7,4	263	4
ARGILA ORGÂNICA	0,01	4,43	7,6	350	5
TURFA	2,27	2,13	6,8	880	6
ORGÂNICO	-	-	4,5	5980	7
ORGÂNICO ARENOSO	-	-	4,5	11200	8
AREIA FINA	-	-	4,7	30500	9
ORGÂNICO ARENOSO	-	-	5,9	45000	10
SILTE ORGÂNICO	0,03	0,12	7,3	2980	11
ORGÂNICO COM PEDREGULHO	-	-	4,5	11400	12
SILTE ORGÂNICO NÃO IDENTIFICADO	0,06	0,45	7,5	1770	13

Tab. 2.10: corrosividade de diversos solos

ROMANHOFF (1957) apresenta um estudo comparativo de 24 solos relacionando a corrosividade com sua umidade, aeração e resistividade mostrado na tabela 2.11,

SOLO	UMIDADE (%)	AERAÇÃO	RESISTIVIDADE (ohm.cm)	CORROSIVIDADE (ordem decrescente)
s1	19,6	muito baixa	408	1
s2	ñ determ.	muito baixa	60	2
s3	12,2	razoável	3520	3
s4	22,2	baixa	6670	4
s5	31,0	baixa	970	5
s6	24,8	razoável	13700	6
s7	7,0	razoável	11200	7
s8	34,8	baixa	350	8
s9	31,3	boa	11000	9
s10	16,5	razoável	8290	10
s11	18,3	baixa	7440	11
s12	28,1	razoável	1320	12
s13	25,3	boa	1000	13
s14	29,9	boa	30000	14
s15	24,0	baixa	1500	15
s16	11,8	boa	5700	16
s17	26,3	razoável	1970	17
s18	35,2	baixa	684	18
s19	28,4	boa	5150	19
20	22,0	boa	1410	20
s21	18,6	razoável	1780	21
s22	36,4	baixa	2120	22
s23	14,9	boa	11200	23
s24	27,7	baixa	5980	24

Tab. 2.11: corrosividade de alguns solos

TRABANELLI (1972) apresenta a figura 2.11 onde, num gráfico, estão plotadas curvas que mostram a taxa de corrosão por pite em função do tempo para vários graus de aeração. Essa aeração influi na corrosão do metal não somente pela ação direta do oxigênio, mas também indiretamente, pela ação deste nos agentes orgânicos e nos microorganismos que provocam a corrosão microbiológica. A atividade desses organismos vivos pode ser um fator de importância no processo de deterioração do metal,

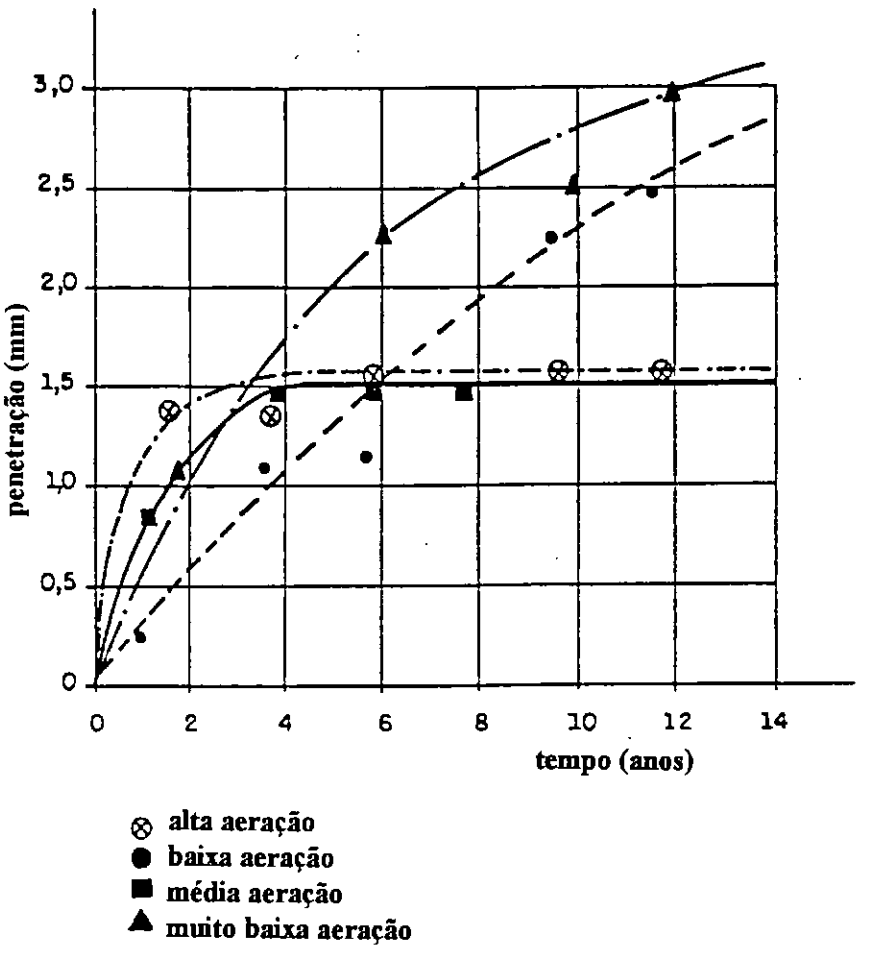


Fig. 2.11: efeito do grau de aeração do solo na profundidade do pite no aço

Referência: Trabanelli, 1972

KULLMAN (1978) apresenta os principais microorganismos que participam desse processo indireto de corrosão bem como suas características mais relevantes, conforme a tabela 2.12,

GRUPO E TIPO	EXIGÊNCIA DE OXIGÊNIO	COMPONENTES DO SOLO	PRINCIPAIS PRODUTOS	MEIOS DE PROLIFERAÇÃO	pH ADEQUADO PARA A REAÇÃO
I-redutores de sulfatos (Desulfovibrio de sulfuricans)	anaeróbico	sulfatos, tiosulfatos,sulfetos, enxofre, hiposulfetos	sulfeto de hidrogênio	água, lama, despejos sanitários, solos e concretos	ótimo: 6,0 - 7,5 limite : 5,0 - 9,0
II- oxidante de enxofre (Thiobacillus thioxidans)	anaeróbico	enxofres, sulfetos, tiosulfatos	ácido sulfúrico	solos contendo compostos de enxofre com oxidação incompleta	ótimo: 2,0 - 4,0 limite : 0,5 - 6,0
III- oxidante de tiosulfato (Thiobacillus thioparcis)	anaeróbico	tiosulfatos e enxofre	tiosulfato, parasulfato e enxofre	água do mar e de rio	ótimo: perto de 7,0 limite : 7,0 - 9,0
bactéria de ferro (Crenothrix and Leptothrix)	anaeróbico	carbonato de ferro e bicarbonato de ferro e manganês	hidróxido de ferro	águas estagnadas ou correntes que contenham sais de ferro e matéria orgânica	

Tab. 2.12: principais microorganismos corrosivos

ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Capítulo 3

3.1 - INTRODUÇÃO

Comparam-se nesta pesquisa três diferentes solos de origem residual, com finos, freqüentemente encontrados no Rio de Janeiro, com o que foi utilizado na construção de uma rampa de acesso em solo reforçado com elementos metálicos na 2ª fase da Linha Vermelha.

Foram efetuados estudos de identificação destes solos, ensaios de resistência mecânica e de corrosão.

3.2 - OS SOLOS ESTUDADOS

3.2.1 -DESCRIÇÃO

A partir de uma análise táctil-visual e estudos de Difração de Raios X os solos estudados foram descritos como a seguir:

SOLO A: coloração ocre-esbranquiçada, contendo grãos de quartzo e feldspato com dimensões maiores que 0,5 cm, dispostos numa matriz areno-argilosa predominantemente composta por quartzo, feldspato e mica na fração areia. A fração argilosa é caulinita e ilita. O solo é residual, provavelmente de origem granito-gnaissica. Quanto ao local de origem, profundidade de obtenção da amostra e tipo de horizonte nada se pode afirmar, a não ser que o material foi coletado no canteiro de obras da Linha Vermelha e sua procedência é de Niterói.

SOLO B: coloração ocre-amarelada, contendo fragmentos de quartzo de 0,3 a 0,5 cm, em pequena quantidade, envoltos numa matriz argilo-arenosa onde a fração argilosa é caulinita. Solo de origem residual procedente da BR-040/RJ, km 13 na altura de Campos

Elíseos. A amostra foi coletada em um corte no solo onde a parte superior se visualiza uma camada residual de argila amarela com espessura variando de 4 a 2 metros. A camada é originária da alteração da rocha mãe que localmente era uma associação de biotita-gnaisse com gnaisse granitóide de idade Pré-Cambriana e pertencente ao embasamento rochoso do chamado Complexo do Litoral Fluminense, PINTO (1988).

SOLO C: coloração ocre com manchas esbranquiçadas, composto por fragmentos de feldspato maiores que 0,5 cm, altamente impregnados por óxido de ferro, contendo ainda, em menores proporções, quartzo e muscovita. A fração argila contém ilita, caulinita e haloisita. Solo residual de origem granito-gnaissica proveniente da rua Licurgo, Madureira, RJ. O solo é proveniente de um escorregamento de uma zona de iluviação ou de deposição do material sólido carreado. A amostra foi coletada entre 70 e 100 cm da superfície, CLEMENTINO (1993).

SOLO D: coloração cinza-esbranquiçada, composto por fragmentos provavelmente oriundos da alteração de feldspato. Tais fragmentos encontram-se numa matriz arenosa composta de quartzo e feldspato, em igual proporção, e também biotita (já alterada) numa quantidade inferior aos anteriores. A fração argilosa contém ilita, caulinita e vermiculita. Solo residual de origem gnaissica (gnaisse-fecoidal) também proveniente do Parque Licurgo em Madureira. Solo proveniente de um escorregamento de uma zona reconhecida pela evidência da estrutura da rocha de origem, sendo o material do tipo solo mais predominante do que rocha (saprolito). A referida zona apresenta espessura que varia de um metro, no topo da encosta, até oito metros aproximadamente, na parte média da encosta e as amostras coletadas entre 70 e 100 cm da superfície, CLEMENTINO (1993).

3.2.2 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Estes estudos foram efetuados visando informações sobre a estrutura dos solos objeto desta pesquisa. De particular interesse é a forma da presença do óxido de ferro, com o objetivo de esclarecer se haveria ou não o cobrimento das partículas de argila pelo mesmo. O óxido de ferro, no entanto, apresentou-se sob a forma de grupos isolados. O cobrimento das partículas

poderia funcionar como uma espécie de isolante para o argilo-mineral quanto ao aspecto de sua influência no processo corrosivo.

As fotografias referentes aos solos residuais estudados estão apresentadas como a seguir onde pode ser verificada parte da sua microestrutura.

SOLO A:

Fotografia 3.1: predominância de feldspato (placas maiores de forma angulosa), presença de quartzo (partículas de forma mais arredondada), caulinita (partículas menores), haloisita (caulinita em forma tubular e com pouca quantidade); (ampliação de 1500 vezes).

Fotografia 3.2: muito semelhante à anterior onde se apresenta uma microestrutura também muito semelhante; (ampliação de 2000 vezes).

Fotografia 3.3: apresenta um grande grão de quartzo recoberto por caulinita. As placas ao fundo são feldspato; (ampliação de 1000 vezes).

SOLO B:

Fotografia 3.4: representa uma grande caulinita recoberta de caulinitas menores; (ampliação de 950 vezes).

Fotografia 3.5: muito semelhante à anterior, ou seja, uma caulinita; (ampliação de 460 vezes).

SOLO C:

Fotografia 3.6: representa uma haloisita tendo uma caulinita de cada lado (forma triangular) e diversos quartzos com dimensões menores (forma arredondada); (ampliação de 360 vezes).

Fotografia 3.7: grão de quartzo recoberto por haloisita; (ampliação de 2200 vezes).

SOLO D:

Fotografia 3.8: feldspato recoberto por caulinita; (ampliação de 1550 vezes).

Fotografia 3.9: placa de feldspato se alterando com um desplacamento que começa a ser observado; (ampliação de 500 vezes).

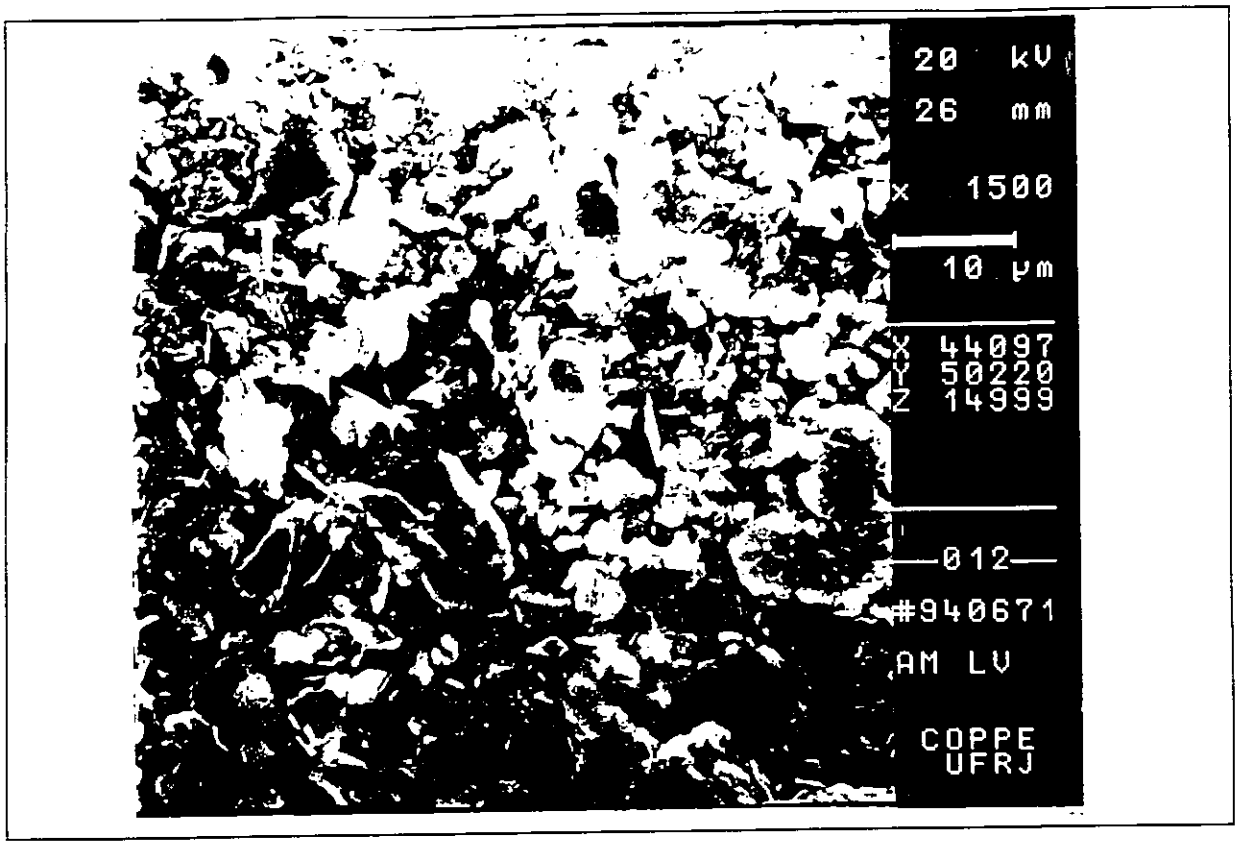


Foto. 3.1: microestrutura do solo A

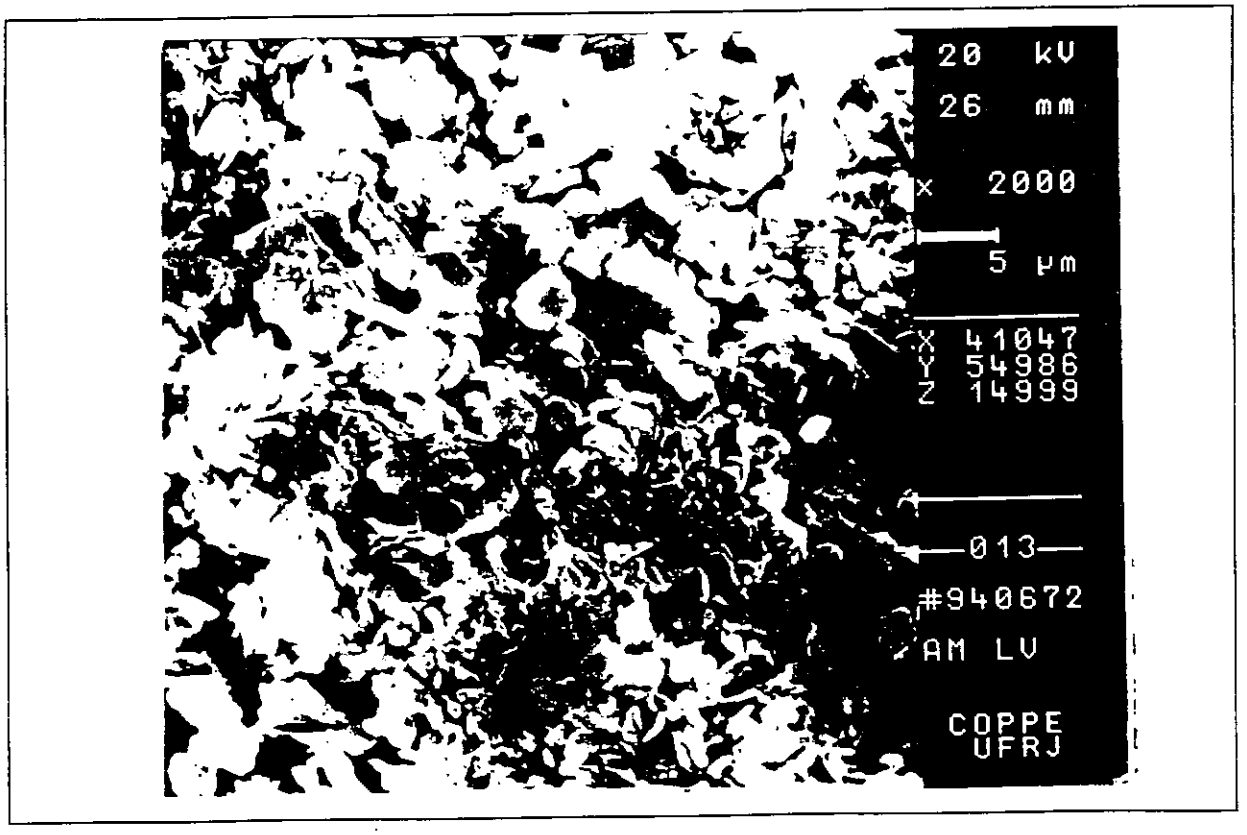


Foto. 3.2: microestrutura do solo A

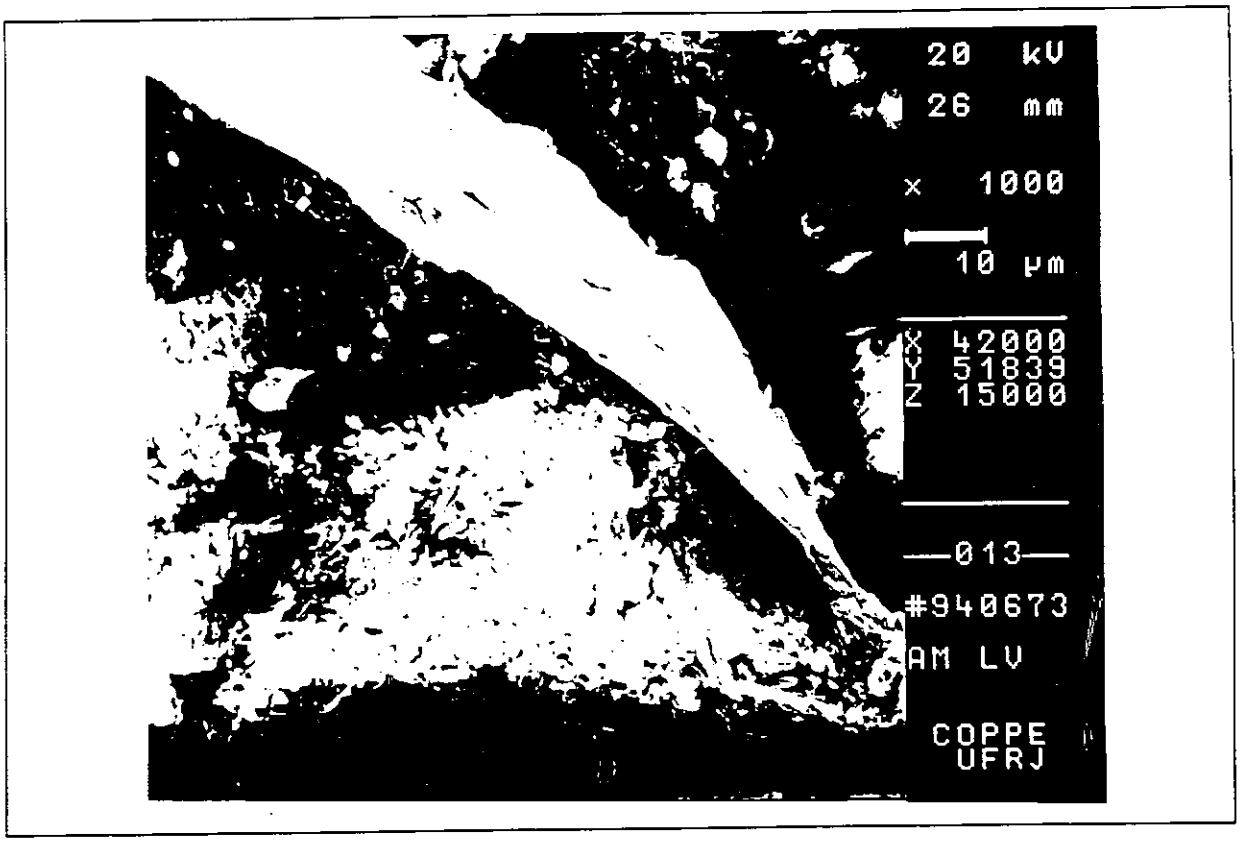
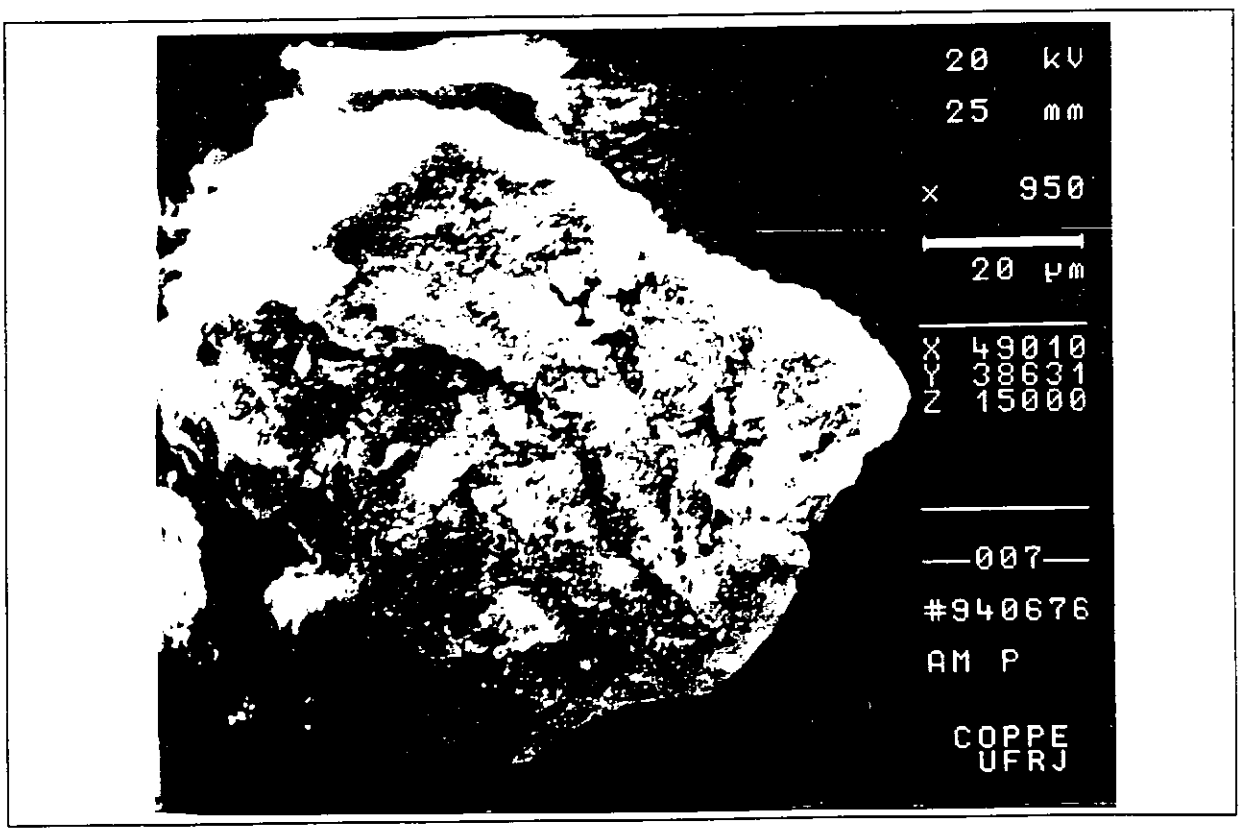
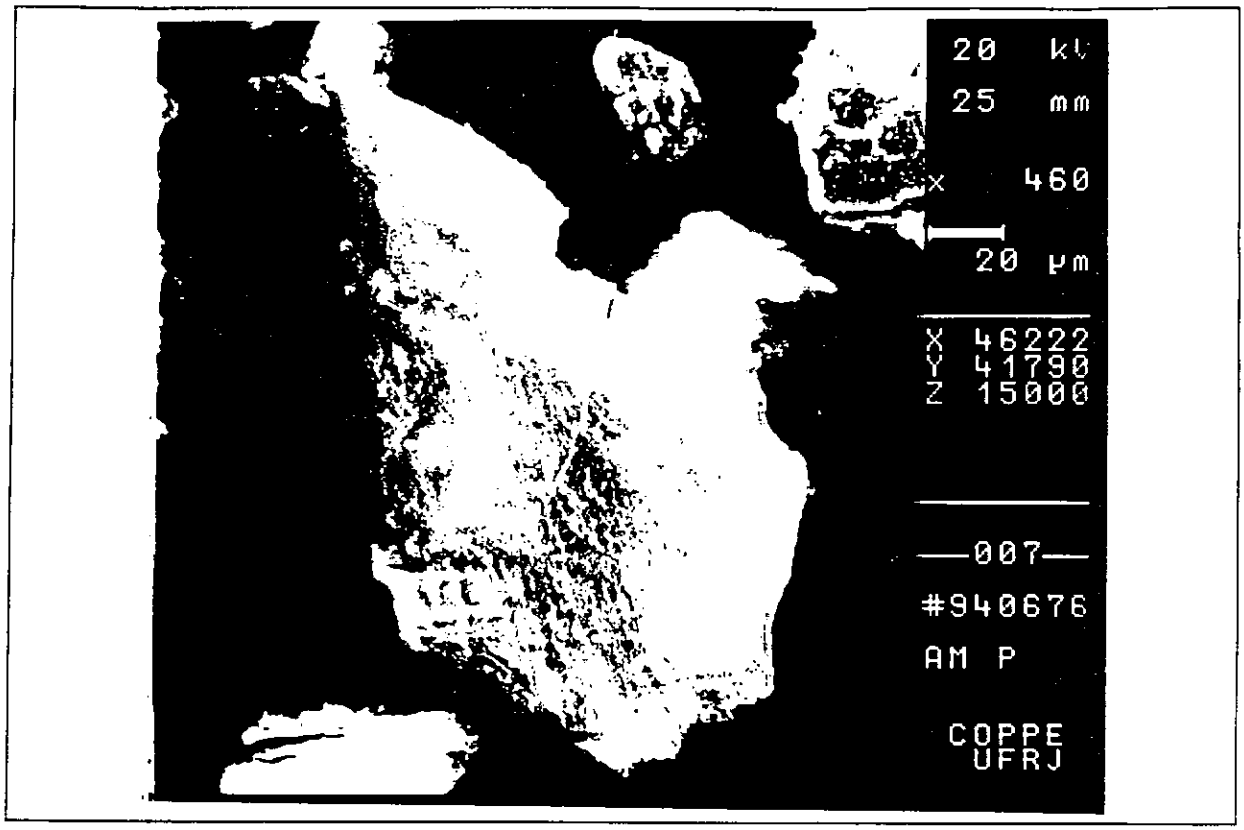


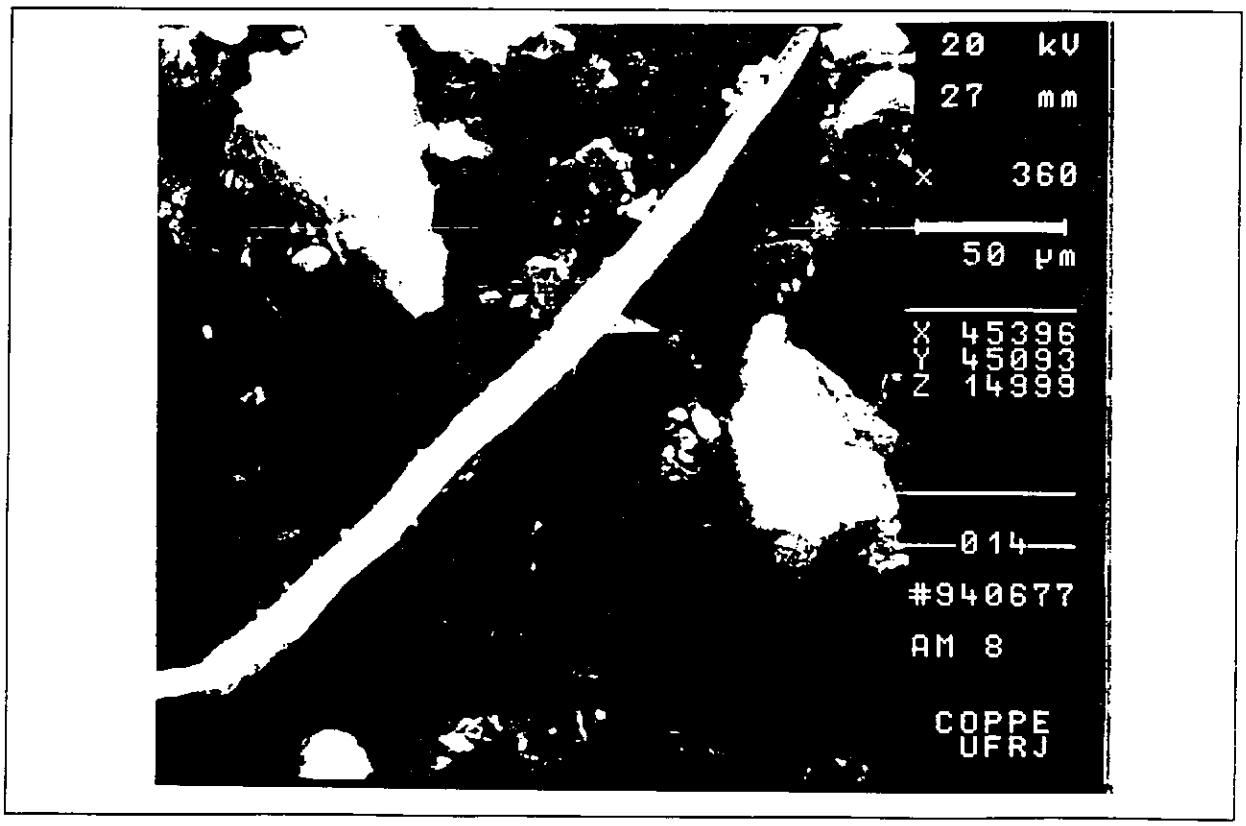
Foto. 3.3: microestrutura do solo A



Fotografia 3.4: microestrutura do solo B



Fotografia 3.5: microestrutura do solo B



Fotografia 3.6: microestrutura do solo C

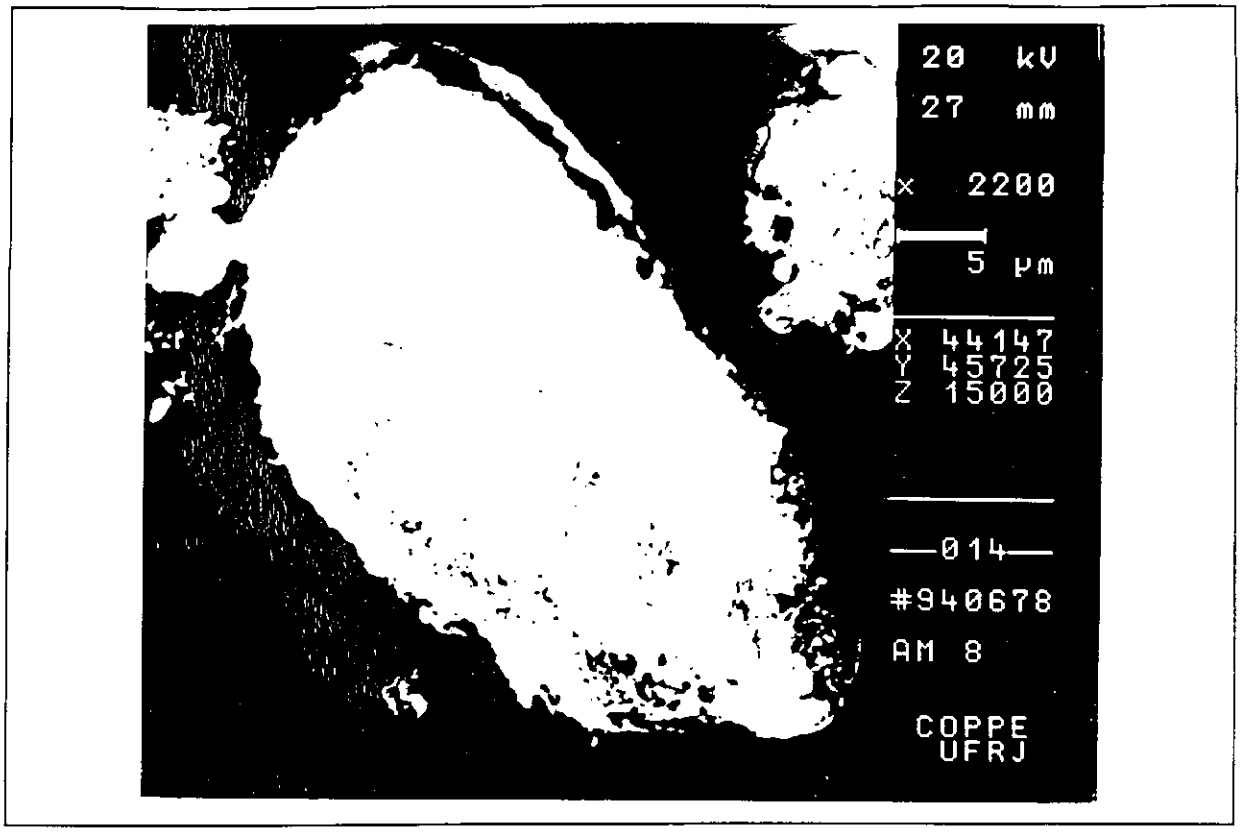


Foto. 3.7: microestrutura do solo C

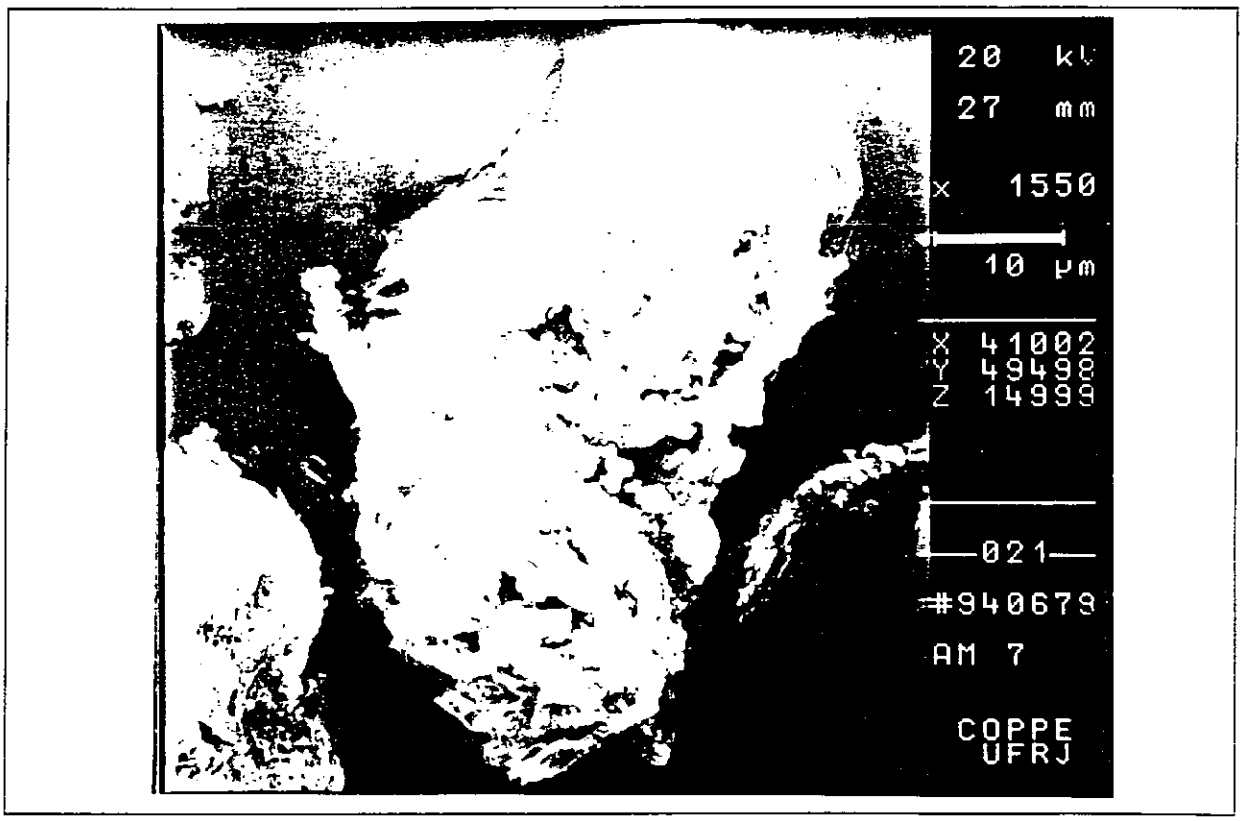


Foto. 3.8: microestrutura do solo D

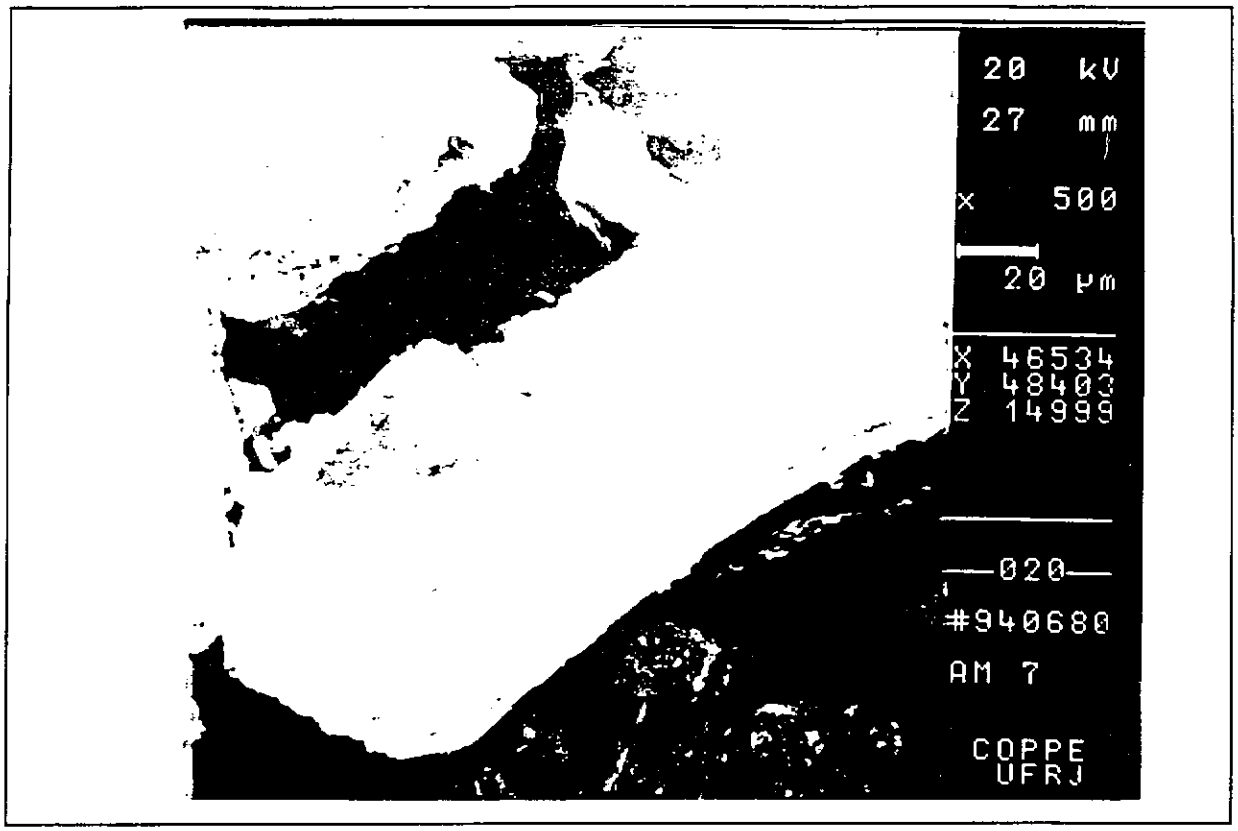


Foto. 3.9: microestrutura do solo D

3.2.3 - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Foram realizados ensaios de caracterização para a identificação dos quatro solos estudados onde os resultados estão apresentados a seguir:

a) granulometria

Na figura 3.1 apresentam-se as curvas granulométricas dos solos estudados. O solo A é o que foi utilizado na construção da rampa de acesso. Em destaque estão os limites nos quais a faixa granulométrica pode variar segundo recomendações apresentadas em MITCHELL E VILELET (1987).

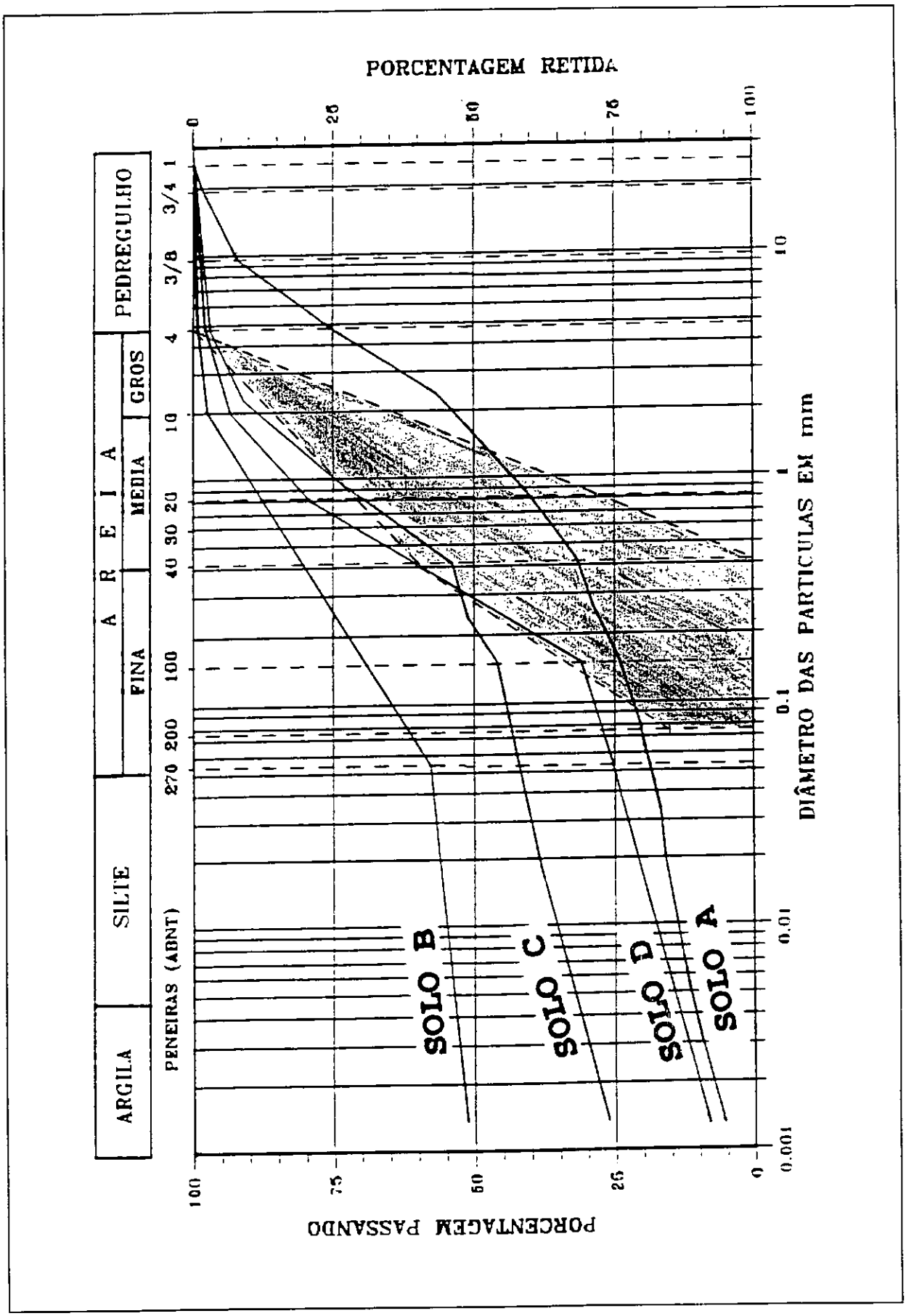


Fig. 3.1: curvas granulométricas

A tabela 3.1 mostra a relação entre os solos A, B, C e D com as peneiras N^{os} 4, 40 e 200.

	MATERIAL PASSANDO (%)			
peneira	A	B	C	D
N° 4 - (4,76 mm)	75	98	95	96
N° 40 - (0,420 mm)	33	83	55	62
N° 200 - (0,074 mm)	20	63	45	28

Tab. 3.1: peneira X material passando (%)

b) massa específica, densidade, LL e LP.

Os resultados encontrados, a partir de ensaios realizados segundo as normas NBR 7181, 6459 e 7180 de 1984, para os quatro solos estudados estão representados na tabela 3.2.

	SOLOS			
	A	B	C	D
massa esp. ap. seca (g/cm^3)	1,83	1,66	2,01	1,97
dens. real dos grãos - G_s	2,64	2,68	2,67	2,70
LL (%)	não plástico	64	51	não plástico
LP (%)	não plástico	23	20	não plástico

Tab. 3.2: massa específica, densidade, LL e LP

3.2.4 - ESTUDOS FÍSICO-QUÍMICOS

Foram realizados, nos quatro solos, análises de teor de cloretos, sulfatos, pH, resistividade elétrica e grau de laterização.

a) **cloretos, sulfatos e pH** (tabela 3.3).

	SOLOS			
	A	B	C	D
cloretos (ppm)	traços	traços	traços	traços
sulfatos (ppm)	traços	traços	traços	traços
pH	5,10	4,60	4,55	4,96

traços < 0,05 ppm

Tab. 3.3: cloretos, sulfatos e pH

b) **resistividade elétrica** (tabela 3.5).

Os ensaios para a determinação da resistividade elétrica foram realizados conforme a norma ASTM - G - 57 de 1978 revista em 1984.

Três umidades, (tabela 3.4) foram definidas para três situações diferentes e descritas da seguinte maneira para posterior medição da resistividade elétrica:

umidade máxima de saturação: é a máxima umidade que o solo pode suportar sem que, quando feito o ensaio de resistividade elétrica, se meça a resistividade da água e sim do solo.

umidade ótima de compactação Proctor Normal: utilizados estes valores de umidade para posterior análise de resistividade dos solos nessa condição.

umidade zero: também para posterior análise de resistividade dos solos nessa condição, solo completamente seco em estufa.

		SOLOS			
		A	B	C	D
UMIDADE (%)	máxima de saturação	30,0	45,0	30,0	35,0
	ótima de compactação	12,1	21,4	8,13	11,3
	zero (seco em estufa)	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. 3.4: umidade para três situações

		SOLOS			
		A	B	C	D
RESISTIVIDADE ELÉTRICA (ohm.cm)	umid. máxima	17000	10800	6320	12400
	umid. ótima	61000	81000	45000	74000
	umid. zero	2210000	2520000	2150000	2250000

Tab. 3.5: resistividade elétrica para três condições de umidade

c) grau de laterização (tabela 3.6).

A laterização é um processo característico das regiões tropicais de clima úmido e estações chuvosas e secas, segundo o qual, por lixiviação, remove-se a sílica coloidal e enriquece-se em ferro e alumina.

Para a obtenção dos resultados foi utilizado o método oficial estabelecido pelo Laboratório Central da EMBRAPA e também utilizado pelo Lab. de Solos da COPPE feito através do ataque sulfúrico.

		SOLO			
		A	B	C	D
ATAQUE SULFÚRICO	SiO_2 (%)	11,7	19,9	19,1	17,4
	Al_2O_3 (%)	11,3	23,4	14,6	12,3
	Fe_2O_3 (%)	2,02	6,40	2,50	3,30
	Ki	1,76	1,45	2,22	2,41
	Kr	1,57	1,23	2,00	2,05
	Resíduo (%)	66,59	37,98	53,72	53,90
ΔP (%)		4,10	9,60	5,70	5,40

Tab. 3.6: grau de laterização dos solos

onde:

Ki = (relação molecular sílica/alumina)

Kr = (relação molecular sílica/sesquióxidos)

Resíduo = (material não atacado pelo ataque sulfúrico)

ΔP = (perda de peso a 600 ^{0}C)

3.3- RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS EM ESTUDO

3.3.1 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste estudo é verificar se os solos referidos nesta pesquisa apresentam, apesar da significativa percentagem de finos, comportamento mecânico adequado de forma a poderem ser aplicados em obras de solo reforçado.

Na definição do comprimento do reforço faz-se necessário conhecer a resistência ao cisalhamento dos solos que governa, junto com fatores geométricos, a resistência ao arrancamento.

Além da possível interferência no processo corrosivo, considera-se que a presença de finos influencia a resistência ao cisalhamento dos solos, quer por diminuição da resistência efetiva, como pela possível retenção de água que poderia aumentar a poro pressão.

Consideram-se argilosos os solos cuja porcentagem de argila é suficiente para reger o comportamento do solo como um todo. Conforme MARSAL e FUENTES (1976), porcentagens de argila de maiores que 30% já influenciam de forma determinante nas propriedades dos materiais.

A fração argilosa, composta basicamente por partículas de diâmetro inferior a duas micras, denomina-se componente ativo do solo; enquanto que a porção de siltes, areias e pedregulhos costuma-se chamar de componentes inertes. A nomenclatura ativa e inerte se deve ao fato de a porção argilosa ser sede de fenômenos físico-químicos, ao passo que somente esforços físicos ou mecânicos atuam sobre a fração granular. Nesse caso, diferentemente dos solos granulares, diversos são os fatores determinantes na formação da estrutura final do solo, tendo-se que considerar na sua análise a interação de elementos como composição mineralógica, teor de umidade, forças internas entre partículas e esforços externos.

Os procedimentos comumentes utilizados para projeto de obras de solo reforçado foram estabelecidos com base, principalmente, em trabalhos de pesquisa em países de clima temperado. De acordo com estas especificações os solos finos devem ser evitados, no entanto,

os solos tropicais têm estruturas diferenciadas dos solos de clima temperados devendo ser esperado um comportamento particular dos mesmos.

3.3.2 - ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

Foram efetuados ensaios de resistência em amostras compactadas destes solos de forma a comparar seu comportamento mecânico. As amostras foram compactadas estaticamente na umidade ótima do Proctor Normal. O estudo foi efetuado utilizando-se equipamento triaxial. O ensaio foi de compressão, sendo as amostras consolidadas e rompidas de forma não drenada com medição de poropressão. O procedimento dos ensaios segue conforme HEAD (1986).

A tabela 3.7 mostra as condições em que foram realizados os ensaios triaxiais.

		SOLOS			
		A	B	C	D
umidade ótima (%)		12,1	21,4	8,13	11,3
tensões confinantes (kPa)	CP_1	50	50	50	50
	CP_2	100	100	100	100
	CP_3	200	200	200	200
contrapressão (kPa)		250	200	250	250
velocidade (mm/min)		0,22	0,22	0,22	0,22

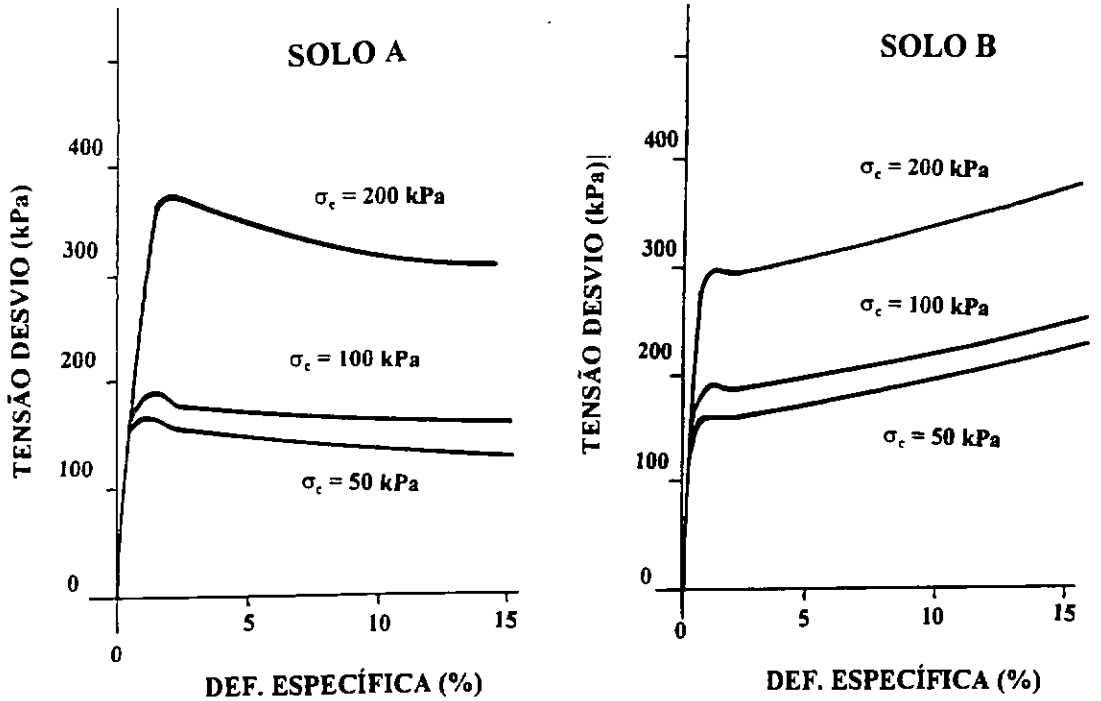
Tab. 3.7: características do ensaio

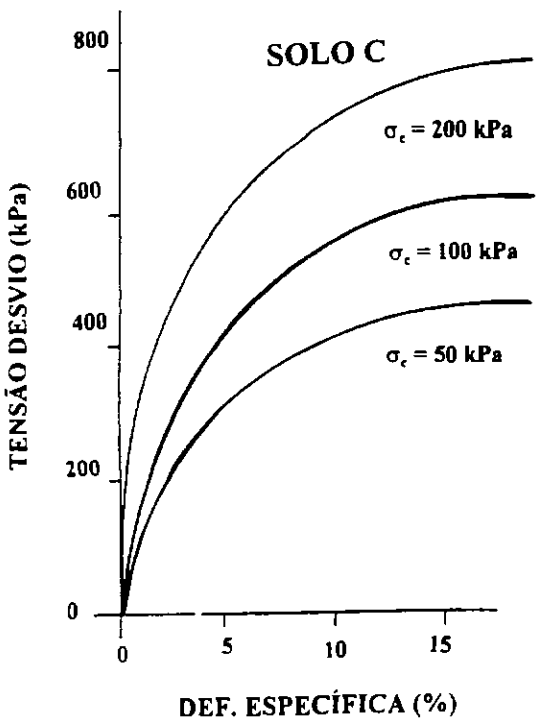
As figuras 3.2, 3.3 e 3.4 representam, respectivamente, as curvas deformação específica X tensão desvio, deformação específica X poro pressão, trajetória de tensões e envoltória de Mohr-Coulomb obtidas nos ensaios.

A tabela 3.8 apresenta os parâmetros efetivos de resistência dos solos.

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	SOLOS			
	A	B	C	D
ϕ' (graus)	32	32	37	38
c' (kPa)	12	18	28	39

Tab. 3.8: parâmetros de resistência dos solos





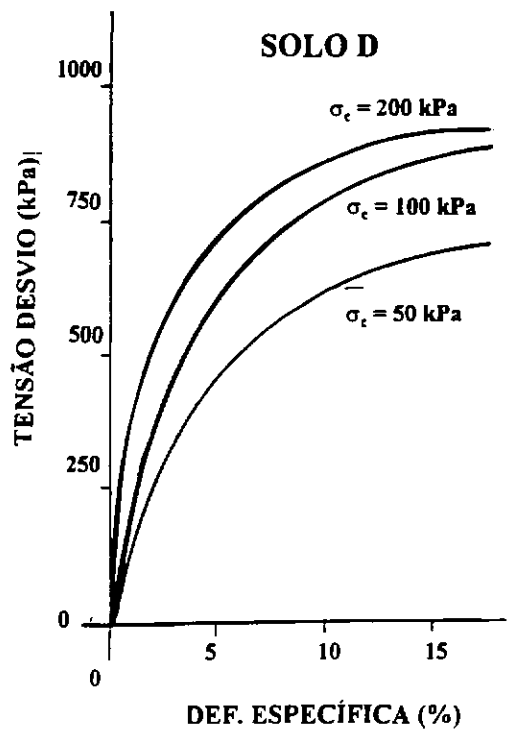


Fig. 3.2: deformação específica X tensão desvio

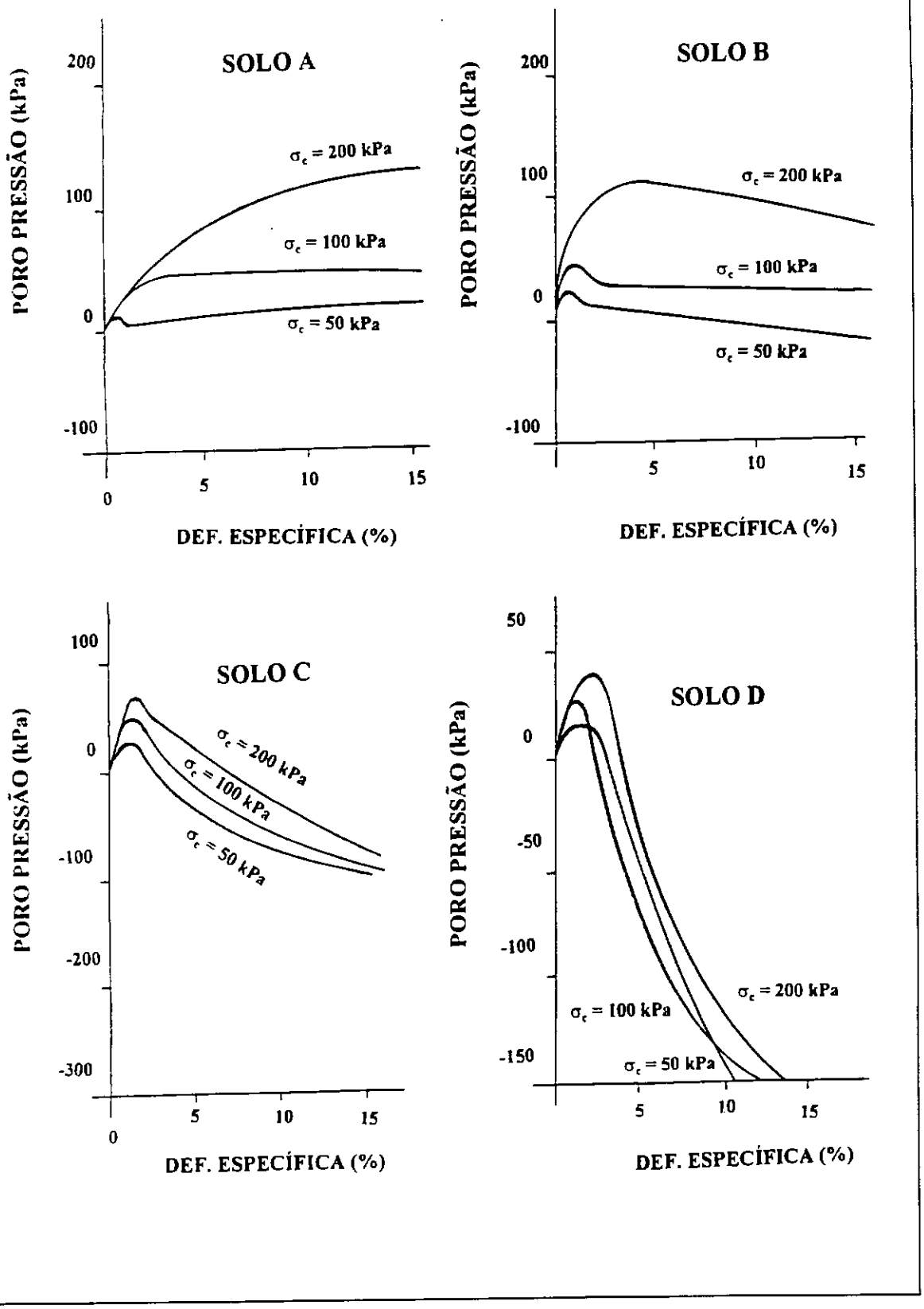


Fig. 3.3: deformação específica X poropressão

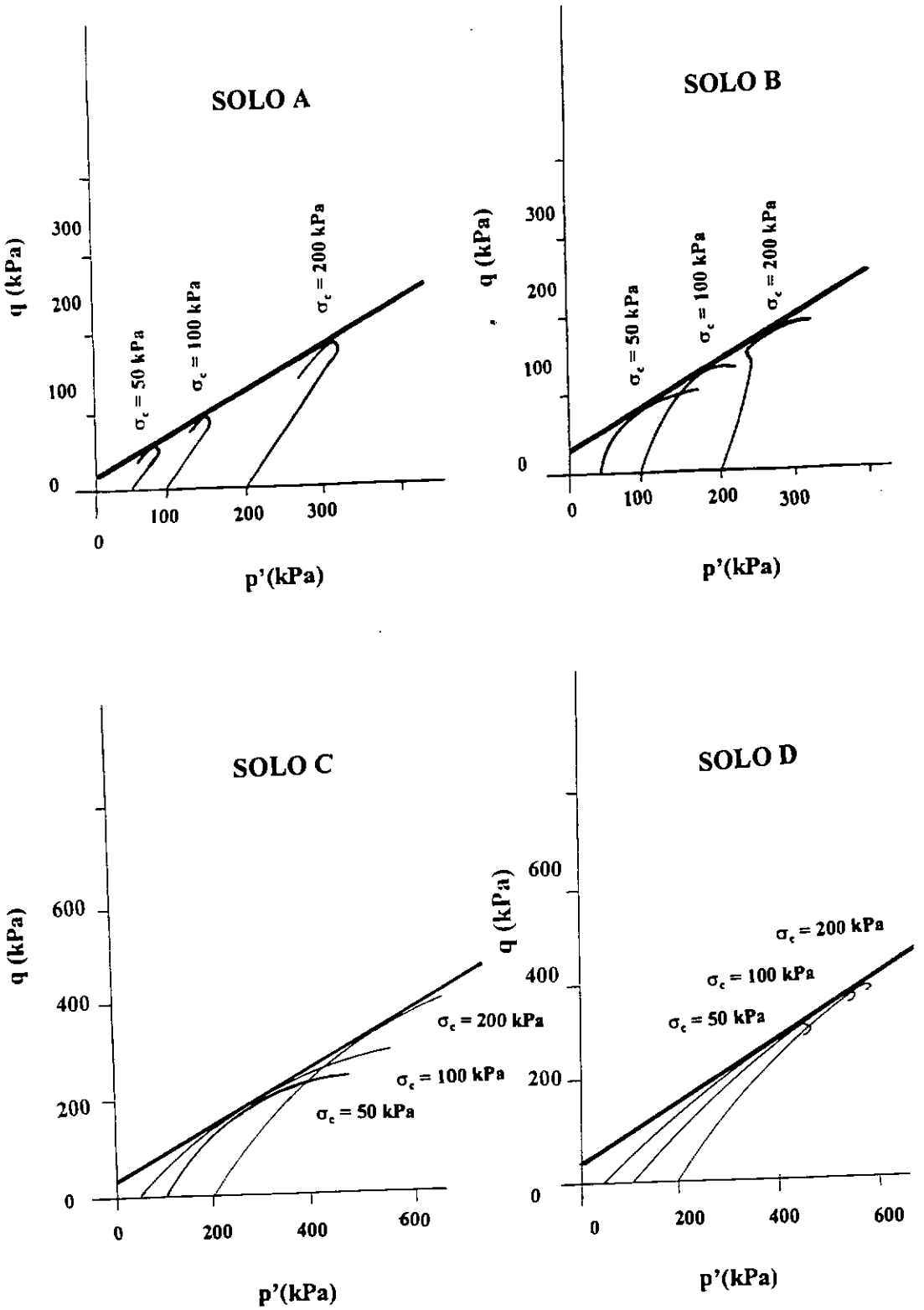


Fig. 3.4: trajetória de tensões e envoltória de Mohr-Coulomb

3.4 - ENSAIOS DE CORROSÃO

3.4.1 - CURVAS DE POLARIZAÇÃO

O ensaio mais preciso e confiável para a avaliação do processo corrosivo de um metal é o denominado Ensaio de Perda de Massa, que se caracteriza pelo acompanhamento da corrosão ao longo do tempo. Em geral, a quantidade de metal oxidado ou corroído na área anódica pode ser avaliada usando-se a relação que existe entre a quantidade de corrente que passa através de um eletrólito e a massa do material que é oxidado ou reduzido nos eletrodos. Esta relação quantitativa é o objeto da Lei de Faraday e pode ser anunciada pela expressão 3.1,

$$M \propto i.t \qquad (3.1)$$

onde,

M = massa do metal que reage

i = intensidade da corrente em Ampère

t = tempo em segundos

Este acompanhamento, no entanto, deve ser conduzido durante períodos longos, muitas vezes incompatíveis com projetos de engenharia.

No ensaio de polarização os resultados são imediatos e uma análise comparativa entre diversos metais imersos em diferentes eletrólitos pode ser efetuada de maneira muito elucidativa. Na figura II - 1, do anexo II, apresenta-se esquematicamente a células utilizada nos ensaios de polarização em extrato aquoso.

O ensaio de polarização em extrato aquoso baseia-se no princípio de que a imersão de um metal em um eletrólito provoca uma redistribuição de cargas elétricas (íons metálicos), assim sendo, é possível definir um potencial eletroquímico chamado potencial de corrosão.

Utilizando-se um equipamento de teste (potenciostato), fotografia 3.10, pode-se, a partir do potencial de corrosão, aplicar um potencial cada vez mais positivo (anódico), onde o

metal reage apresentando uma corrente chamada "corrente de dissolução", expressa em mA/cm^2 e que representa uma certa perda de espessura do metal num determinado tempo.

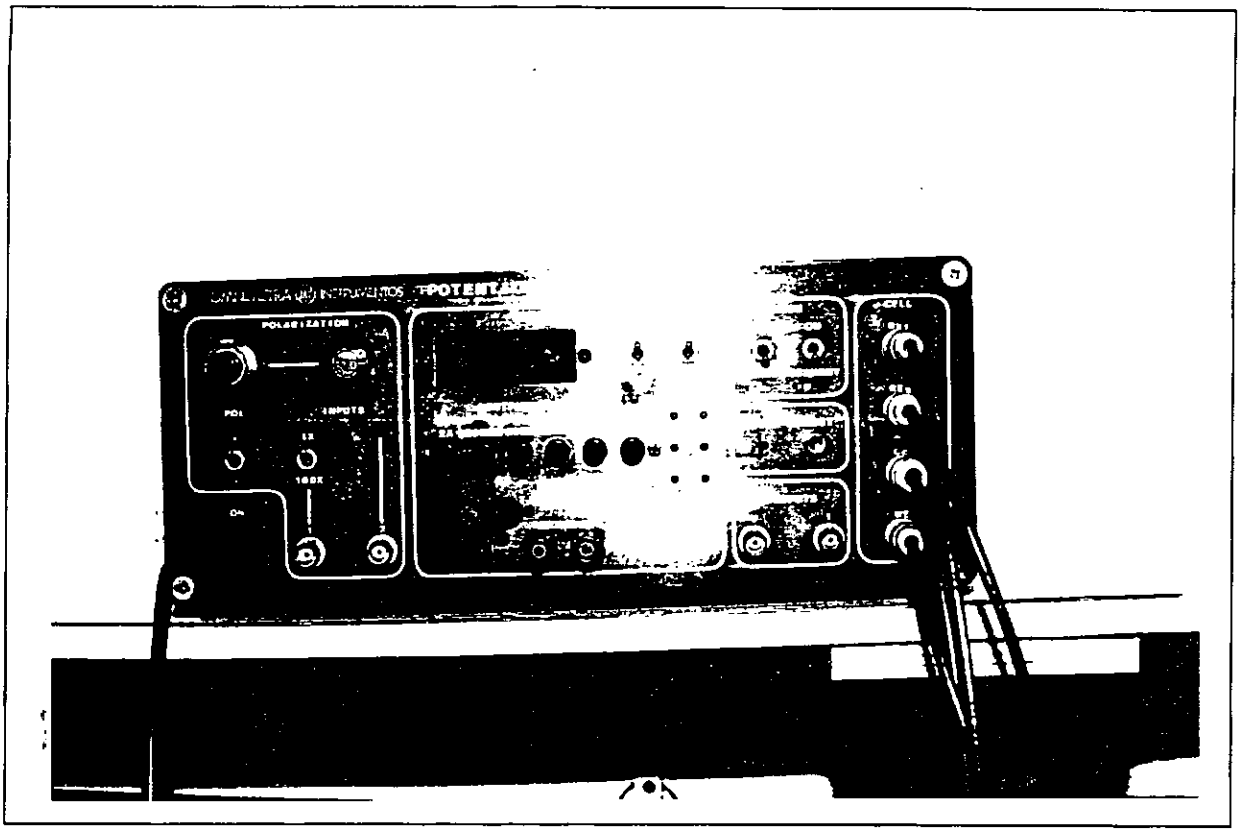


Foto. 3.10: potenciostato

Foto do Autor

Optou-se, então, pela utilização dos ensaios de polarização anódica de três elementos metálicos em diferentes eletrólitos como descrito a seguir:

Os elementos metálicos estudados, fotografia 3.11, foram definidos como:

emg - elemento metálico galvanizado (tira metálica padrão Terra Armada)
(vide caracterização apresentada no anexo I)

ba - barra de aço nu (aço carbono sem o galvanizado)

Zn - barrete de zinco (zinco puro)

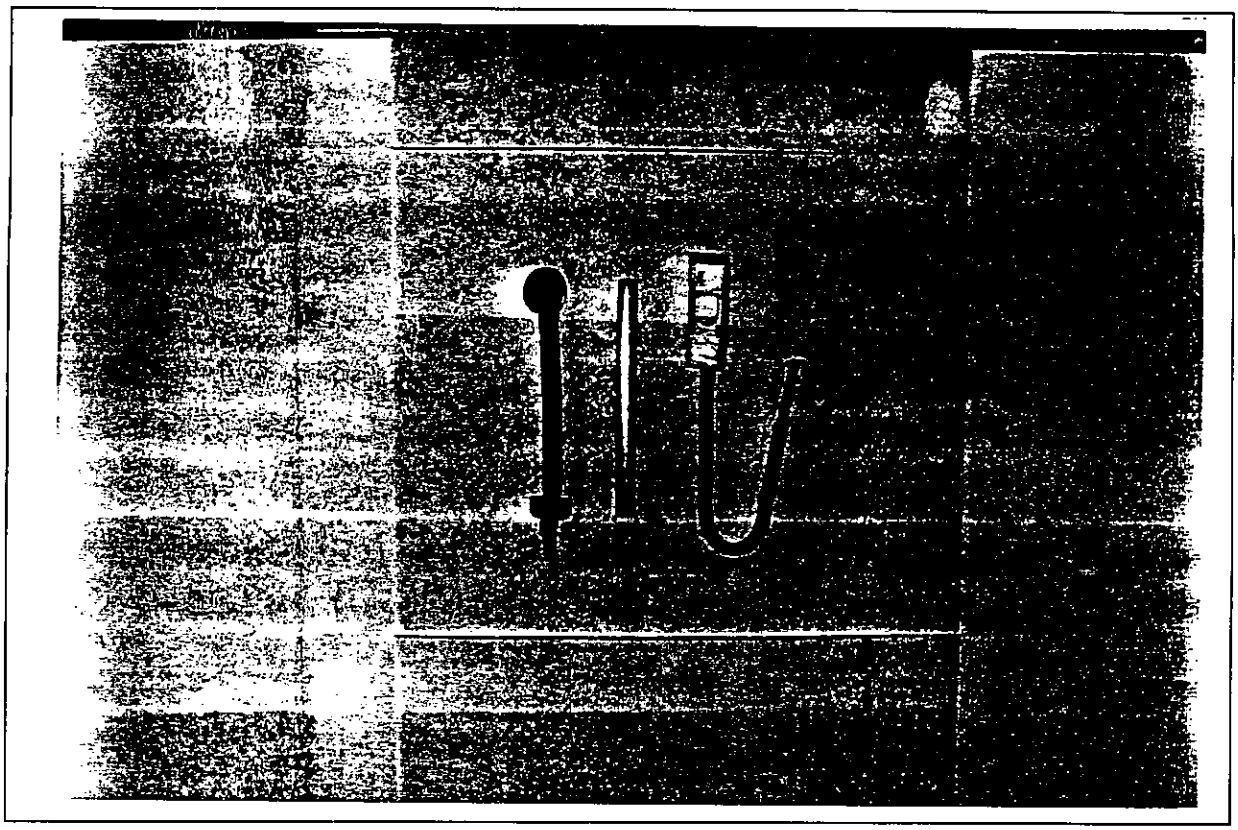


Foto. 3.11: os metais estudados

Foto do Autor

Os eletrólitos foram os próprios extratos aquosos dos solos, A, B, C e D.

Foram preparados quatro extratos aquosos a partir dos solos A, B, C e D denominados "extratos a", onde foram analisados os três elementos metálicos anteriormente descritos. Após esta análise repetiram-se os ensaios em outros quatro extratos aquosos, "extratos b", com um procedimento idêntico ao anterior.

Cada solo, 1 kg, foi misturado a 1 litro de água destilada, fotografia 3.12, sendo, então, a solução agitada e filtrada diversas vezes até que se obtivesse um líquido sem as partes sólidas que ficaram retidas nos filtros, após 24 horas de repouso fotografia 3.13.

Os valores de pH e resistividade elétrica dos extratos aquosos foram os seguintes:

SOLO A: pH = 5,72 resistividade = 14948 ohm.cm

SOLO B: pH = 6,54 resistividade = 7800 ohm.cm

SOLO C: pH = 5,44 resistividade = 9643 ohm.cm

SOLO D: pH = 5,06 resistividade = 18149 ohm.cm

Foto. 3.12: preparo dos extratos aquosos

Foto do Autor

Esses extratos continham as características que eram danosas do ponto de vista de corrosão, como pH, íons dissolvidos, etc., dos solos em questão.

Os corpos de prova metálicos "ba" e "Zn" necessitaram de um tratamento superficial para retirada dos óxidos formados a partir do contato com a atmosfera.

Para que o metal nu ficasse exposto foi realizado o processo de lixamento refrigerado a água com as lixas que variaram de uma mais grossa, número 100 (100 grãos/pol^2) até uma mais fina, número 600 (600 grãos/pol^2). Os CPs foram, então, lavados com água destilada, álcool etílico puro PA e secos com vapor de ar quente.

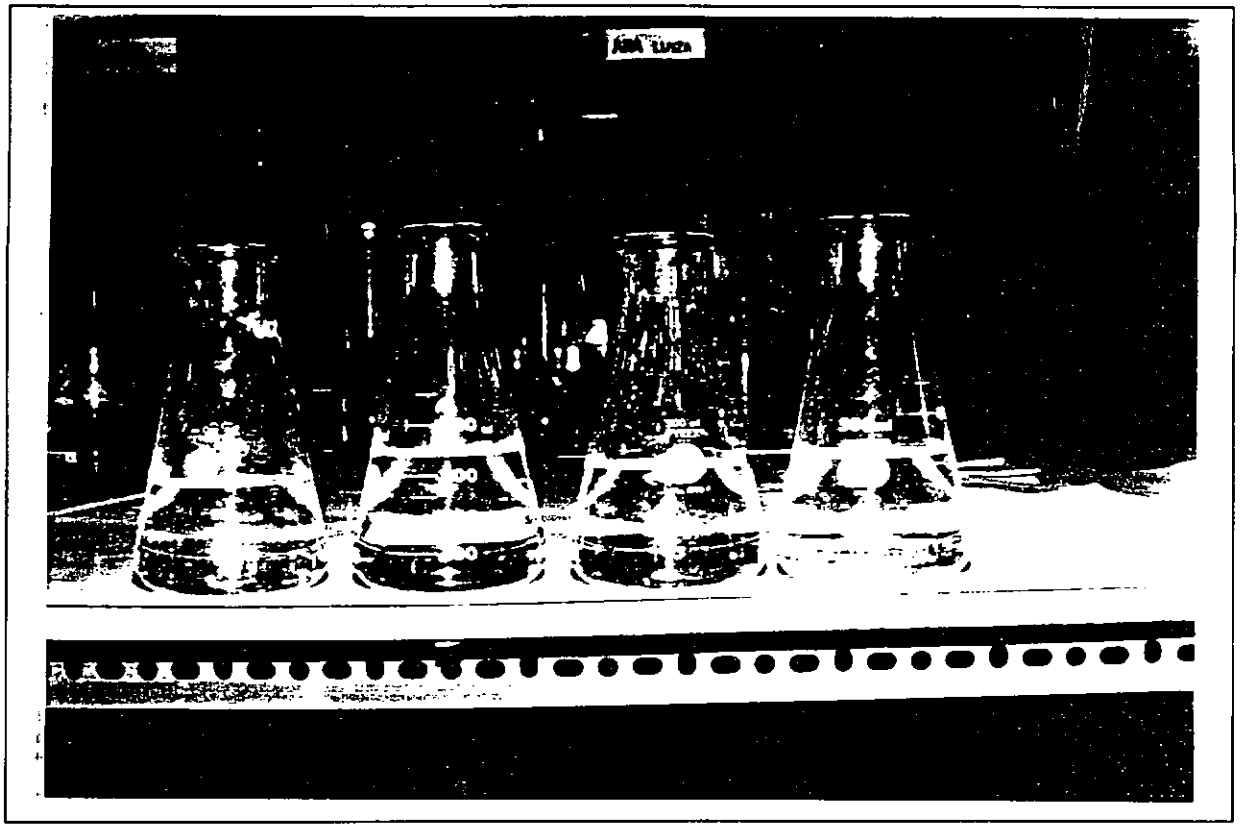


Foto 3.13: os extratos aquosos

Foto do Autor

Toda a superfície dos três tipos de CPs ("emg", "ba" e "Zn") foi isolada com uma cola especial, tipo Araldite, ficando apenas exposta uma área de 0,25 cm^2 que efetivamente foi a região que sofreu o efeito da polarização anódica.

Foram preparados e ensaiados os seguintes CPs em presença dos oito eletrólitos existentes (extratos aquosos "a" e "b" dos solos A, B, C e D):

oito CPs do tipo emg - elemento metálico galvanizado

oito CPs do tipo ba -barra de aço nu

oito CPs do tipo Zn - barrete de zinco

O metal preparado foi, então, introduzido na solução aquosa em uma célula eletroquímica que possuía três eletrodos, a saber:

eletrodo de trabalho: foi o próprio corpo-de-prova a ser estudado.

eletrodo de referência: utilizou-se o eletrodo de calomelano saturado (ecs), que registrou o potencial da superfície metálica exposta (não circulou corrente por este eletrodo). O ecs é uma referência reversível, isto é, é capaz de apresentar o potencial de eletrodo com

bastante precisão e estabilidade, independente da corrente que circula pelo eletrodo de trabalho.

contra-eletrodo: utilizou-se um contra-eletrodo de platina platinizada cuja finalidade era ser o local da passagem da corrente (o fato de ser platinizada é apresentar uma superfície específica maior que a do material a ser estudado).

A fotografia 3.14 representa a célula eletroquímica para a polarização em extrato aquoso.

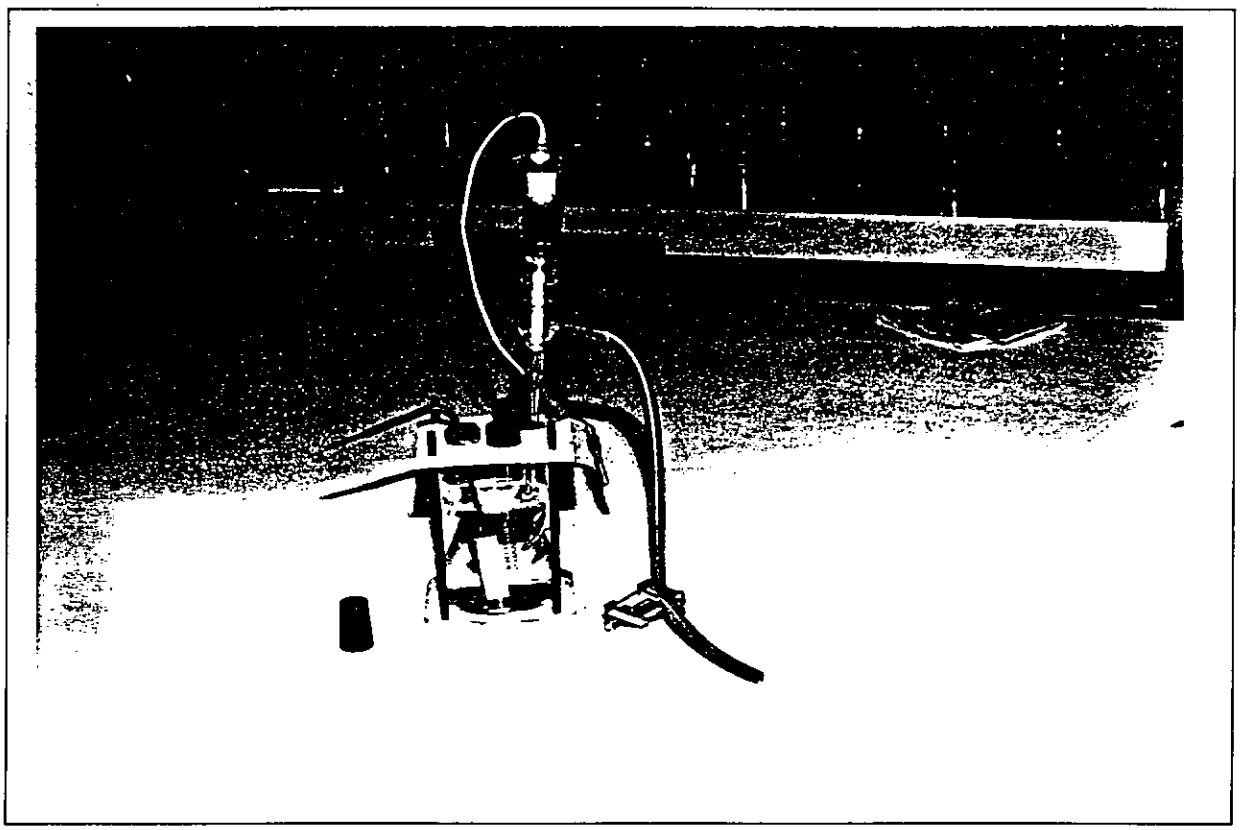


Foto. 3.14: célula eletroquímica

Foto do Autor

A fotografia 3.15 representa um eletrodo de trabalho, o eletrodo de referência e o contra-eletrodo.

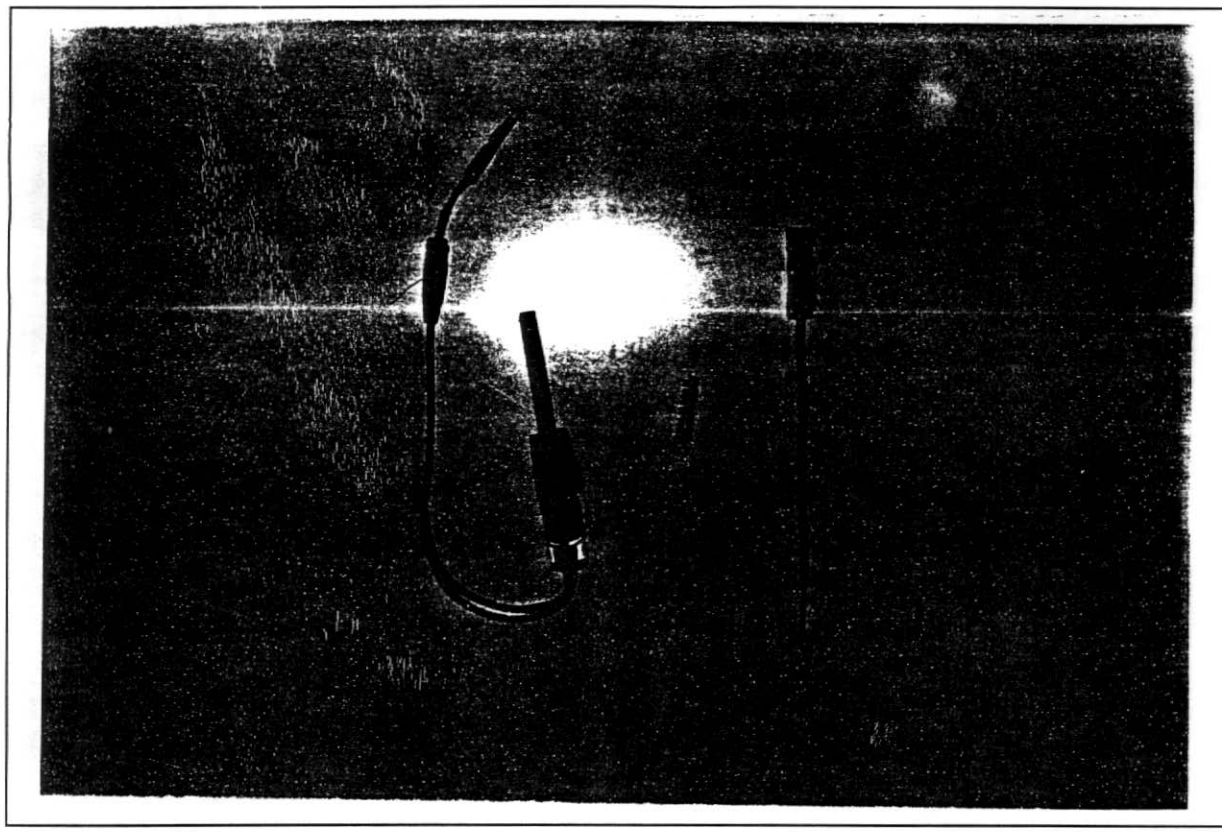


Foto. 3.15: eletrodos utilizados

Foto do Autor

A introdução de um metal em um eletrólito polar provoca uma redistribuição de cargas elétricas caracterizando o potencial de corrosão do corpo-de-prova. Aplicou-se, então, a partir de um potenciostato ligado aos três elementos imersos no extrato aquoso, uma polarização anódica e avaliou-se a existência de faixas de passivação e/ou de corrosão. Em algumas situações o metal pode estar submetido a velocidades de corrosão extremamente baixas, envolto por um eletrólito com um alto pH e baixo teor de cloreto. Isto significa o aço estar passivado.

As figuras 3.5 e 3.6 referem-se respectivamente aos ensaios de potencial de corrosão nos extratos aquosos "a" e "b".

As curvas de polarização plotadas representam o comportamento dos diferentes CPs nos diversos eletrólitos a que foram submetidos e ensaiados.

A, B, C e D são os diferentes tipos de solos (vide texto)

ba, emg e Zn são os diferentes tipos de corpos-de-prova (vide texto)

ba = barra de aço nu

emg = elemento metálico galvanizado

Zn = barrete de zinco puro

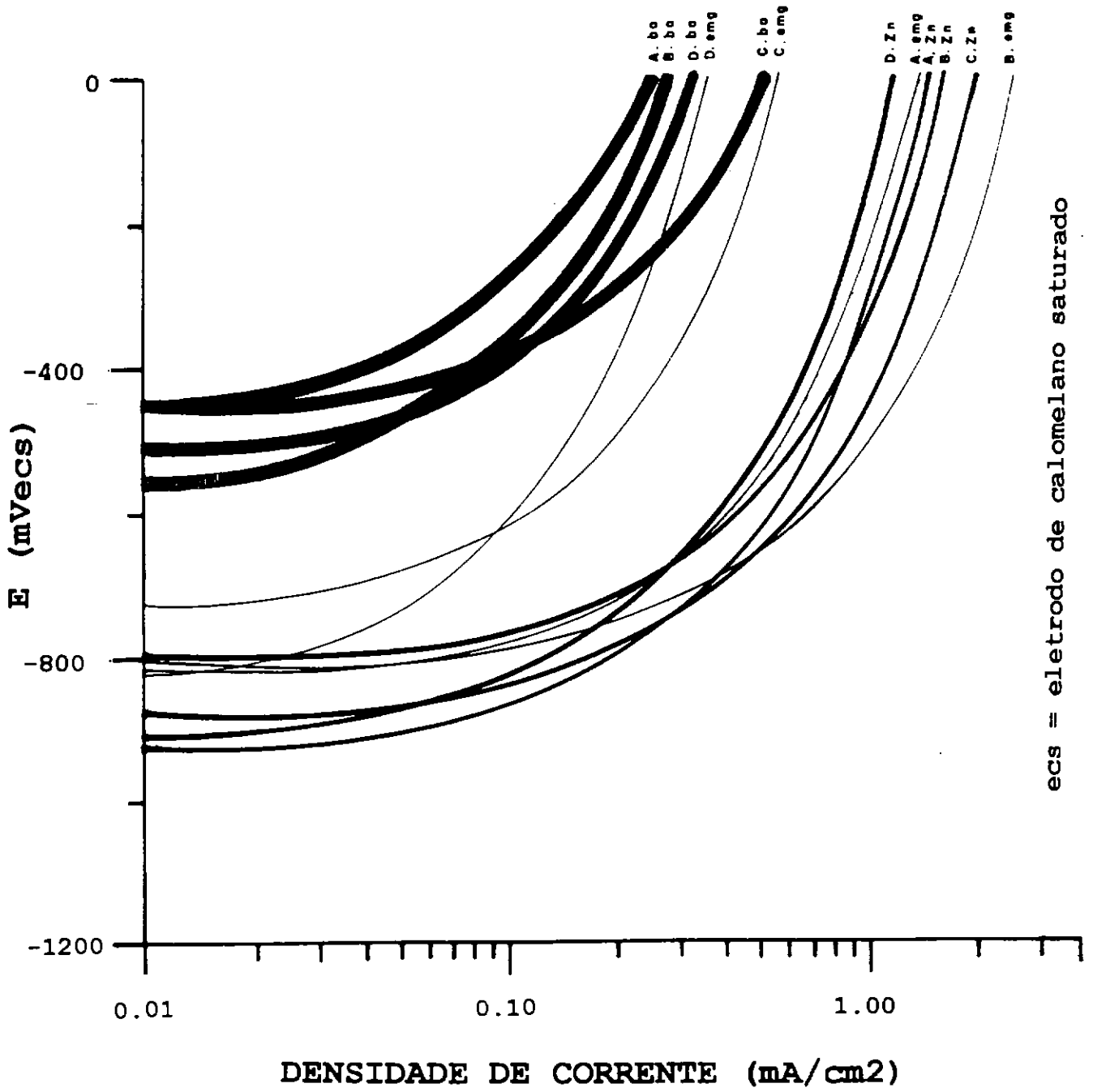


Fig. 3.5: curvas de polarização anódica (extrato "a")

A, B, C e D são os diferentes tipos de solos (vide texto)

ba, emg e Zn são os diferentes tipos de corpos-de-prova (vide texto)

ba = barra de aço nu

emg = elemento metálico galvanizado

Zn = barrete de zinco puro

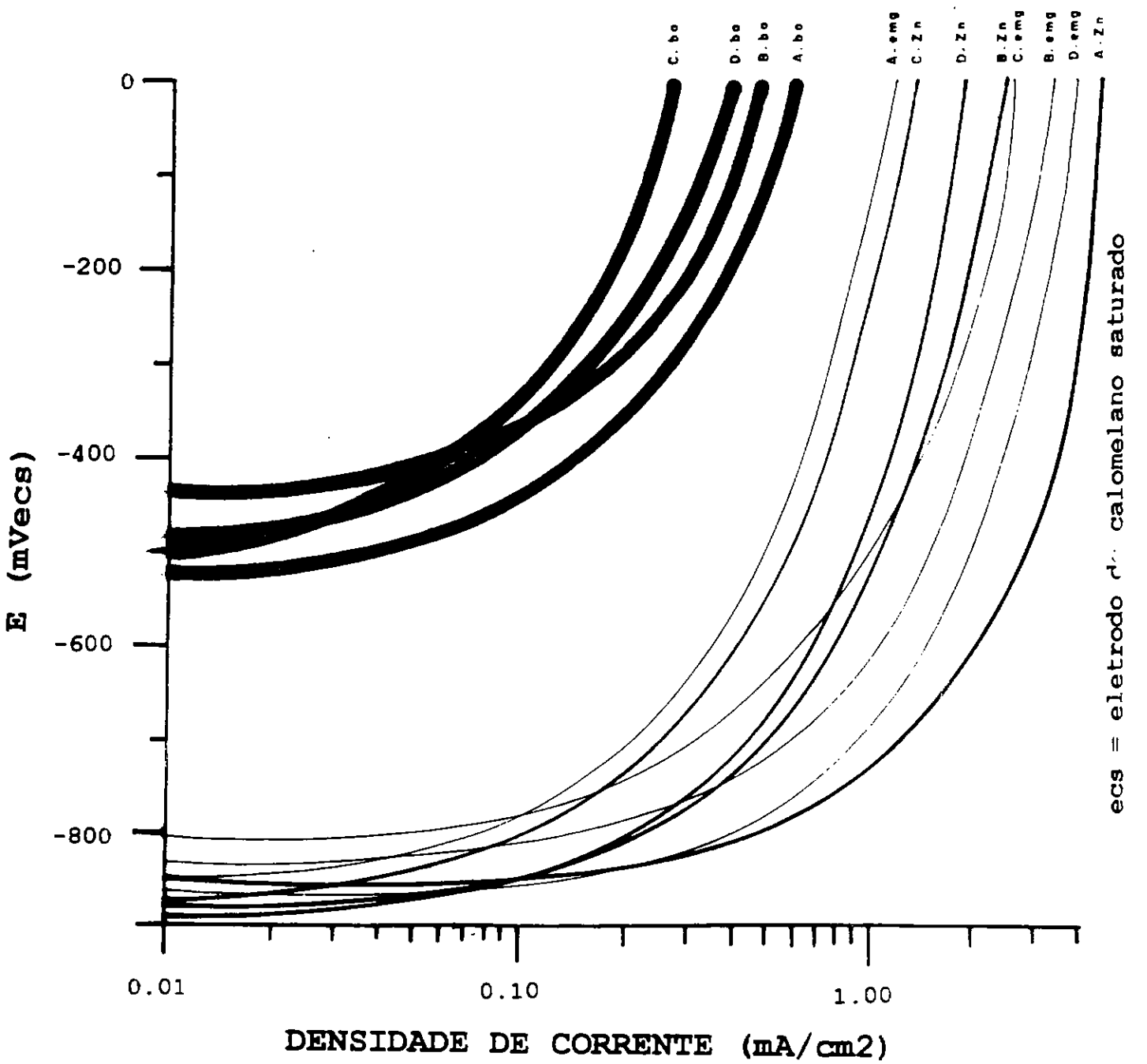


Fig. 3.6: curvas de polarização anódica (extrato "b")

Na figura 3.7 apresentam-se resultados de uma segunda série de ensaios efetuados nos solos A e B considerando as correções de queda ôhmica. Foram levantadas novas curvas de polarização, ramos anódicos e catódicos, dos dois materiais diferentes, barra de aço nu - **ba** e elemento metálico galvanizado - **emg**.

Para a correção da queda ôhmica é necessário conhecer o valor da resistência do eletrólito (Re). A obtenção deste parâmetro foi possível realizando-se uma série de ensaios complementares utilizando-se a técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (faixa de freqüência de 100 kHz - 600 mHz, perturbação senoidal de amplitude de 10mV) no potencial de corrosão dos materiais nos extratos aquosos dos solos A e B. Para esses ensaios utilizou-se uma célula de polarização onde eram conhecidas sua geometria, e distância entre os eletrodos. Com o valor de Re medido e resistividade (ρ) já conhecida é possível obter-se o valor da constante da célula (K), através da equação 3.2.

$$Re = \rho \,.\, K \qquad (3.2)$$

O valor da cte. K para a célula utilizada em extrato aquoso foi de $2{,}14 \times 10^{-3}$ cm^{-1}.

De posse do valor da constante de célula pôde-se avaliar a resistência para os outros eletrólitos. O mesmo procedimento foi utilizado para a determinação da resistência do eletrólito nos solos. Esses resultados encontram-se na tabela 3.9,

ELETRÓLITO	RESISTIVIDADE (ohm.cm)	RESISTÊNCIA (ohm)
extrato aquoso do solo A	14948	32
extrato aquoso do solo B	7800	17

Tab. 3.9: resistência dos eletrólitos

Na correção das curvas de polarização empregou-se a equação 3.3 para cada um dos eletrólitos em questão,

$$E_0 = E \pm \eta.\rho = E \pm i.Re \qquad (3.3)$$

A.ba - soloA, barra de aço nu
A.emg - solo A, elemento metálico galvanizado
B.ba - soloB, barra de aço nu
B.emg - solo B, elemento metálico galvanizado

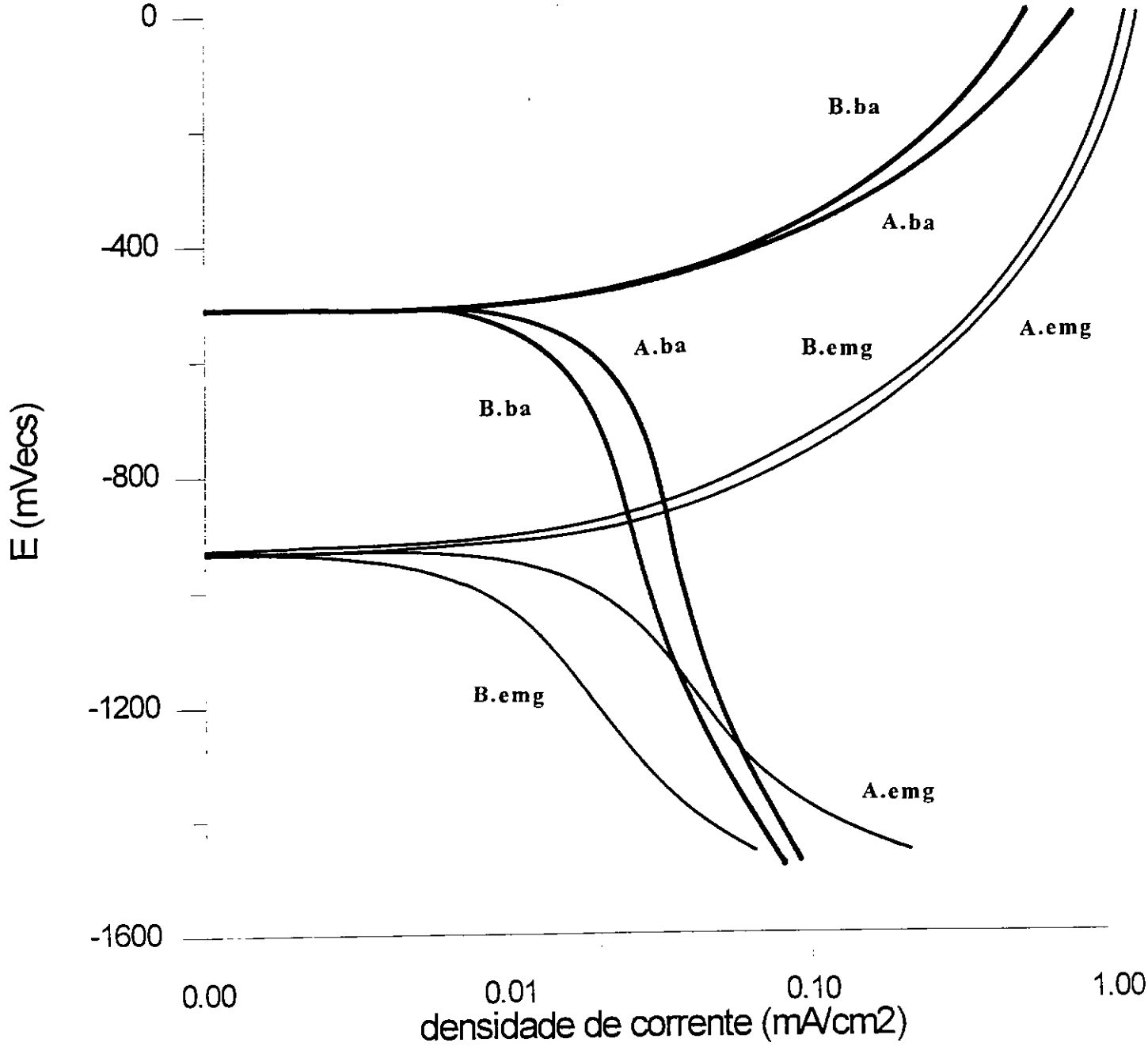


Fig. 3.7: curvas de polarização em extrato aquoso com correção da queda ôhmica

Foram realizados, também, ensaios de polarização anódica dos mesmos metais diretamente no próprio solo (vide esquema do equipamento, figura II - 2, anexo II), na umidade ótima de compactação e na umidade máxima de saturação, pois, não foi possível a polarização com o material seco devido ao alto valor de resistividade em que o solo se encontrava.

Os ensaios foram realizados da mesma maneira que em extrato aquoso, com a diferença nos três eletrodos utilizados, onde o eletrodo de trabalho era o metal a ser estudado, no caso os CPs de "emg", "ba" e "Zn", o contra-eletrodo era uma chapa de aço inoxidável de área igual a 2,25 cm^2 e o eletrodo de referência era um barrete de zinco puro, fotografia 3.16.

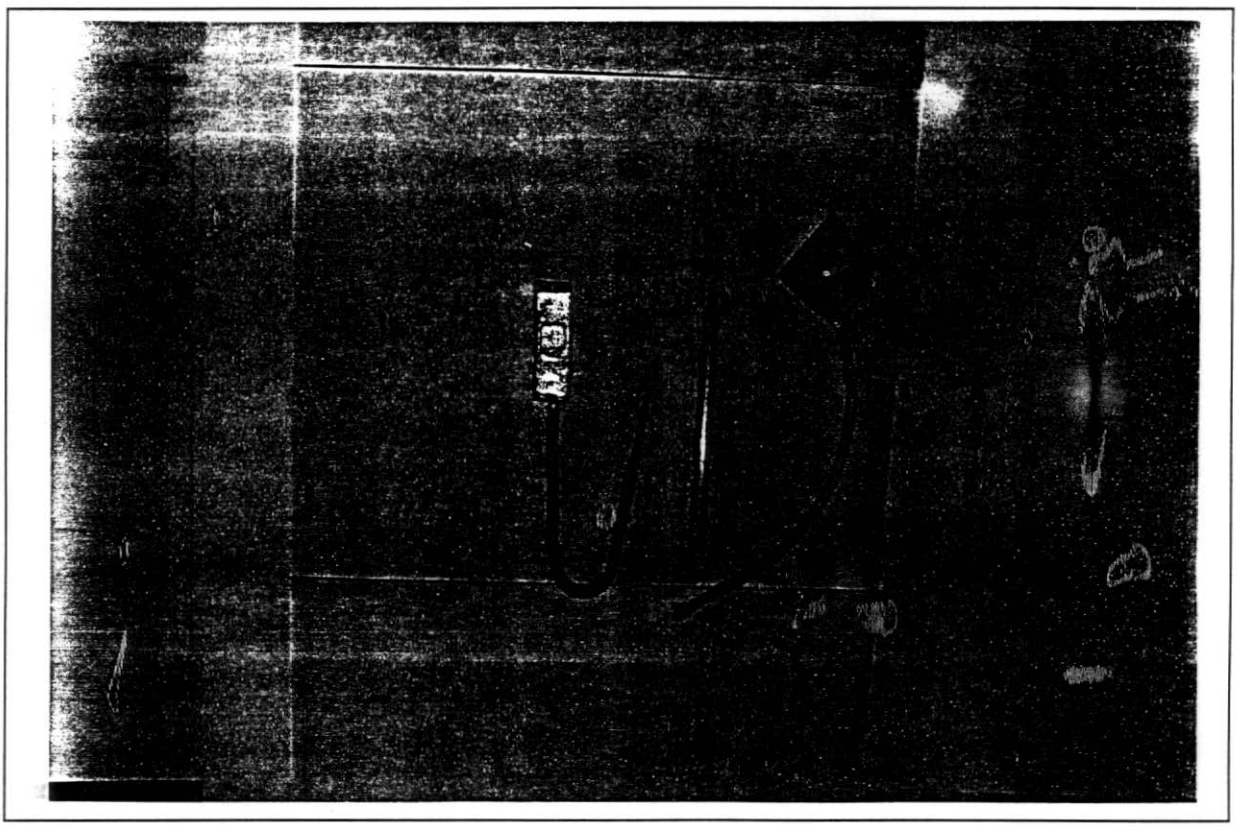


Foto. 3.16: os eletrodos para a polarização no solo

Foto do Autor

Como a resistividade do meio sólido era maior que no extrato aquoso, tomou-se um cuidado extra em se manter sempre a mesma distância entre os três eletrodos em todos os casos. Procurou-se realizar o processo de enchimento e compactação na célula de maneira que fosse garantida sob grande cuidado a reprodutibilidade dos ensaios. O solo foi colocado aos poucos na célula em camadas de 5mm e compactado com uma haste. Para os ensaios na

umidade ótima de compactação e na umidade máxima de saturação o peso específico seco foram de 0,9 g/cm^3 e 1,0 g/cm^3, respectivamente.

A fotografia 3.17 mostra a quantidade de emg's ensaiados em extratos aquosos e diretamente no próprio solo nas duas umidades referidas.

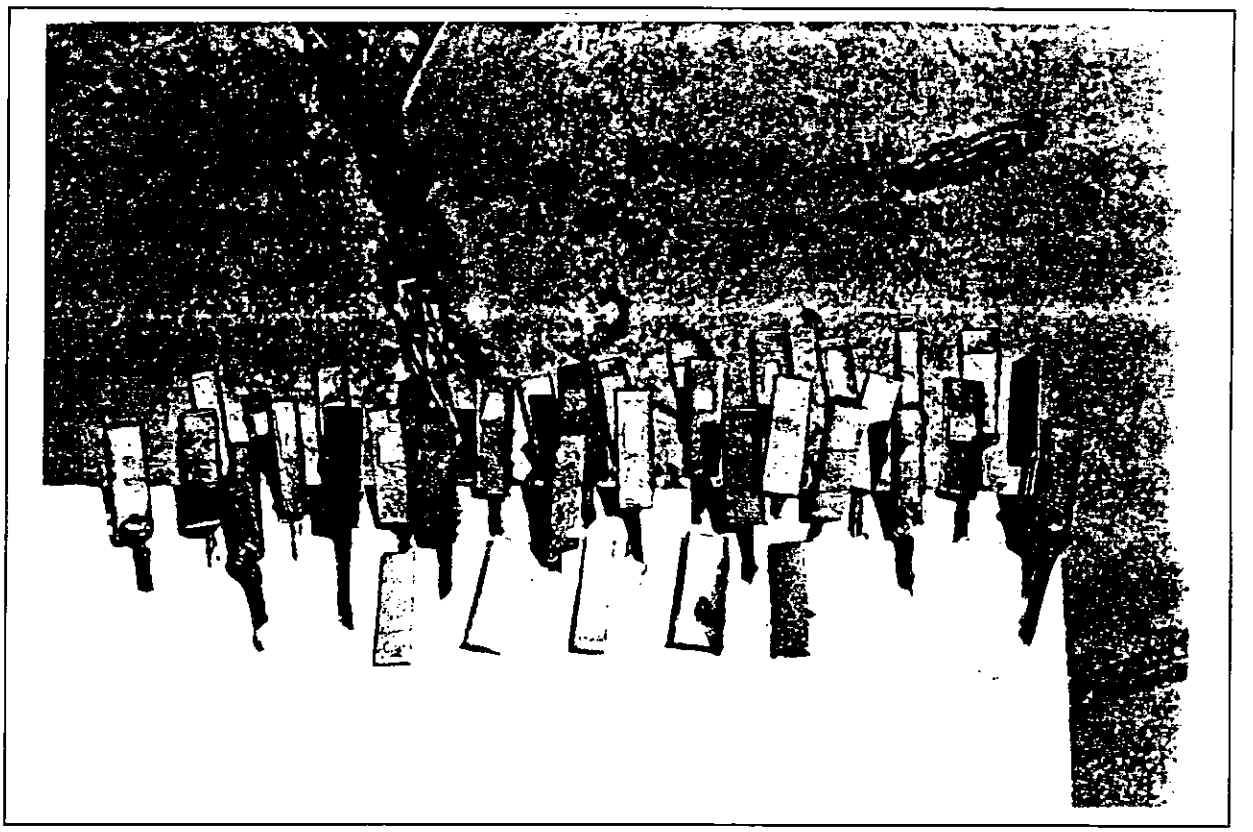


Foto. 3.17: corpos-de-prova "emg" ensaiados

Foto do Autor

Conforme os ensaios em extrato aquoso, os resultados da polarização no solo estão apresentados sob a forma de curvas de polarização, figuras 3.8 e 3.9.

A, B, C e D são os diferentes tipos de solos (vide texto)

ba, emg e Zn são os diferentes tipos de corpos-de-prova (vide texto)

ba = barra de aço nu

emg = elemento metálico galvanizado

Zn = barrete de zinco puro

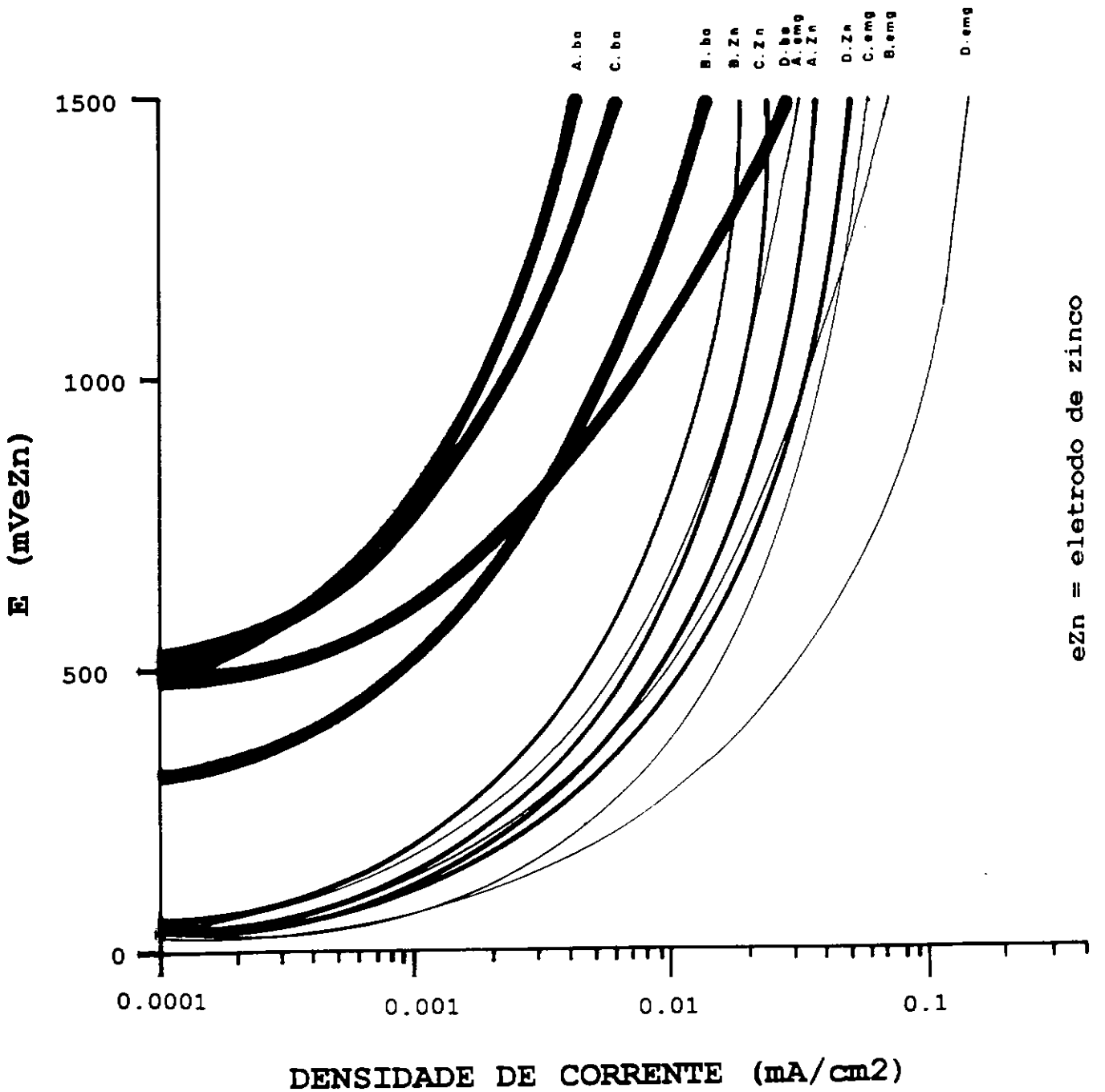


Fig. 3.8: curvas de polarização para ensaio no solo (umidade ótima)

A, B, C e D são os diferentes tipos de solos (vide texto)

ba, emg e Zn são os diferentes tipos de corpos-de-prova (vide texto)

ba = barra de aço nu

emg = elemento metálico galvanizado

Zn = barrete de zinco puro

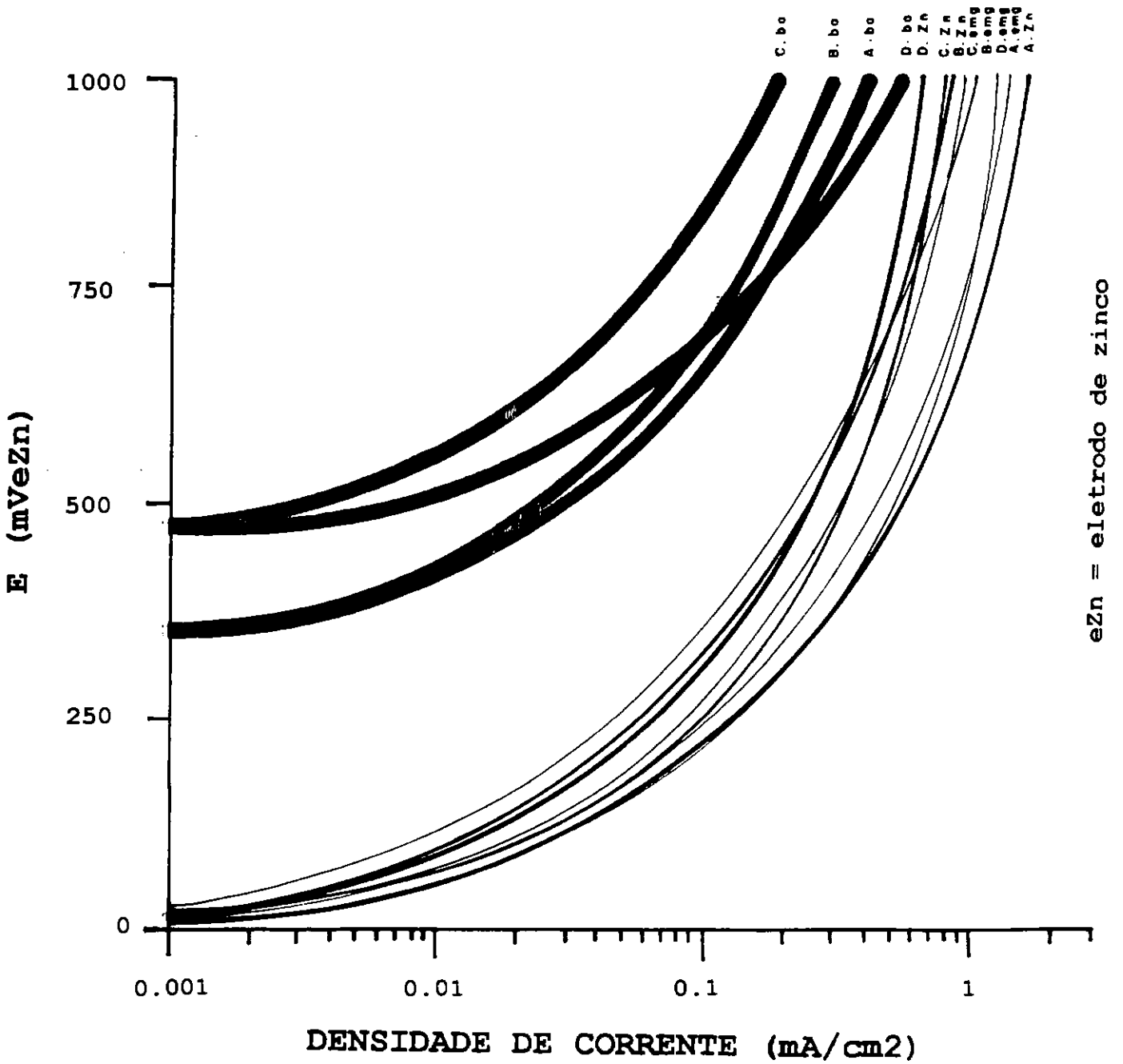


Fig. 3.9: curvas de polarização para ensaio no solo (umidade máxima)

Uma segunda série de ensaios de polarização diretamente no próprio solo (solos A e B), foram efetuados considerando as correções de queda ôhmica. Foram levantadas curvas anódicas e catódicas para os dois materiais, barra de aço nu - **ba** e elemento metálico galvanizado - **emg**. O procedimento para a correção da queda ôhmica foi o mesmo utilizado na correção dos ensaios em extratos aquosos. O valor para a cte de célula (K) de polarização no solo foi de $9{,}23 \times 10^{-3}$ cm^{-1}. Na tabela 3.10 apresentam-se os valores calculados da resistência dos eletrólitos.

ELETRÓLITO	RESISTIVIDADE (ohm.cm)	RESISTÊNCIA (ohm)
solo A na umidade máxima	17000	157
solo B na umidade máxima	10800	100
solo A na umidade ótima	61000	565
solo B na umidade ótima	81000	750

Tab. 3.10: resistência dos eletrólitos

As curvas estão plotadas nas figuras 3.10 e 3.11.

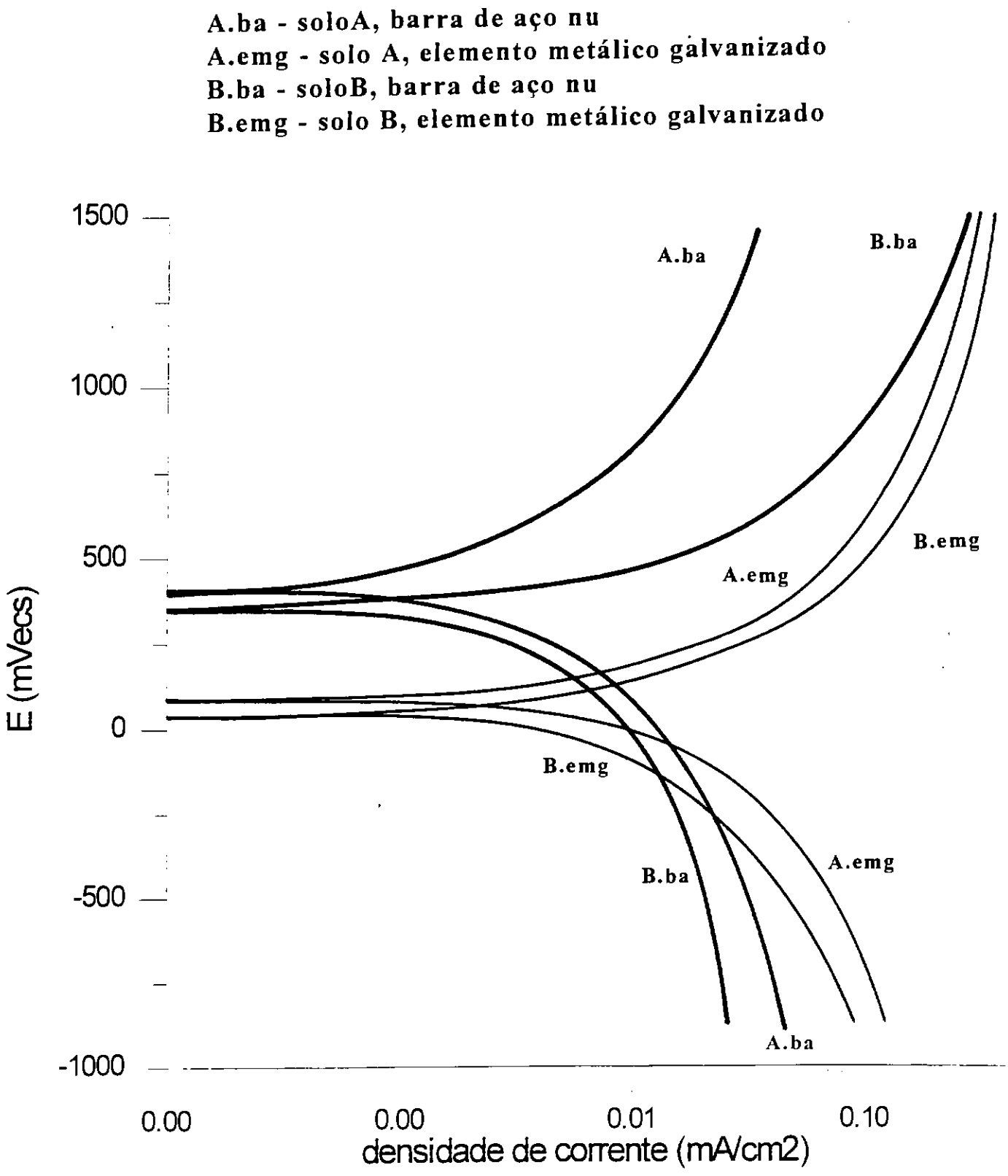


Fig. 3.10: curvas de polarização na umidade ótima com correção da queda ôhmica

A.ba - soloA, barra de aço nu
A.emg - solo A, elemento metálico galvanizado
B.ba - soloB, barra de aço nu
B.emg - solo B, elemento metálico galvanizado

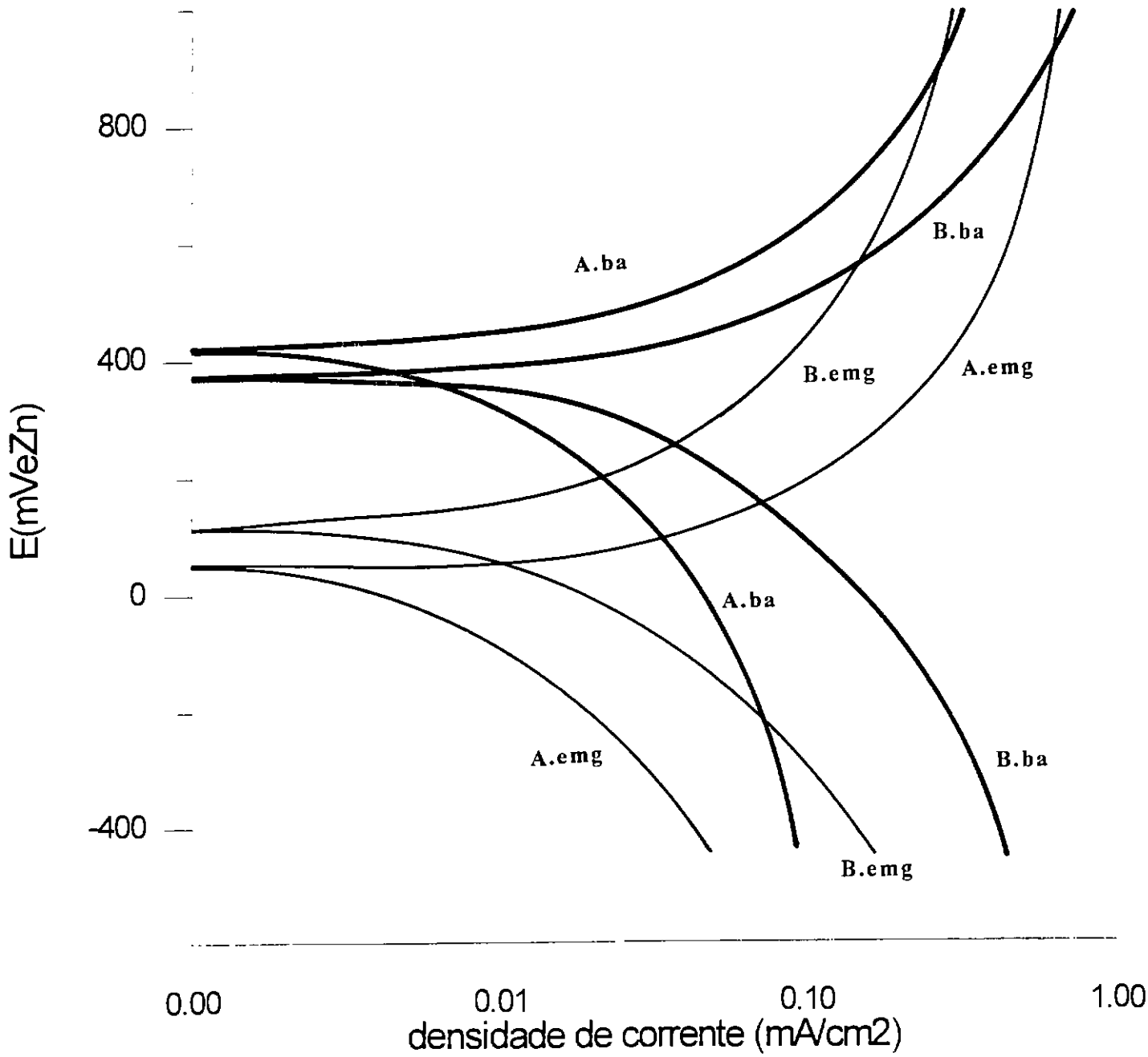


Fig. 3.11: curvas de polarização na umidade máxima com correção da queda ôhmica

3.5 - ESTUDOS DE CAMPO

Além dos estudos de laboratório, monitorou-se também, quanto à corrosão, um trecho em aterro reforçado com tiras metálicas da obra de construção da 2ª fase da Linha Vermelha (rampa de acesso). O local está situado próximo à entrada do Campus Universitário na Ilha do Fundão como mostra a fotografia 3.18.

Foto. 3.18: local dos estudos de campo

Foto do Autor

O solo utilizado para a execução do trecho reforçado foi o especificado como **SOLO A**, originário de uma jazida distante 50 km do local da obra, em Niterói e que deveria se apresentar em consonância com os padrões vigentes, também descritos anteriormente.

No período de construção da obra, fotografias 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22, foram instalados, em dois locais, sensores, fotografias 3.23, 3.24 e 3.25, para o acompanhamento da progressão da corrosão dos elementos metálicos galvanizados (emg).

O local 1 está situado sob o viaduto e é, portanto, protegido das chuvas, porém, os sensores estão à pequena profundidade (0,5 metros). Já o local 2 é mais exposto às intempéries, mas, o posicionamento dos sensores é mais profundo (5 metros).

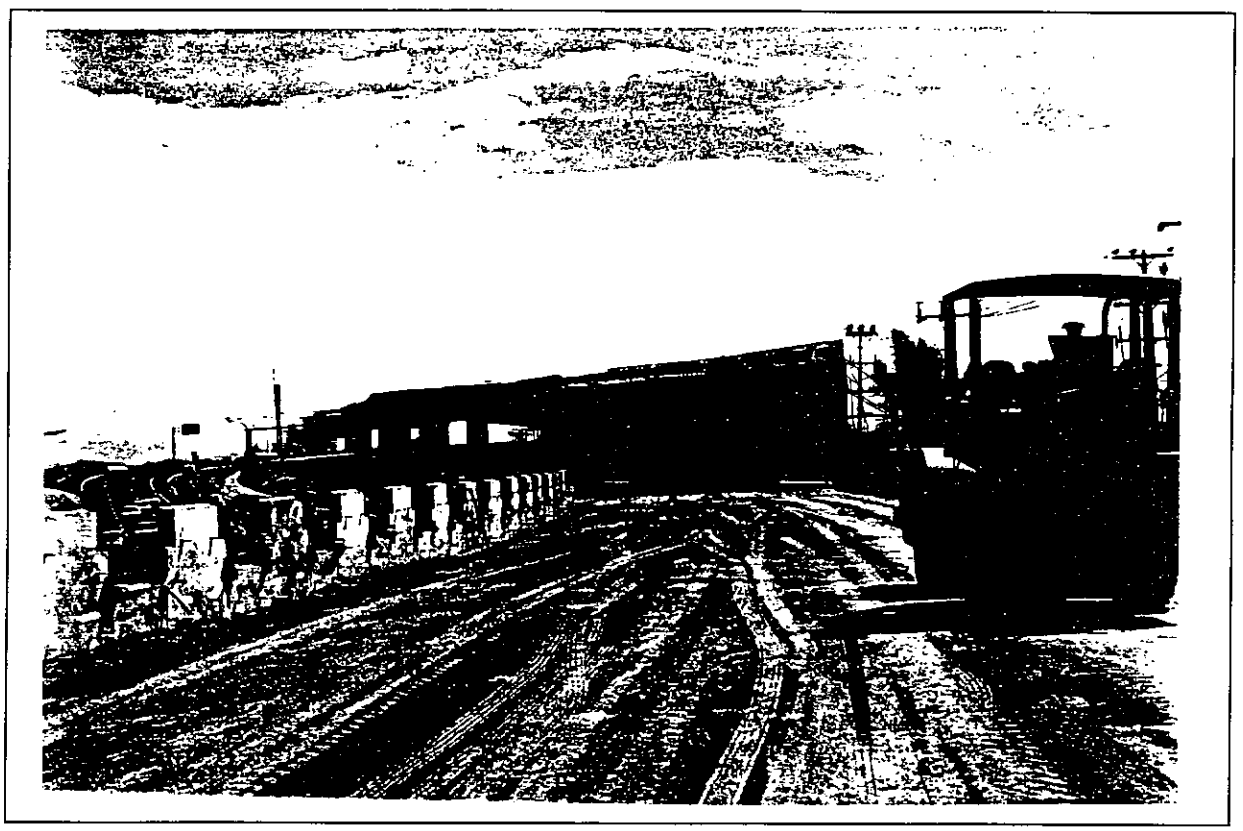


Foto. 3.19: compactação de camada de aterro sobre tiras metálicas

Foto do Autor

Junto a uma tira metálica, cuja superfície é protegida por uma película de zinco, foi adaptado um eletrodo de zinco puro, [barrete de zinco (Zn)] e uma pequena barra de aço carbono, [barra de aço nu (ba)], sendo o próprio solo o eletrólito do conjunto. Semanalmente, com o auxílio de um multímetro, foram realizadas leituras dessas três diferenças de potenciais: elemento metálico galvanizado - barra de aço nu (emg-ba), elemento metálico

galvanizado - barrete de zinco puro (emg-Zn) e barra de aço nu - barrete de zinco puro (ba-Zn), onde o aparecimento e progressão dessa ddp nos forneceram dados para acompanhamento do processo de corrosão que envolve o sistema solo x reforço.

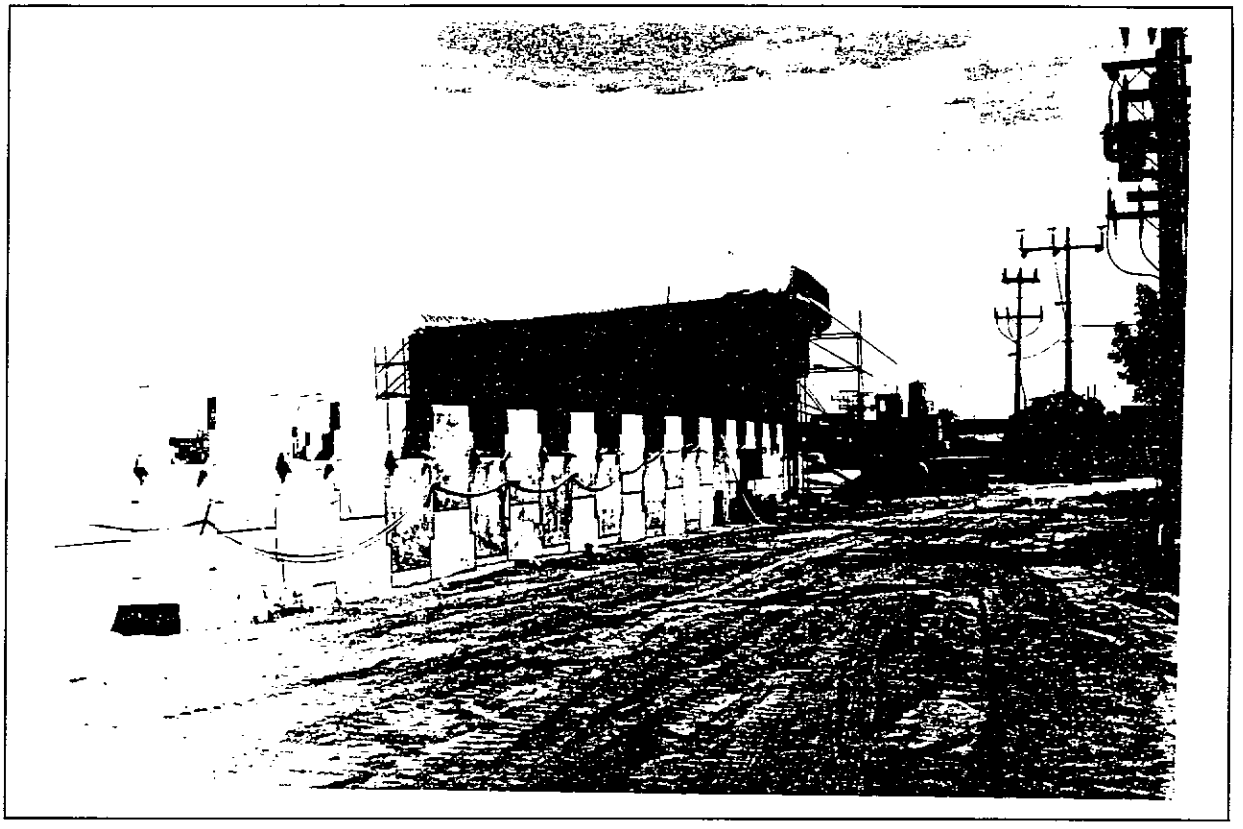


Foto. 3.20: vista lateral externa dos elementos de face

Foto do Autor

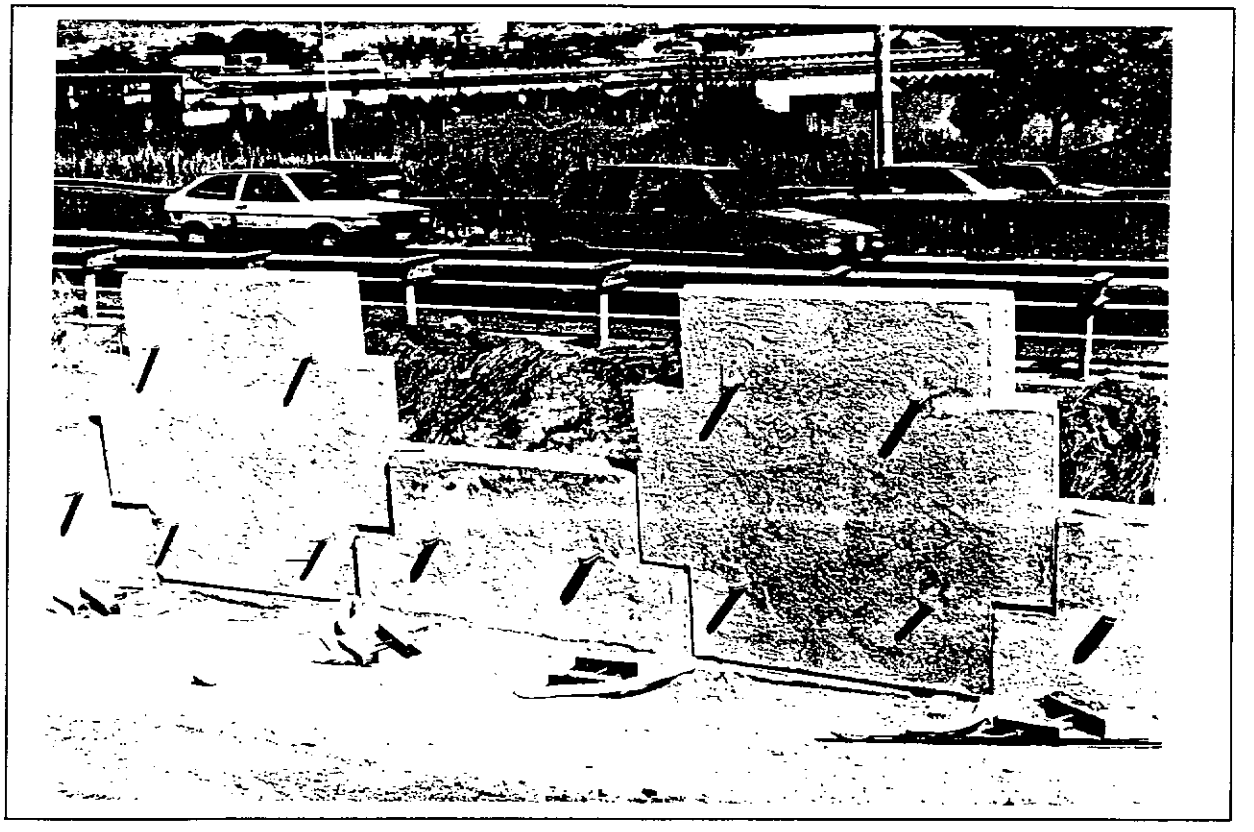


Foto. 3.21: pontos de fixação das tiras metálicas

Foto do Autor

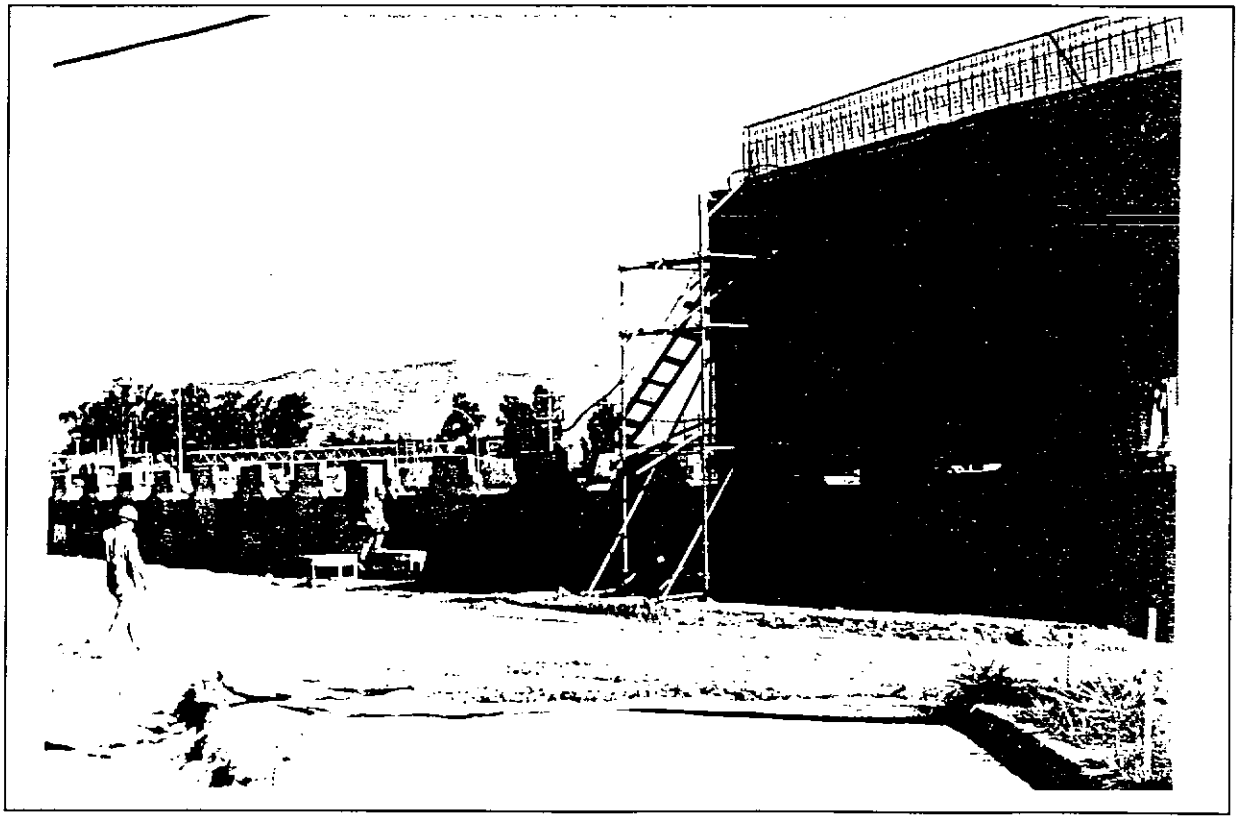


Foto. 3.22: local de instalação dos sensores

Foto do Autor

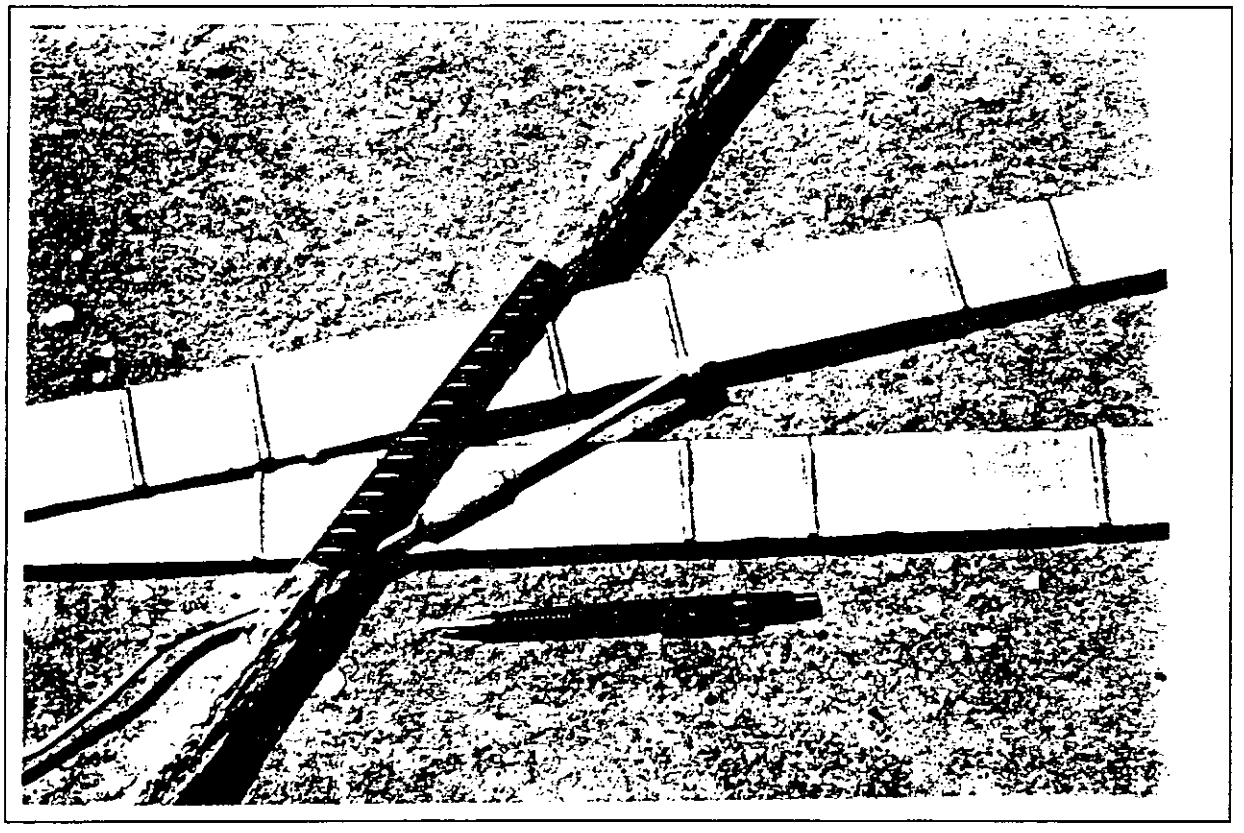


Foto. 3.23: detalhe dos sensores

Foto do Autor

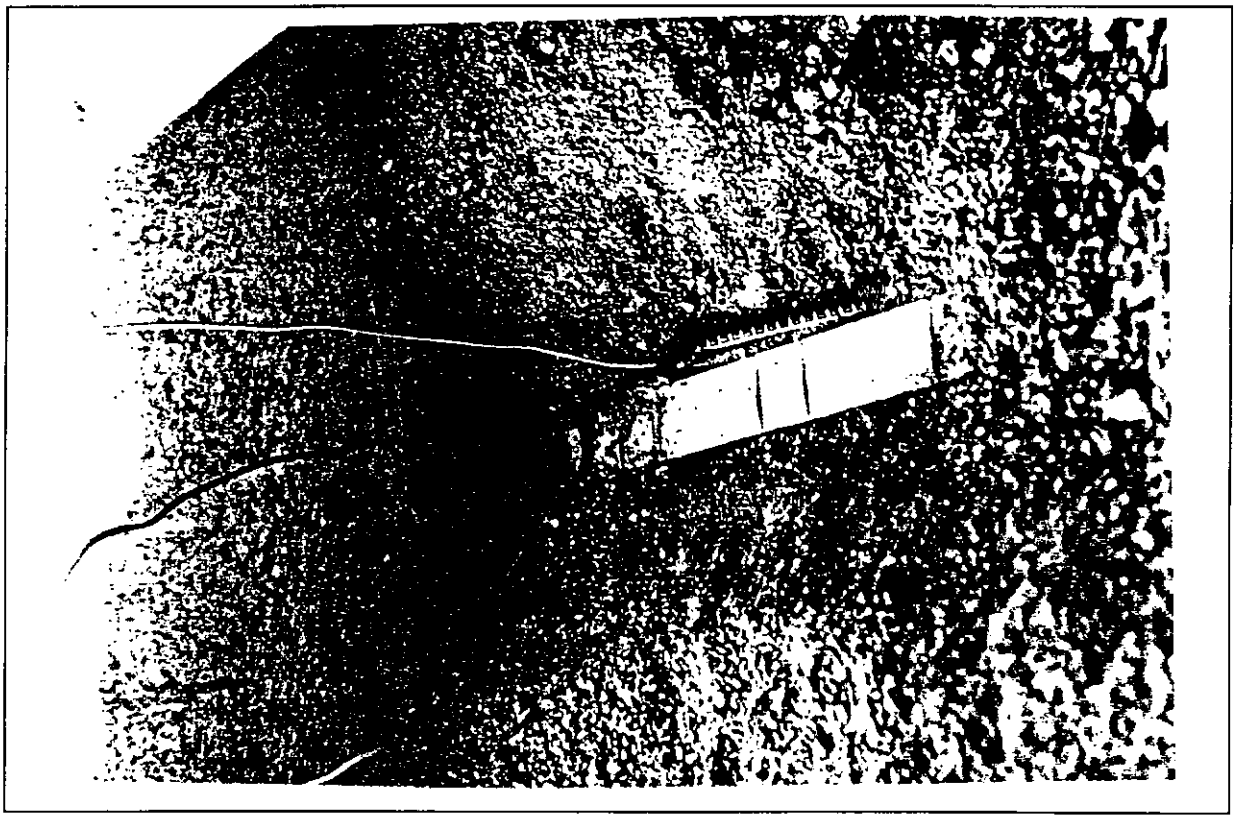


Foto. 3.24: detalhe da instalação dos sensores

Foto do Autor

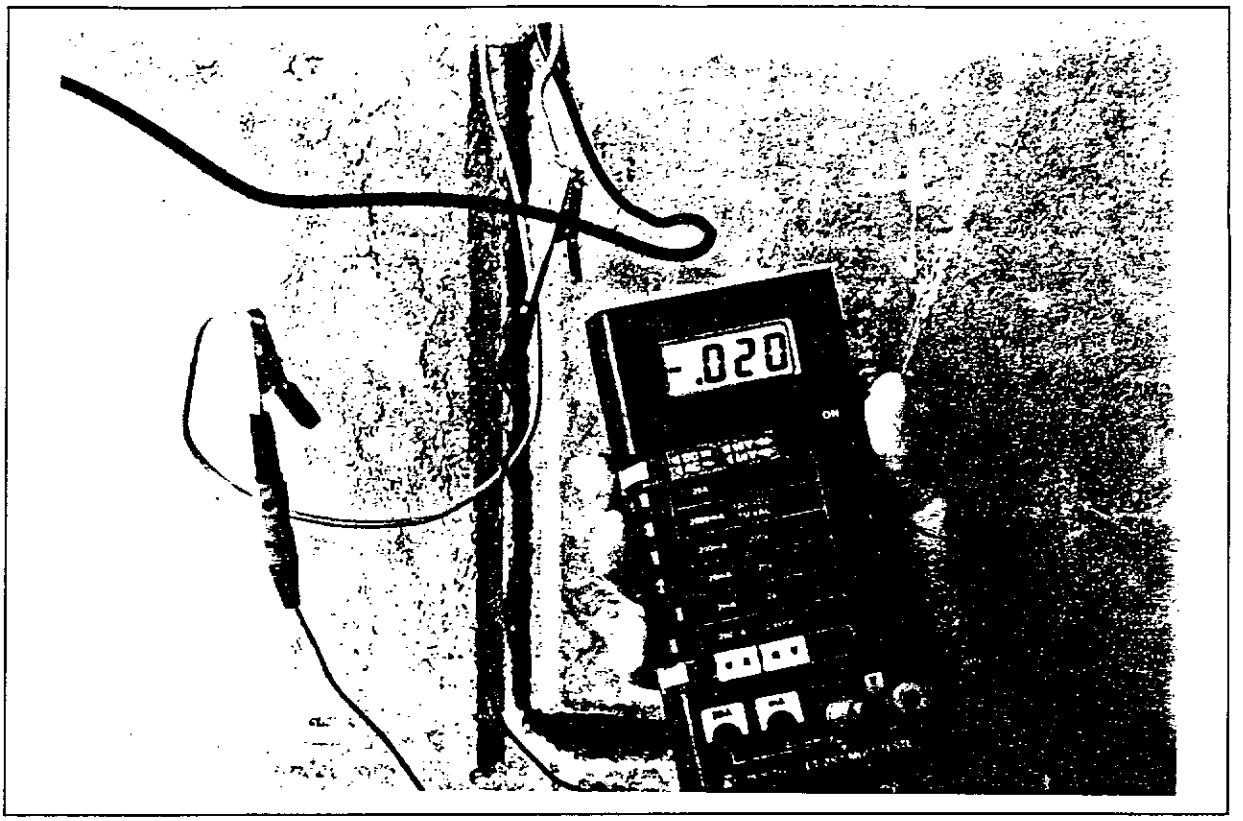


Foto. 3.25: leitura inicial das diferenças de potenciais

Foto do Autor

No início, logo após instalados os sensores, a ddp entre o (emg) e o (Zn) era praticamente nulo, visto que os dois corpos estavam recobertos com zinco, porém, com o passar do tempo essa cobertura de zinco no (emg) foi sendo removida pelo processo corrosivo, enquanto que no (Zn) era natural que sempre houvesse a presença do zinco. Assim uma ddp foi, progressivamente aparecendo e sendo influenciada também pelas situações climáticas e meteorológicas ocorridas no local. Pôde-se, desta forma, monitorar o processo de corrosão da tira metálica.

Na figura 3.12 estão plotadas as curvas referentes à progressão da diferença de potencial em função do tempo, entre os três elementos metálicos imersos no eletrólito SOLO A, "in situ".

As fotografias 3.26, 3.27 e 3.28 mostram a fase final da obra da Linha-Vermelha construída em solo reforçado com elementos metálicos.

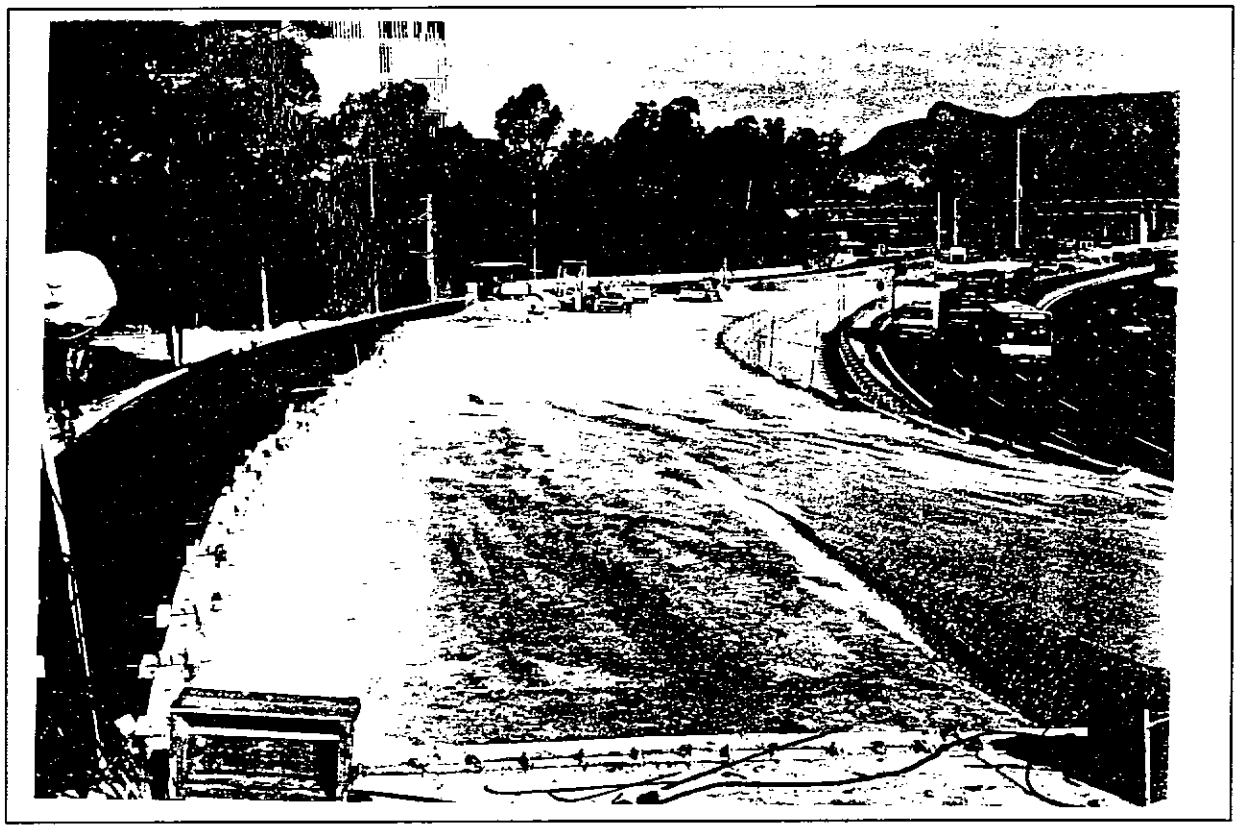


Foto. 3.26: finalização do aterro reforçado

Foto do Autor

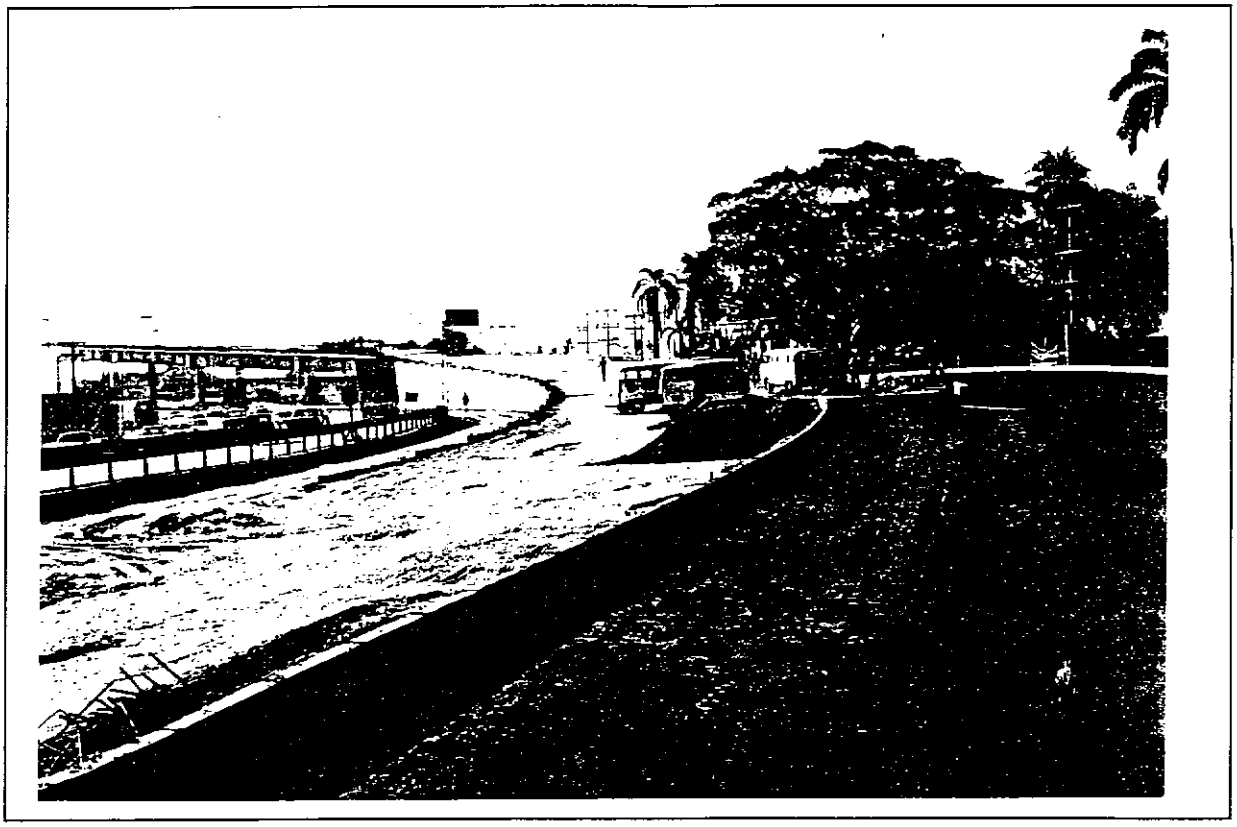


Foto. 3.27: fase final da obra

Foto do Autor

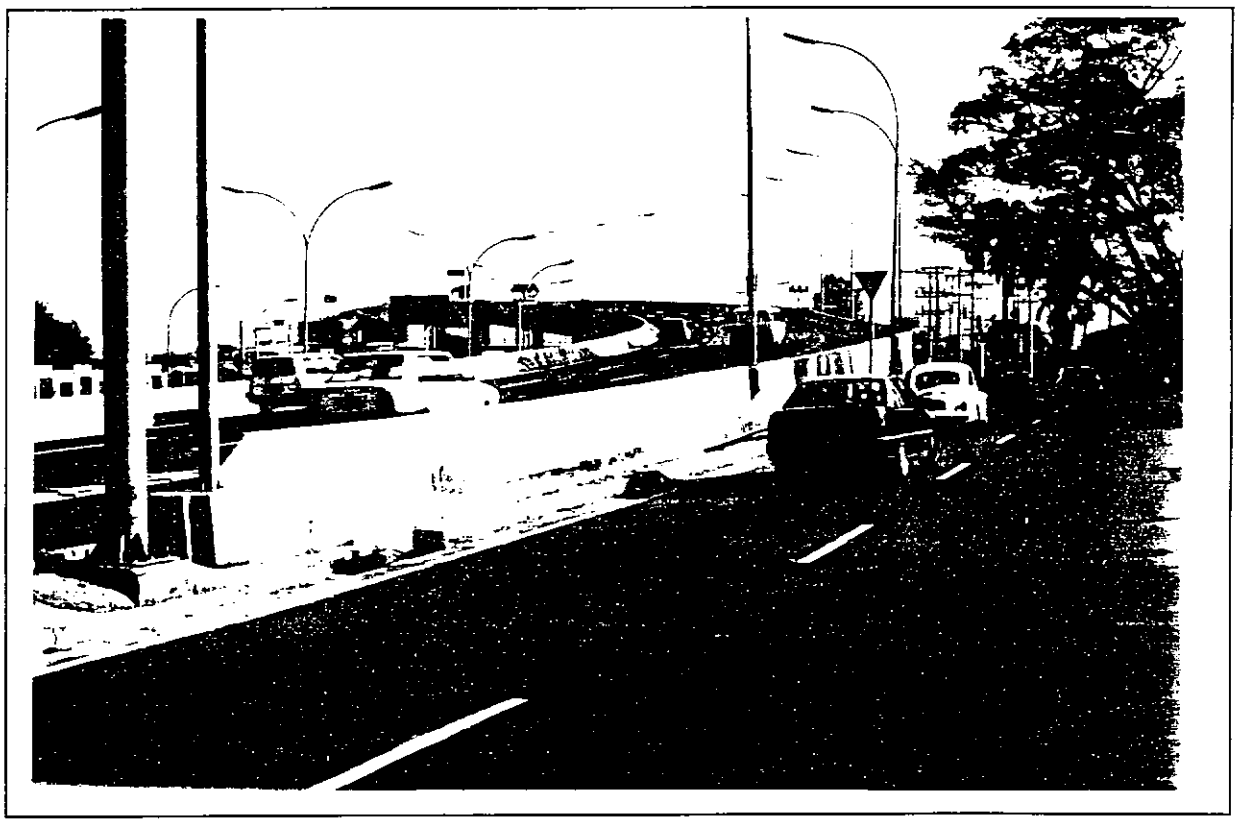


Foto. 3.28: obra realizada e em funcionamento

Foto do Autor

ESTUDOS DE CAMPO

Zn = barrete de zinco

ba = barra de aço carbono

emg = elemento metálico galvanizado

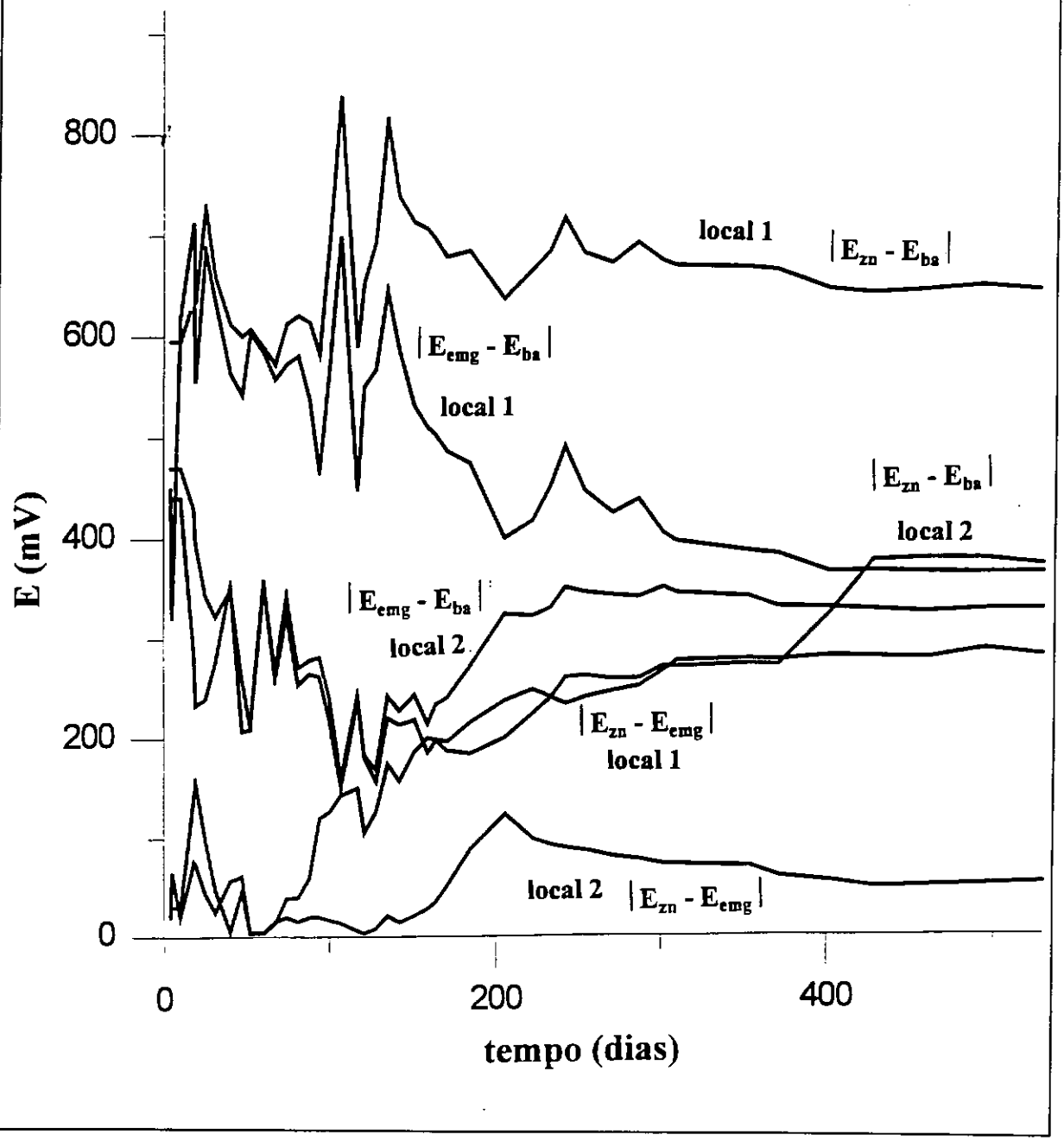


Fig. 3.12: curva E (mV) X tempo (dias)

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Capítulo 4

A tabela 4.1 mostra uma identificação e classificação geral dos solos estudados. bem como os parâmetros recomendados para o solo tomado como padrão.

	S	O	L	O	S
	PADRÃO (*)	(A)	(B)	(C)	(D)
MINERALOGIA		ilita, haloisita caulinita, mica, quartzo, feldspato	caulinita, quartzo, feldspato	ilita, caulinita, haloisita, quartzo, feldspato	ilita, (vermiculita), caulinita, mica, quartzo, feldspato
SiO_2 (%)		11,7	19,9	19,1	17,4
Al_2O_3 (%)		11,3	23,4	14,6	12,3
Fe_2O_3 (%)		2,02	6,40	2,50	3,30
Ki		1,76	1,45	2,22	2,41
Kr		1,57	1,23	2,00	2,05
Resíduo (%)		66,59	37,98	53,72	53,90
ΔP (%)		4,10	9,60	5,70	5,40
umid. máxima(%)		30,0	45,0	30,0	35,0
umid. ótima (%)		12,1	21,4	8,13	11,3
massa esp. seca (g/cm^3)		1,83	1,66	2,01	1,95
dens. real dos grãos		2,64	2,68	2,67	2,70
LL		não plástico	64	51	não plástico
LP		não plástico	23	20	não plástico
< N° 4 (%)	100	75	98	95	96
< N° 40 (%)	0 - 60	33	83	55	62
< N° 200 (%)	0 - 15	20	63	45	28
pH	4,5 < pH < 9,5	5,10	4,60	4,55	4,96
cloretos (ppm)	< 200	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
sulfatos (ppm)	< 1000	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05

Tab. 4.1: identificação e caracterização completa

resistiv. na umid. máx.	> 1000 ohm.cm	17000	10800	6320	12400
resistiv. na umid. ótima		61000	81000	45000	74000
resistiv. na umid. zero		2210000	2520000	2150000	2250000
ϕ (graus)		32	32	37	38
c (kPa)		12	18	28	39

Tab. 4.1: identificação e caracterização completa

(*) - MITCHELL & VILLET (1987)

Discutem-se a seguir os resultados encontrados:

a) Mineralogia

Os solos analisados são constituidos, basicamente, dos mesmos minerais e argilo-minerais. Suas composições mineralógicas não têm grande diferenciação, o argilo-mineral predominante nos quatro solos é a caolinita.

b) Caracterização Geotécnica

De acordo com a Classificação Unificada os solos A, B, C e D são respectivamente SW (areia pedregulhosa com pouco fino), MH (solo siltoso), SC (areia argilosa) e SP (areia mal graduada com pouco fino), sendo os solos A e D considerados como não plásticos. Quanto à análise granulométrica pode-se notar que o solo A é o que mais se aproxima dos valores recomendados, embora exceda em 5% a quantidade de finos e em 25% a de material grosso. Os demais solos apresentam-se dentro da faixa especificada para areias e pedregulhos, mas, excedem em muito o limite de finos tolerado.

c) Estudos Físico-Químicos

Os resultados obtidos mostram que os quatro solos se apresentam dentro da faixa considerada padrão em termos de pH, cloretos e sulfatos. Os solos estudados variam bastante em relação às suas umidades ótima de compactação e máxima de saturação, no entanto,a resistividade elétrica destes, nas diferentes condições pesquisadas, atendem com folga aos

limites considerados adequados. (mesmo quando a medida da resistividade foi realizada na umidade máxima de saturação); o fato de a resistividade de alguns solos serem maiores que a de outros para uma determinada umidade e menores para outra se deve, possivelmente, à maior ou menor dissociação de íons dos mesmos em função da presença de água. Quanto ao grau de laterização verifica-se a remoção da sílica coloidal e o enriquecimento em ferro e alumina. Estes solos podem ser considerados pouco a medianamente laterizados, não apresentando grande diferenciação entre si. O argilo mineral é predominantemente caulinita.

d) Resistência ao Cisalhamento

Conforme verificado, os parâmetros de resistência dos solos B, C e D são superiores aos do solo A (utilizado na rampa de acesso), apesar da maior percentagem de finos presentes nestes solos.

As trajetórias de tensão, figura 3.4, são típicas de materiais pré-adensados, como é de se esperar em solos compactados. Este comportamento se verifica mesmo sob pressões de 200 kPa, equivalente a aterros com cerca de 20m.

Os solos, quando pré-adensados sob condições drenadas, têm um comportamento dilatante quando cisalhados. Este comportamento leva a um aumento da resistência ao arrancamento, no caso de reforços sob a forma de tiras e grelhas, em virtude do aumento que tal efeito gera na tensão normal de contato solo x reforço. Esta tendência dilatante é maior nos solos C e D.

Sob condições não drenadas o comportamento dilatante é também favorável, pois, tal tendência leva ao aumento da resistência ao cisalhamento pela diminuição das poro pressões, vide figura 3.3.

e) Corrosividade.

Ao ser aplicada uma polarização anódica sobre o eletrodo de trabalho, os metais tenderam a se corroer, alguns com mais facilidade que os outros, em função dos eletrólitos a que estavam imersos.

O fato de as curvas referentes às barras de aço nu "ba" (aço carbono sem galvanizado), terem um potencial eletroquímico superior é devido à condição de terem maior dificuldade de

liberarem cargas elétricas se comparadas ao zinco. O aço tem um comportamento mais nobre que o zinco na escala de potenciais.

Percebe-se, através das curvas de polarização, que o barrete de zinco "Zn"(zinco puro) e o elemento metálico galvanizado "emg"(tira metálica padrão Terra Armada), possuem um potencial de corrosão mais ativo (mais negativo) que as "ba". Ao polarizar-se nota-se uma tendência à dissolução uniforme e para grandes polarizações uma corrente limite, provavelmente devida a transporte de massa.

O comportamento do "emg" situa-se numa situação intermediária ente o "Zn" e a "ba", estando este comportamento condicionado à qualidade do revestimento das tiras metálicas. Quanto melhor este revestimento mais o emg's se aproxima do "zn" e quanto pior, mais se assemelhará à "ba".

O que se pôde concluir é que não houve diferenças marcantes, do ponto de vista de corrosividade, entre o solo utilizado na rampa de acesso, solo A e os alternativos B, C e D. As curvas referentes ao solo A não se destacam das demais, seja para o emg", "ba" ou "Zn".

Quanto à polarização realizada diretamente no solo pôde-se notar que o formato das curvas de polarização anódica e catódica são semelhantes às do ensaio em extrato aquoso convencional, com tendências à dissolução generalizada e sem diferenças significativas entre os quatro solos estudados.

Embora a resistividade dos solos variem conforme verificado, tanto nos extratos aquosos quanto nos solos propriamente dito, uma segunda série de ensaios com correção de queda ôhmica não modificou significativamente a forma das curvas de polarização tanto em solo como em extrato aquoso. Tal comportamento se deve às pequenas correntes existentes antes de se atingir a corrente limite. Uma explicação possível para tais resultados poderia se basear no fato de que sendo os solos materiais de naturezas distintas, ocorreriam diferentes dissoluções de formas iônicas que reduziriam esta queda ôhmica nos extratos aquosos. Nos solos úmidos (máxima e ótima) isto poderia estar ocorrendo na interface do metal e nos solos secos as altas resistividades inibiriam as possíveis corrosões. De toda maneira, estudos mais aprofundados sobre esta questão são pertinentes.

Assim, com base nos ensaios de resistência e de corrosividade efetuados, conflitantemente com os padrões pré-estabelecidos, os solos residuais analisados, apesar da

elevada percentagem de finos. demonstram serem igualmente adequados à utilização em obras de solo reforçado com elementos metálicos.

f) Estudos de Campo.

A figura 3.10, E (mV) X tempo (dias), mostra que, no início das leituras, em torno dos 100 dias, os sensores (metais) se comportavam de maneira irregular, onde aparecem picos muito acentuados nas curvas, provavelmente devido às intempéries, movimentações e instabilidades ocorridas no local da obra ainda inacabada.

Com o decorrer de um ano pôde-se notar uma tendência à linearidade das curvas que caminham para uma estabilização do sistema solo X metal. Os resultados de leitura e plotagem de pontos na figura 3.10 assinalam, pela horizontalidade das curvas, que nenhuma incoerência está ocorrendo com os metais envolvidos neste sistema, porém, o tempo de um ano e meio ainda não é suficiente para que se chegue a uma conclusão definitiva a respeito da qualidade do galvanizado existente sobre as tiras metálicas numa situação real para um tempo indeterminado.

O fato de serem realizadas medidas eletroquímicas de potencial em vários pontos de uma estrutura metálica permite um monitoramento da mesma, de maneira que um controle durante longos períodos de tempo pode ser efetuado utilizando-se como base as transformações dessas leituras em gráficos que possam ser enviados, seja através de fax, rede, etc., dos mais distantes locais a seus respectivos laboratórios de análise.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Capítulo 5

Esta pesquisa parece indicar que os padrões vigentes estabelecidos pela tecnologia de solo reforçado com elementos metálicos são desnecessariamente rigorosos no que diz respeito às especificações do material de aterro quando afirma que este deva ser granular.

Quatro diferentes solos residuais oriundos de região de clima tropical com diferentes porcentagem de finos foram estudados. Os resultados obtidos, mesmo no caso dos solos com elevada percentagem de finos apresentaram bons resultados, seja sob o aspecto mecânico, seja sob o ponto de vista da corrosão.

Estes resultados salientam que os padrões desenvolvidos em países de clima temperado não devem ser prontamente extrapolados para obras de geotecnia em regiões tropicais.

Recomendações para futuras pesquisas incluem estudos de campo e laboratório envolvendo solos tropicais de diferentes origens pedogenéticas visando melhor embasar as indicações obtidas nesta pesquisa É importante verificar, além do comportamento mecânico, a influência, sob ponto de vista de corrosão, de fatores geoambientais, tais como aeração, saturação e a presença de materiais solúveis na água nos resultados. Tais estudos são fundamentais para o embasamento de recomendações visando o uso destes tipos de solos em projeto.

CARACTERIZAÇÃO DAS TIRAS METÁLICAS

Anexo I

Dimensões: 40mm x 4mm e 60mm x 4mm

Material: aço SAE 1020 com fy = 240 MPa

Revestimento: todas as armaduras são zincadas por imersão em zinco fundido. A espessura mínima da camada de zinco é de 70 micras ou 5 g/dm^2.

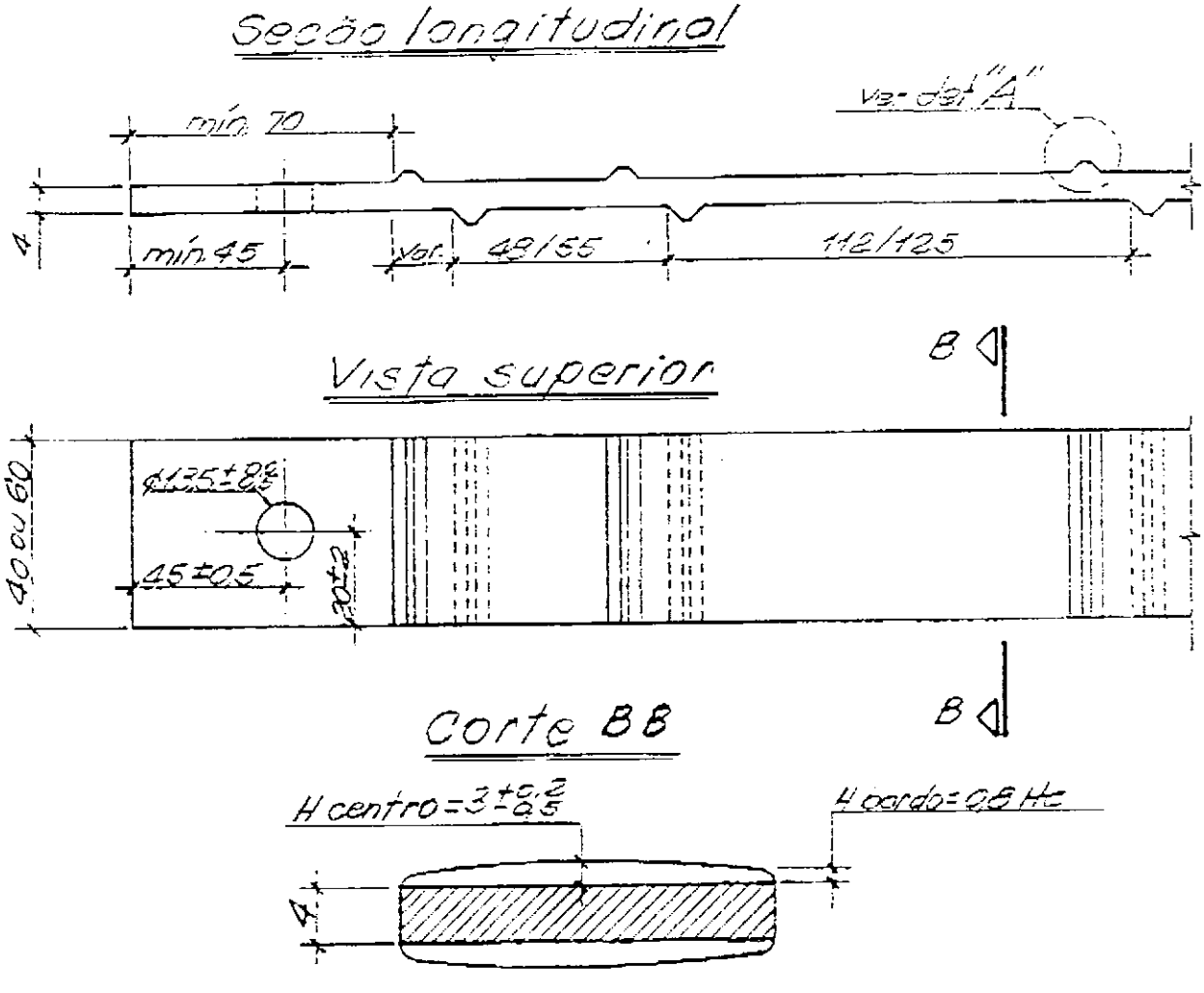


Fig. I - 1: características geométricas dos elementos metálicos galvanizados

Nas figuras II - 1 e 2 apresentam-se esquemas das células eletroquímicas utilizadas nos ensaios de polarização em extrato aquoso e em solo, respectivamente, bem como a disposição dos eletrodos de trabalho, referência e contra-eletrodo.

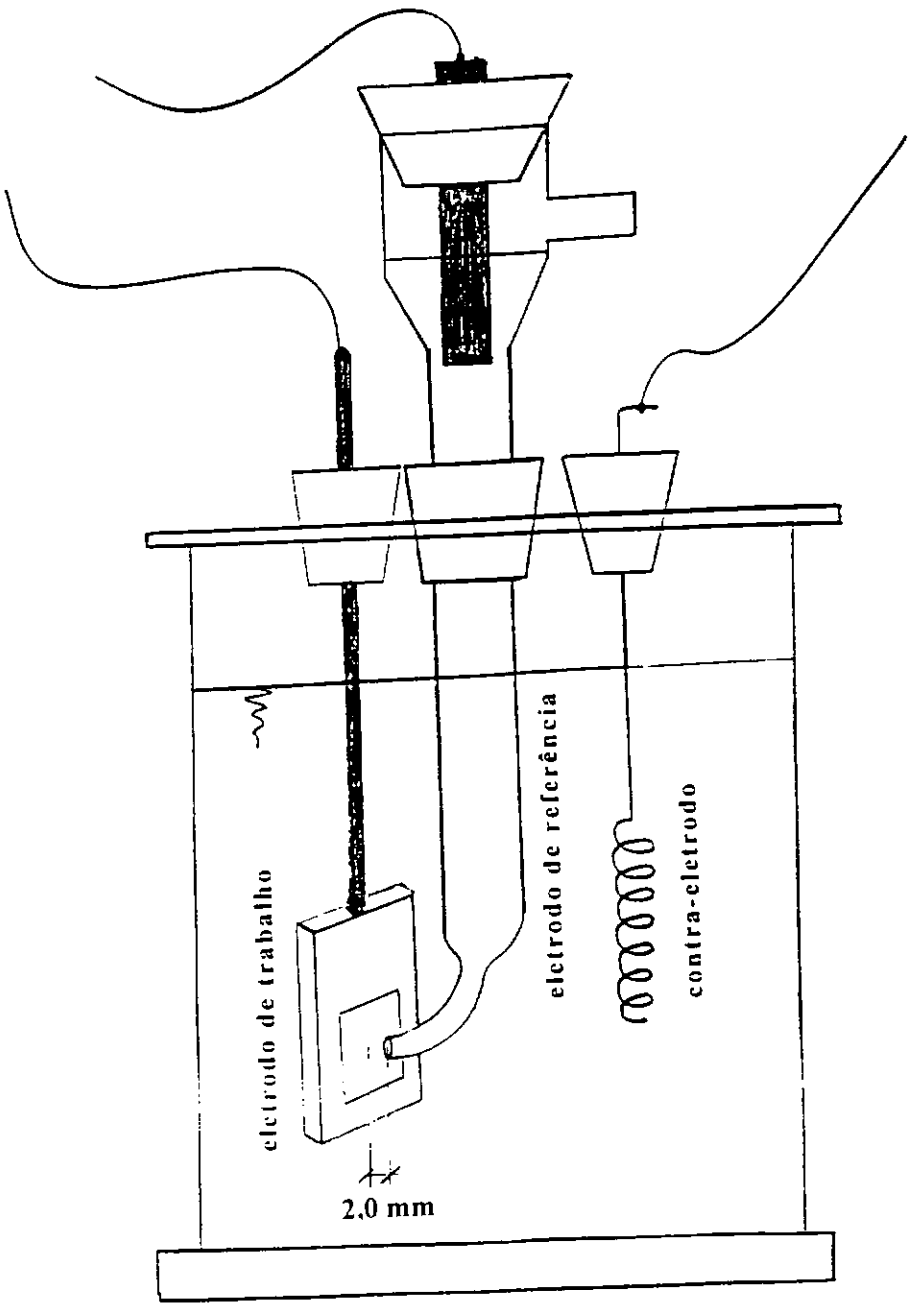


Fig. II - 1: a célula eletroquímica utilizada na polarização em extrato aquoso dos solos

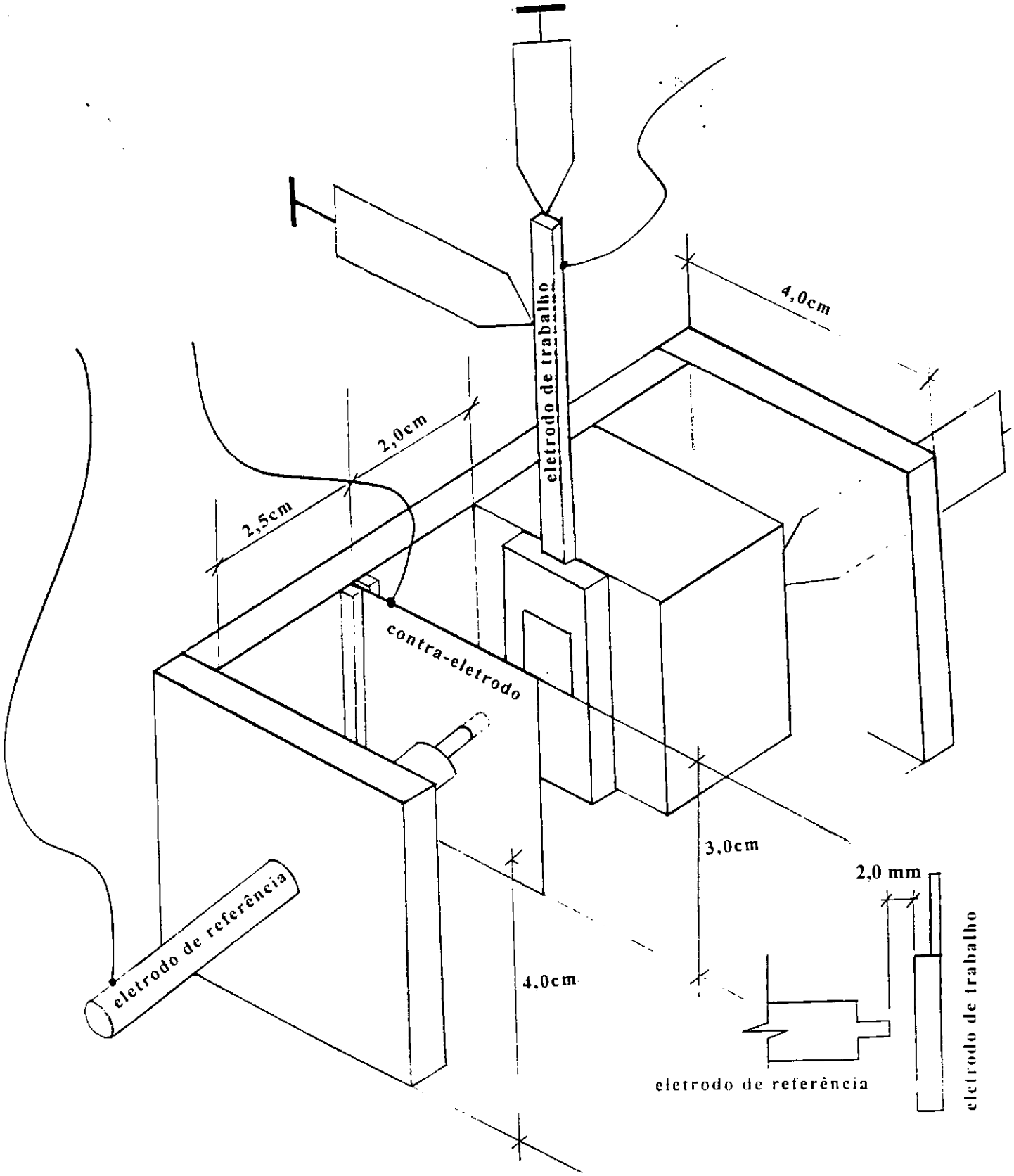


Fig. II - 2: a célula eletroquímica utilizada na polarização diretamente no solo

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BISHOP. A. W. e HENKEL. D. J. - "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test". Edward Arnold (Publishers) LTD. London. 1962.

BLIGHT. G. E. e DANE. M. S. W. - "Deterioration of a Wall Complex Constructed of Reinforced Earth". Geotechnique 39. No 1. 47 - 53. 1989.

CHISTROPHER. B. R.. GILL. S. A.. GIROUD. J. P.. JURAN. I.. MITCHELL. J.. SCHIOSSER. F. and DUNNICLIFF. J. - "Design and Construction Guidelines for Reinforced Soil Structures". V. 1. Report N° FHWA-RD-89-043. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation. 1990.

CLEMENTINO, R. V. - "Características dos Solos Coluvionares e Residuais de Granito do Escorregamento da Rua Licurgo, RJ", Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, 1993.

CRAVO, M. R. T. - "Corrosão e Proteção de Armaduras de Ancoragem", Seminário 217, Min. da Hab. e Obras Públicas. LNCE. Lisboa, Março de 1979.

DARBIN. M.. JAILLOUX. J. M.and MONTUELLE. J. - "Performance and Research on the Durability of Reinforced Earth Reinforcing Strips". ASCE Symposium on Earth Reinforcement. Pittsburgh. Penn. pp. 305 - 333. 1978.

DUTRA. A. C. e NUNES. L. P. - "Proteção Catódica. Técnica de Combate à Corrosão". Ed. Tecn.. 1977.

EHRLICH. M. e MITCHELL. J. K. - "A Working Stress Analysis for Reinforced Soil Walls". Journal of Geotechnical Engineering.. ASCE. 1990.

EHRLICH. M. e MITCHELL. J. K. - "Working Stress Design Method for Reinforced Soil Walls". JGD. ASCE. V. 120. N° 4. Abril 1994.

EHRLICH. M. e SILVA. L. F. M. - "Sistema de Contenção de Solos Reforçados". Anais da 1ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - Rio de Janeiro. 1992.

GENTIL. V. - "Corrosão". 2ª edição. Ed. Guanabara Dois. Rio de Janeiro. RJ. 1982.

HEAD. K. H. - "Manual of Soil Laboratory Testing". Pentech Press Limited. London. V. 3. 1986.

KING. R. A. - "Corrosion in Reinforced Earth. Reinforced Earth and Other Composite Techniques". TRRL Supplementary Report 457. Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne. Berkshire. England. 1977.

KULLMAN. F. E.. Corrosion. V. 9. November 1953. in: Fontana. M. G.. and Greene. N. D. - "Corrosion Engineering". McGraw-Hill. 1978.

LAMBE. T. W. - "The Engineering Behavior of Compacted Clays". ASCE Proceding paper 1655. 1958. Em Seed at al. 1960.

MAIOLINO. A. L. G. - "Resistência ao Cisalhamento de Solos Compactados: Uma Proposta de Tipificação". Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ. 1985.

MARSAL. R. J. e FUENTES DE LA ROSA. A. - "Mechanical Properties of Rocfill-Soil Mixtures". Proc. XII ICOLD. México. 1976.

MELLO. V. F. B. - "Thoughts on Soil Engineering Applicable to Residual Soil". Proc. from the 3rd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Hong Kong, pp. 5 - 34, 1972.

MENDOZA, M. J. - "Remolding and Drying Effects upon Plasticity Limits of Residual Soil", 1st International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soil - TropicaLS'85, Brasil, V. 1, pp. 145 - 155, 1985.

MITCHELL. J. K. - "Fundamentals of Soil Behavior". University of California. Berkeley, John Wiley & Sons. In.. 1st ED.. 1976.

MITCHELL. J. K. e VILLET. W. C. B. - "Reinforcement of Slopes and Embankments". NCHRP Report Nº 270. TRB. 1987.

PALMEIRA. E. M. - "Estabilização e Reforços de Solos". ENC/FT/UnB. 1993.

PINTO. S.. - "Algumas Considerações Sobre a Compressibilidade de Solos Não Saturados". 1988.

POURBAIX. M. - "Lições de Corrosão Eletroquimica"- Publicação CEBELCOR. Bélgica. 1987.

ROMANHOFF. M. - "Underground Corrosion". NBS Circular 579. April 1957. National Bureau of Standard.

SCHAWERDTFEGER. W. J.. and Mc Dorman. O. N. - "Measurement of the Corrosion Rate of a Metal from its Polarizing Characteristics". J. Eletrochemical Society. V. 99. p. 407. 1952.

SEBRÃO, M. Z. e ARAÚJO, M. M. - "Avaliação da Corrosão em Fundações de Torres de Linha de Transmissão", CEPEL, 1992.

SERRA, E. T., et al. - "Determination of Corrosion Rate on Soils by Eletrochemical Methods", Procedings 7th International Congress on Metallic Corrosion, V. 3, p. 1920, 1979.

SERRA, E. T. - "Corrosão pelo Solo - Fatores que Influenciam, Técnicas de Avaliação e Sistemas de Proteção", Revista Eletricidade Moderna, pp. 28 a 36, 1982.

SERRA, E. T. - "Deterioração do Concreto Armado Devido à Corrosão do Aço", IV Colóquio de Corrosão no Setor Elétrico, CEPEL, 1992.

SILVA, P. F. - "Introdução à Corrosão e Proteção das Superficie Metálicas", Ed. UFMG, Belo Horizonte, MG, 1981.

STANDARD REFERENCE METHOD for Making Potentiostatic and Potentiodinamic Anodic Polarization Measurements - Norma ASTM G5 - 72.

TAYLOR, D. W. - "Fundamentals of Soil Mechanics", John Willy & Sons, New York, 5ª Ed., 1948.

TOMASHOV, N. D. and MIKHAILOVSKY - "Corrosivity of Soils", Corrosion , V 15, p. 777 February, 1959.

TRABANELLI, G. et al - "Methods of Determination of Soil Corrosiveness with Respect Metallic Structures", Universita de Ferrara, Sezione V, V 3, nº 4, 1972.

VARGAS, M. - "Geotécnica dos Solos Residuais", Revista Latino-Americana de Geotecnia, V. 1, nº 1, pp. 20 - 41, 1971.