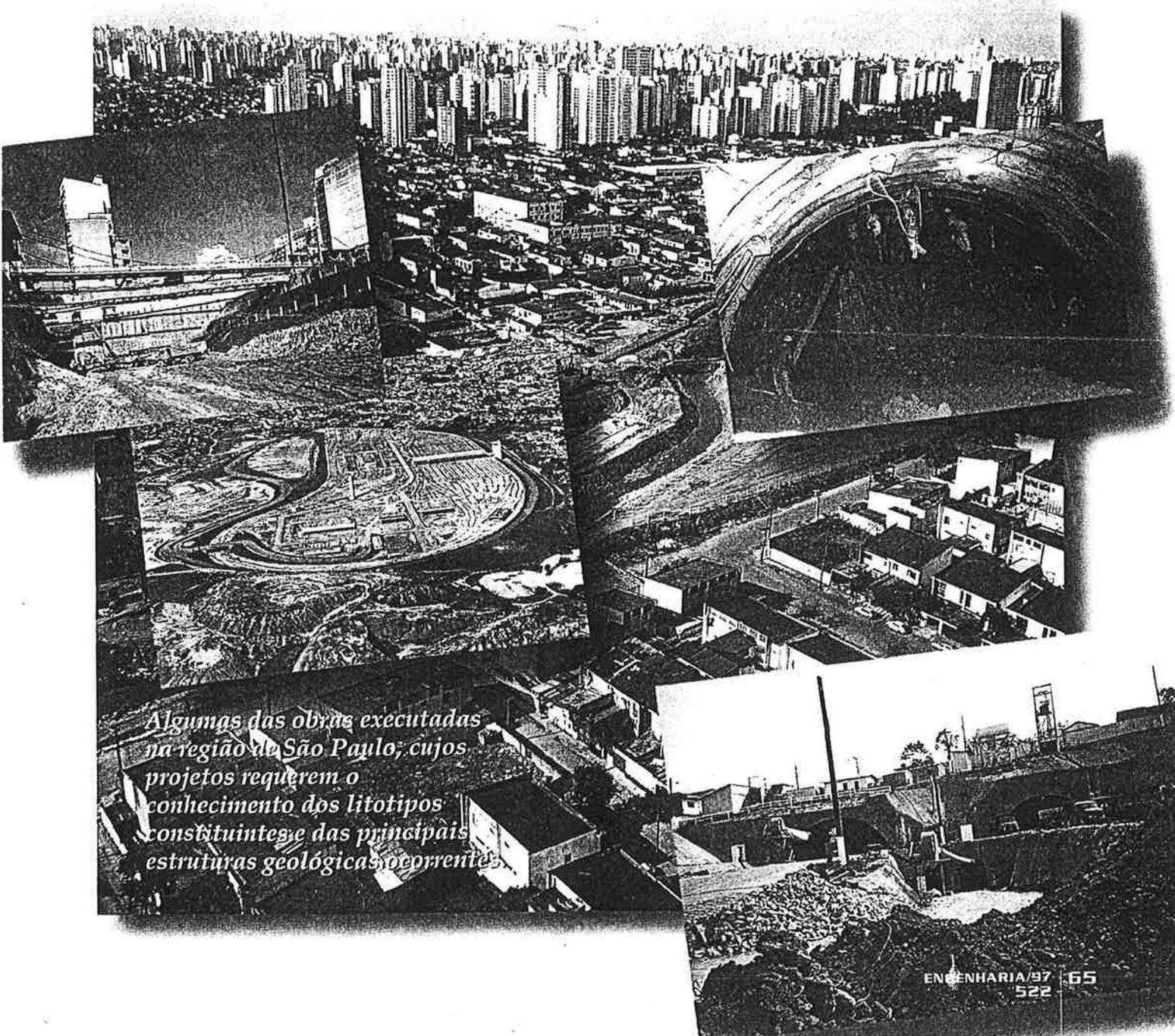


**Contribuição
para o conhecimento
geológico-geotécnico
da bacia de**
SÃO PAULO

**litotipos, notação
estratigráfica e feições
estruturais relevantes**

ARNALDO SÉRGIO KÜTNER* - ALFREDO J.S. BJORNBERG**

MECÂNICA DOS SOLOS E FUNDAÇÕES



*Algumas das obras executadas
na região de São Paulo, cujos
projetos requerem o
conhecimento dos litotipos
constituintes e das principais
estruturas geológicas ocorrentes.*

INTRODUÇÃO

O presente trabalho se constitui em modesta contribuição à área da Engenharia Geotécnica para uma melhor compreensão dos sedimentos da Bacia Terciária de São Paulo, de um lado, no que se refere à sua constituição litológica e, de outro, enfocando-se determinadas propriedades estruturais de grande interesse àquela área de conhecimento. Isto foi possível graças à experiência acumulada pelos autores em projetos e no desenvolvimento de obras executadas nesta área para diversos fins.

Não se tem aqui a pretensão de alterar modelos já estabelecidos e de uso consagrado (11,26, 27), nem modificar conceitos classificatórios que já vem sendo adotados na prática geotécnica, assim como não se objetiva introduzir qualquer revisão de conceitos acadêmicos existentes (8, 10, 20, 24). A finalidade precípua deste trabalho é a de apresentar, além de uma classificação com nomen-

clatura objetiva, de fácil e rápida aplicação aos materiais geológicos, tanto aos constituintes das várias unidades sedimentares constituintes da bacia de São Paulo, como dos subjacentes, algumas considerações sobre feições estruturais presentes nestes materiais, feições estas julgadas de interesse aos projetos de Engenharia que ai se desenvolvam.

A elaboração deste trabalho foi motivada, em primeiro lugar, pela dificuldade encontrada nas consultas e análises dos perfis geológicos de áreas da cidade de São Paulo, os quais apresentam, devido à grande complexidade e multiplicidade de nomenclaturas, uma profusão de unidades estratigráficas que se reflete, em primeiro lugar, na grande disparidade entre suas sequências verticais e continuidades laterais; isto, evidentemente, impede o estabelecimento de correlações e até mesmo a simples detecção e visualização objetiva, tanto dos horizontes estratigráficos presentes, como até mesmo das próprias forma-

ções geológicas ocorrentes nas seções estudadas. Ressalta-se aqui que, graças a esta sistemática classificatória simplificada e à adaptação e utilização de sistema computacional CAD para a representação gráfica dos perfis geológicos das seções, conseguiu-se também agilizar a rotina de andamento do próprio projeto de engenharia, pois passa-se a contar com importantes informações sobre a constituição e estruturação do sub-solo em curtíssimos prazos. Isto permite que elementos geológicos confiáveis efetivamente fundamentem e até mesmo orientem as concepções de tais projetos desde etapas ainda iniciais. A elaboração deste trabalho foi também motivada objetivando-se demonstrar a aplicação de um modelo estrutural desenvolvido a partir de inúmeras observações de campo. Tais observações, apesar de se referirem a muitos projetos de fundações de barragens, abrangendo assim outras regiões e outros litotipos, permitiram sintetizar um modelo es-

Tabela 1 - Proposta para a classificação e notação dos litotipos mais comuns ocorrentes na Bacia Sedimentar de São Paulo.

FORMAÇÕES GEOLOGICAS	HORIZONTES		LITOLÓGICOS CONSTITUIÇÃO	FÁCIES
	NOTAÇÃO SIMPLIFIC.	NOTAÇÃO ABRANGENTE		
5 - Depós. Tecnogênicos	5	5 (-)	Aterros de materiais diversos com predomin. de argila siltoosa pouco arenosa gerulm. com pedreg. e/ou mat orgân.	-
4 - Depósitos Aluvionares (Quaternário)	4a	4Tf (4Pt)	Turfa muito mole, preta	Argiloso
	-	4Ag1 (4CM)	Argila siltoosa com matéria orgânica disseminada, plástica, muito mole, cinza e marrom	
		4Ag2 (4CS)	Argila arenosa (areia fina), com matéria orgânica, muito mole e medianamente consistente, marrom e cinza	
		4Ag3 (4CG)	Argila siltoosa arenosa, com pedregulhos e matéria orgânica, plástica, mole, cinza e marrom	
-	4Ar1 (4SC)	Areia fina e média argilosa, pouco plástica, fofa, marrom e cinza	Arenoso	
	-	4Ar2 (4S)		Areia média e grossa pouco argilosa, fofa, cinza
	4c	4Ar3 (4SG)		Areia média e grossa argilosa, com pedregulhos, fofa e medianamente compacta, cinza e marrom
3 - Formação São Paulo (Terciário)	-	3Agp1 (3Cp1)	Argila siltoosa, pouco arenosa, de consistência mole a média, vermelha e amarela	Argiloso (Arg. Vermelhas)
		3Agp2 (3Cp2)	Argila siltoosa, pouco arenosa, de consistência média a rija, vermelha	Argiloso (Arg. Variegadas)
		3Ag1 (3CM)	Argila siltoosa, pouco arenosa, de consistência rija a dura, variegada (amarela, cinza e vermelho arroxo.)	Argiloso
		3Ag2 (3CS)	Argila arenosa, pouco siltoosa, de consistência média a dura, variegada (amarela, cinza e vermelho arroxo.)	Argiloso (Arg. Variegadas)
		3Ar1 (3SC)	Areia fina a média argilosa, medianamente compacta a compacta, amarela e vermelha	Arenoso
		3Ar2 (3SG)	Areia de granul. variada, argilosa, com pedreg. finos e médios, median. compacta a compacta, cinza e amarela	Arenoso
2 - Formação Resende (Terciário)	2a	2Ag1 (2CM)	Argila siltoosa, pouco arenosa (areia fina e média) medianamente plástica a plástica, rija a dura, cinza esverdeada	Argiloso
	-	2Ag2 (2CS)	Argila arenosa (areia fina e média), pouco micácea, pouco a medianamente plástica, rija a dura, cinza	
		2Ag3 (2CG)	Argila aren. pouco silt., com pedregulhos variados, medianamente plástica a plástica, rija a dura, cinza e marrom	
		2b	2Ar1 (2SC)	Areia fina e média argilosa, pouco siltoosa, pouco micácea, pouco compacta a compacta, cinza e amarela
	2c	2Ar2 (2S)	Areia média e grossa, pouco siltoosa, medianamente a muito compacta, cinza e amarela	
	2d	2Ar3 (2SG)	Areia média e grossa, pouco siltoosa, c/ fragm. de qz. e pedreg. variados, median. a muito comp., cinza e amar.	
1 - Embasamento Cristalino (Pré-Cambriano)	-	1SR (1MS)	Silt. aren. (areia fina e média), micáceo, compacto a mto compacto, cinza escuro - SOLO RESID. DE GNAISSE	-
		1SP (1MC)	Silt. argil. pec. aren. (areia fina e média) micáceo, compacto a mto compacto, verde - SAPROLITO DE GNAISSE	
		1R (1R)	Gnaiss de textura protomilonítica, foliação sub vertical a 60-70°, fraturas inclinadas (45°) a subverticais, pouco a medianamente alterado (A ₁ /A ₂) - coerente (C ₂) e fraturado (F ₁) - ROCHA Sã	

NOTAS:

1- As litologias 1SR e 1SP referem-se a solos provenientes da alteração de gnaisses. Outras litologias do Embasamento resultam em solos com diferentes texturas.

2- As notações entre parênteses correspondem às terminologias em inglês.

3- A classificação acima, abrange dentre formações terciárias ocorrentes na bacia, apenas a Fm. Resende e a Fm. São Paulo.

trutural que se ajustou muito bem às características estruturais identificadas na Bacia Sedimentar de São Paulo. Pretende-se demonstrar que a aplicação de tal modelo poderá se constituir em importante ferramenta de apoio a determinados tipos de projetos geotécnicos que se desenvolvam nessa região.

SISTEMATIZAÇÃO UTILIZADA NA CLASSIFICAÇÃO DOS LITOTIPOS

A sistematização proposta para a notação estratigráfica se baseou na análise de algumas

centenas de sondagens executadas para diversos projetos de obras viárias concentradas principalmente na zona oeste da cidade de São Paulo (Túneis Presidente Jânio Quadros, Tribunal de Justiça, Ayrton Senna e Sebastião Carmargo, Linha 4 do Metrô (trecho av. F. Lima - r. Cel. J. Euzébio), viaduto Bandeirantes, Sist. Viário Brig. Haroldo Veloso etc.). Através desta sistematização procura-se inicialmente identificar e demarcar as grandes unidades geológicas presentes, representadas pelas formações aluvionares, pelas formações terciárias, que numa mesma seção geológica pode ocorrer mais de uma, pelo

embasamento e pelos denominados depósitos tecnogênicos ou aterros superficiais. Tem-se assim, ainda numa fase bastante preliminar dos estudos, através da compartimentação geológica, a definição da estruturação litológica básica da área interessada, ou seja, a indicação do número e natureza das grandes unidades geológicas constituintes. Tal prática, apesar de simples, é geralmente relegada, sendo uma das principais causas da grande miscelânea estratigráfica que caracteriza os perfis atualmente em uso na Engenharia. Ressalte-se que cada unidade geológica possui seus horizontes peculiares sendo que a individualização daquelas unidades permite as imprescindíveis ordenações das classes estratigráficas e até mesmo a previsibilidade dos materiais litológicos possíveis de ocorrer. A seguir, aplicando-se classificação baseada na caracterização tátil-visual convencionalmente utilizada para a descrição das amostras, usualmente adotada nos próprios boletins de sondagens, procurou-se individualizar de maneira simplificada, mas coerentemente, os vários horizontes litológicos que compõem essas formações. Notou-se que é através da observância da composição textural primária desses horizontes que se torna possível estabelecer correlações muito consistentes entre as sondagens, gerando assim perfis geológicos com litotipos compatíveis, mesmo quando abrangendo longas extensões, garantindo assim uma maior confiabilidade geotécnica. A fim de facilitar a identificação e individualização destes horizontes nas seções geológicas, foram adotadas siglas em substituição às extensas descrições convencionalmente neles utilizadas, facilitando sobremaneira a visualização da estruturação estratigráfica e portanto os trabalhos de correlação geológica e geotécnica.

Apresenta-se na tabela 1, a relação dos horizontes litológicos frequentemente encontrados em

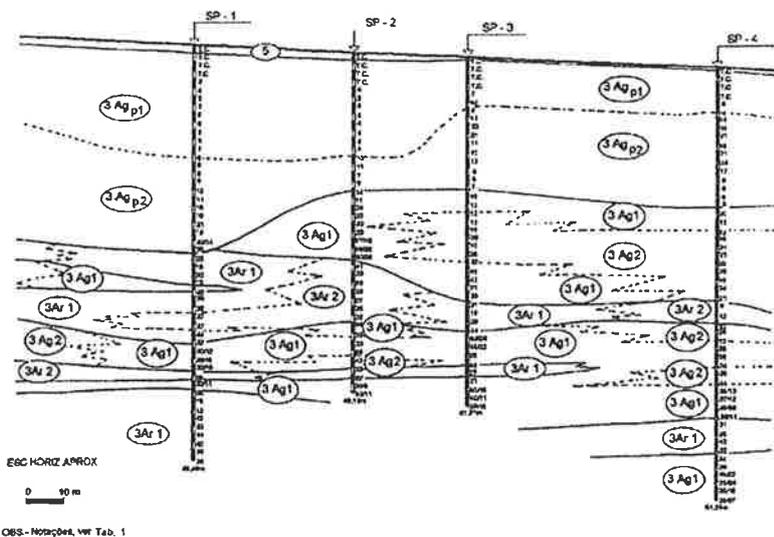
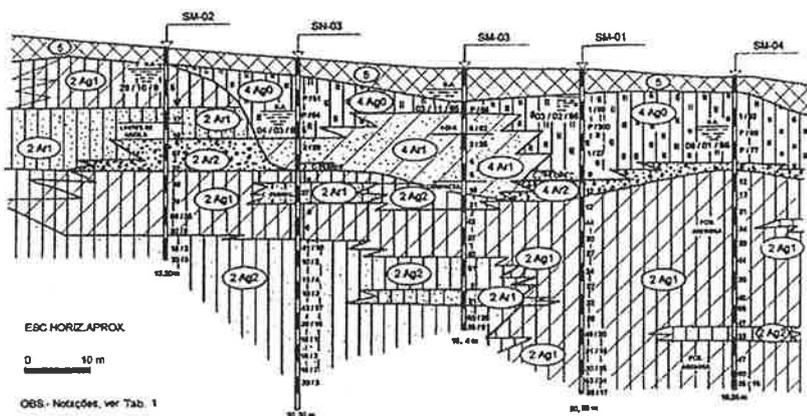


fig.1 - Exemplos de representação de diversos dos horizontes litológicos ocorrentes em seções geológicas elaboradas com base na classificação proposta. Na seção superior destaca-se a presença, sob a formação aluvionar (4), da Fm. Resende (2); na seção inferior, na qual constam apenas as respectivas notações, ocorre predominantemente a Fm. São Paulo (3), estratigraficamente sobreposta à Fm. Resende.

algumas das formações ou unidades geológicas mais comuns ocorrentes na bacia de São Paulo. Ressalte-se que as descrições que figuram no quadro, e que caracterizam cada um dos horizontes, resultou de uma “média” advinda de milhares de descrições tátil-visuais feitas nas amostras de sondagens e constantes dos boletins individuais. As duas notações apresentadas e destinadas a facilitar a identificação desses horizontes (a forma simplificada e a completa ou abrangente) correspondem às classificações tátil-visuais das amostras, da maneira como são comumente feitas pelas empresas de sondagens: adota-se descrições mais minuciosas ou outras menos detalhistas, estas últimas destacando apenas os aspectos texturais, de resistência e visuais mais comuns e evidentes nos materiais sondados. Assim, ambas as sequências de siglas apresentadas procuram englobar as descrições mais frequentemente empregadas nos serviços de sondagens. Quer-se aqui enfatizar a importância do critério de classificação e de nomenclatura adotados nos perfis de sondagens pois eles é que servirão de base para a elaboração das seções geológicas. A fig. 1 exemplifica, através de duas destas seções, aplicações práticas desta nomenclatura.

Merece destaque o fato de que durante as obras, nos trabalhos de escavação realizados (lembrando que em grande parte deles, por serem obras de escavação de túneis, tinha-se contato visual e “in loco” com os materiais escavados), pode-se confirmar as descrições adotadas, sendo rara e irrelevante, devido às mínimas diferenças e às diminutas ocorrências, a detecção de litotipos diversos daqueles identificados e relacionados no quadro mencionado.

Apresenta-se assim na referida tab. 1 a relação dos horizontes identificados em cada formação, sua constituição litológica média, bem como as notações sugeridas para facilitar as indivi-

Tabela 2 - Faixas de alguns dos parâmetros geotécnicos dos horizontes litológicos determinados para as formações Resende e São Paulo.

HORIZONTES LITOLÓGICOS (NOT. ABRANG.)	PESO ESPECÍFICO (kN / m ³)	COESÃO EFETIVA (kN / m ²)	ÂNGULO DE ATRITO EFETIVO (°)	MÓDULO ELASTICIDADE SECANTE (Mpa)
5	15	10	20	7
4TY	13	5	15	0,5 - 1
4Ag0	16	8	20	3
4Ag1				
4Ag2				
4Ag3				
4Ar1	17	5	25 - 30	8 - 11
4Ar2				
4Ar3				
3Agp1	15	20	27	5 - 15
3Agp2	16	40	25	15 - 30
3Ag1	18 - 20	30 - 100	20 - 25	10 - 60
3Ag2				
3Ar1				
3Ar2	19	1 - 3	33	30 - 50
2Ag1	20 - 22	40 - 100	20 - 25	20 - 60
2Ag2				
2Ag3				
2Ar1	20 - 21	1 - 5	30 - 35	15 - 50
2Ar2				
2Ar3				

As por vezes consideráveis variabilidades de valores de diversos dos parâmetros decorrem das amplitudes observadas nos valores de resistência à penetração S.P.T., possíveis de ocorrer num mesmo horizonte litológico.

dualizações dos horizontes nas seções geológicas e no campo.

Pode-se tecer os seguintes comentários genéricos sobre as grandes unidades geológicas comumente ocorrentes.

Depósitos Tecnogênicos: ocorrem superficialmente, recobrindo os materiais subjacentes de forma contínua mas lenticular, ou seja, com espessuras variáveis entre 0,5 e 2-3 metros.

Formações Aluvionares: assumem a conformação de pequenas bacias deposicionais encaixadas, também superficialmente, em depressões localizadas das formações subjacentes, recobrindo alinhamentos de drenagens atuais ou pré-existentes; suas espessuras totais podem atingir até 8-10 metros. Nestes depósitos os sedimentos mais grosseiros (areias grossas e cascalhos) situam-se geralmente na base, sendo superpostos pelas frações sedimentares mais finas (areias finas e argilas orgânicas).

Formações Terciárias: detectáveis, em função das cotas abrangidas pela seção, a Formação Resende (em nível abaixo de 750 m)

e/ou a Formação São Paulo (em nível acima de 750 m). Ambas são constituídas, do ponto de vista textural, praticamente pelos mesmos materiais, com diferenças muito sutis, em termos de valores de resistência à penetração (mais elevados nos estratos argilosos superficiais da Fm. Resende) e de coloração (com tendência a cores variegadas nas camadas argilosas da Fm. São Paulo). A diferença básica entre ambas, entretanto, reside na conformação geométrica dos horizontes litológicos, contínuos e espessos na Formação Resende e irregulares e interdigitados na Formação São Paulo. Esta última também apresenta, como peculiaridade, quando as seções abrangem níveis superiores a 785 m, o recobrimento generalizado por argilas vermelhas de baixa resistência à penetração (conhecidas como argilas vermelhas porosas - 3Agp1 e 3Agp2). Os horizontes argilosos da Fm. Resende (notadamente o 2Ag1 e o 2Ag2) são popularmente conhecidos como “taguás”.

Embasamento Cristalino: apresenta-se geralmente, mesmo quando recoberto pelos sedimentos terciários, capeado por um

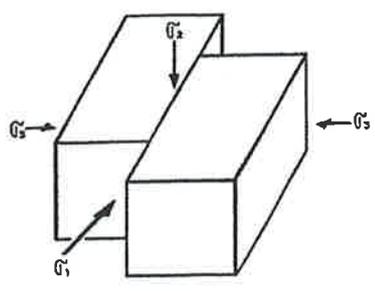


fig.2 - Esquema de falhamento transcorrente com a distribuição das tensões.

manto de intemperismo que pode alcançar espessuras de 1 ou 2 dezenas de metros e até mesmo maiores; tal manto apresenta os horizontes característicos de Solo Residual e de Saprolito, com texturas e constituições variáveis em função da natureza litológica do maciço rochoso, o qual pode ser de gnaisses, granitos, migmatitos, xistos ou metasedimentos.

Análises de projetos de várias naturezas, desenvolvidos em diversos destes litotipos, permitem estimar faixas paramétricas básicas para estes solos, norteados, mercê da consistência das classificações, os dimensionamentos e mesmo as concepções de novos projetos.

Uma vez adotando-se a classificação ora proposta e executando-se ensaios específicos para os diferentes horizontes identificados ou efetuando-se análises retroativas de projetos / obras, poderá haver uma reavaliação dos valores apresentados, reduzindo-se as faixas de abrangência e elevando-se a precisão desses parâmetros.

São as seguintes as ordens de grandeza de alguns dos parâmetros geotécnicos mais significativos:

As por vezes consideráveis variabilidades de valores de diversos dos parâmetros decorrem das amplitudes observadas nos valores de resistência à penetração S.P.T., possíveis de ocorrer num mesmo horizonte litológico.

Não são mencionados os solos residuais nem os saprolitos

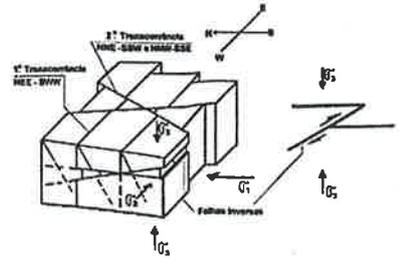


fig.3 - Esquema geral de 2 processos de transcorrência ilustrando a geração de falhamentos inversos decorrentes.

do Embasamento, dada a grande variabilidade dos litotipos originais, bem como dos variáveis graus de alteração.

ASPECTOS ESTRUTURAIS

É conhecido o fato de a bacia de São Paulo localizar-se numa área geologicamente muito conturbada sob o ponto de vista tectônico. Deste processo resultaram muitas estruturas de dobras e de falhamentos.

Do ponto de vista geotécnico, todas estas estruturas são importantes destacando-se, porém, as de falhamentos e as do fraturamento resultante (24). Passa-se a descrever, para facilitar ao leitor menos familiarizado com os processos geológico-estruturais, os vários tipos de falhamentos ocorridos na área de interesse.

Falhamentos Transcorrentes

A observação das plantas geológicas do sudeste brasileiro, mormente na faixa ocupada pelo Embasamento Cristalino, na Serra do Mar e em suas imediações, evidencia uma sucessão de faixas litológicas relativamente estreitas, as quais decorreram de processos de cisalhamentos horizontais alinhados (falhamentos transcorrentes - fig. 2). Estes falhamentos iniciaram-se orientados predominantemente segundo a direção NEE - SWW. A própria bacia de São Paulo, com sua conformação geográfica alongada segundo esta mesma direção, decorreu de um processo de sedimentação (asso-

reamento) ocorrente sobre algumas destas estruturas, as quais haviam previamente sofrido abatimentos para dar lugar à deposição em questão. Outras fraturas, também transcorrentes mas de menor magnitude, ocorreram posteriormente em direções, além dessa predominante, também em outras, porém, orientadas segundo NNE - SSW a NNW - SSE, ou seja, no entorno da direção geral N - S (fig. 3) (24).

FALHAMENTOS TRANSCORRENTES

Como os ilustrados podem gerar outros tipos de estruturas associados (16, 23), como mostra a fig. 4 .

Tais falhamentos transcorrentes vem, na realidade, ocorrendo desde a formação da crosta terrestre, com recorrências até o presente, tendo portanto também afetado o pacote sedimentar da bacia de São Paulo, geologicamente muito mais novo. Esclarece-se que nos falhamentos a serem descritos a distribuição de tensões principais segue os padrões clássicos de ortogonalidade, com um eixo vertical e dois horizontais e $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (21).

FALHAMENTOS NORMAIS

Conforme ilustrado na fig. 2, falhamentos transcorrentes resultam da seguinte distribuição de tensões com σ_1 horizontal, σ_2 vertical e σ_3 horizontal.

Os falhamentos classificados como normais, gerados por uma distribuição de tensões bem diferente (σ_1 vertical, σ_2 e σ_3 horizontais, ver fig. 5) ocorreram como consequência da abertura do grande número de planos de cisalhamento pré-existent (os falhamentos transcorrentes, acima mencionados) que possibilitaram deslocamentos gravitacionais de grande número de blocos.

A causa primária para que o estado de tensões dos falhamentos normais fosse satisfeito decorreu, na verdade, de um pro-

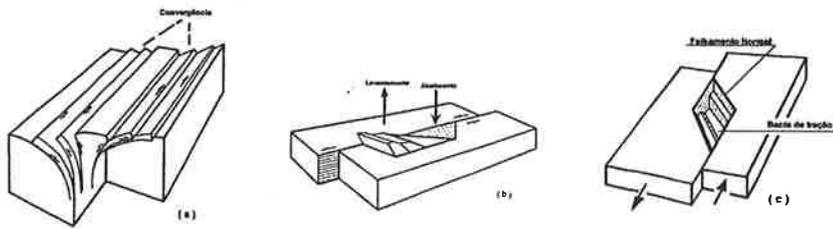


fig 4 - Em (a) tem-se uma estrutura denominada "floral", resultante do maior atrito (convergência) dos blocos. Em (b) e (c) ocorre um deslocamento diferencial dos blocos transcorrentes gerando alteamentos (b) e abatimentos (b e c) Seg. Ramsay & Huber.

cesso de arqueamento da crosta. Com tal arqueamento e com a pré-existência do intenso fraturamento vertical, causado pelos falhamentos transcorrentes, ocorreu o deslocamento gravitacional mencionado (24).

O PROCESSO DE ARQUEAMENTO CRUSTAL E A GÊNESE DE SUPERFÍCIES EROSIVAS COM O DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES HORIZONTAIS

O arqueamento crustal men-

cionado acima constituiu-se no levantamento da crosta terrestre, abrangendo grandes extensões de áreas continentais, tendo tal processo ocorrido em etapas sucessivas, a maneira de pulsos.

A fig. 6 mostra, esquematicamente, o surgimento e desenvolvimento de frentes erosivas como consequência desse soerguimento, frentes estas que, com o progressivo avanço para o interior dos continentes (7), definem superfícies erosivas tanto mais antigas quanto topograficamente mais elevadas se situarem (4, 17,

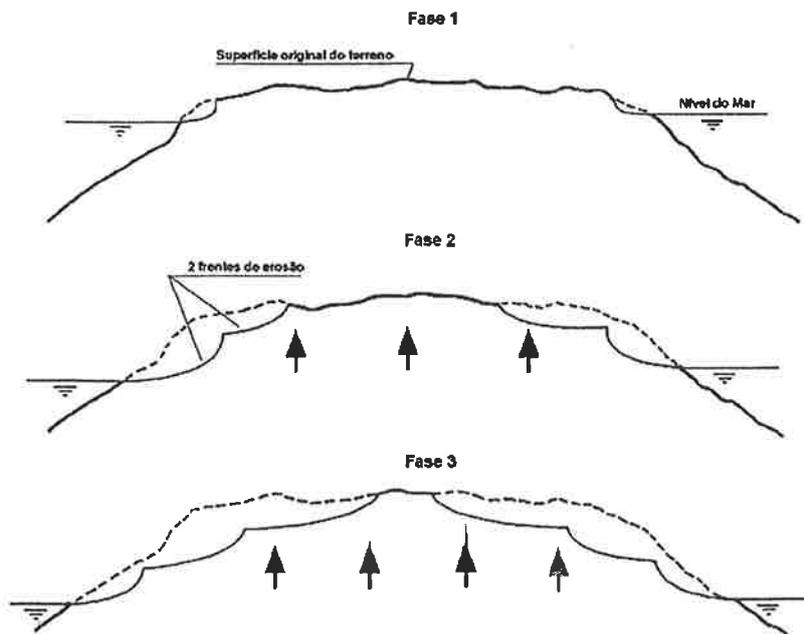


Fig.6 - Esquema de três fases de um levantamento crustal. Na 1ª fase o processo erosivo tem início nas bordas do continente; na 2ª fase, com o levantamento, a mesma frente erosiva inicial progride para o interior, surgindo novo degrau erosivo, no nível da abrasão marinha; na 3ª fase, há novo pulso de levantamento. As frentes erosivas continuam o processo de erosão para o interior.

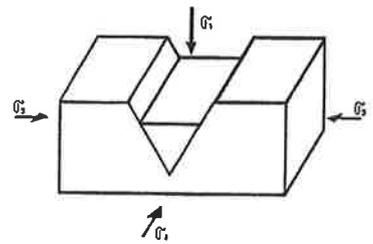


fig.5 - Distribuição das tensões num falhamento normal.

18). Este processo de *avanço erosivo* é, em termos geológicos, extremamente rápido, conforme o demonstram os perfis longitudinais de inúmeros talvegues, os quais seguem curvas exponenciais do tipo $y = B.e^{Mx}$ (onde B e M são constantes para cada degrau erosivo dos perfis longitudinais). Na bacia de São Paulo há numerosas evidências, em redes hidrográficas locais, deste processo (6). Destacam-se, como exemplos mais significativos de duas destas superfícies erosivas, de grande interesse à Geotecnia, a av. Paulista que, com seus prolongamentos (av. Dr. Arnaldo, av. Heitor Penteado, alto das Perdizes, Vila Pompéia etc) situa-se no entorno da cota 820, e as áreas varzeanas como as do rio Tietê, rio Pinheiros e seus afluentes, situadas na cota 720. Ressalta-se que pelo fato de os perfis dos talvegues a jusante das frentes erosivas assumirem caráter geometricamente assintótico, as cotas mencionadas têm seus valores com precisões apenas locais.

Normalmente, em áreas de transcorrência, como ilustrado na fig. 7, os esforços responsáveis por este tipo de falhamento geram também fraturas sub-horizontais, devido à erosão mencionada que, decapeando massas superficiais, reduzem σ_3 a valores muito baixos (15). Este fenômeno é ilustrado nos diagramas de Mohr - Coulomb, em que a gradual redução dos valores de σ_3 aumenta os diâmetros dos círcu-

los ($\sigma_1 - \sigma_3$) até que se atinja a envoltória de ruptura (fig. 7a).

Nos casos em que ocorre a dissipação dos valores de σ_1 , o que se dá durante as transcorrências, os próprios valores de σ_n (tensões normais às paredes de transcorrência), sempre elevados devido ao permanente confinamento dessas fraturas de transcorrência (21), são capazes de causar o mesmo fenômeno, ou seja, geração de fraturas sub-horizontais.

Enquanto que no primeiro caso (σ_1 responsável direto pelo fraturamento sub-horizonta), o rumo do mergulho das fraturas segue aproximadamente a direção deste esforço σ_1 (fig. 3), no segundo caso (σ_n como esforço principal devido à dissipação de σ_1) o rumo dos mergulhos das fraturas será aproximadamente o da direção de σ_n .

Há diversos exemplos destas feições estruturais na bacia de São Paulo, melhor preservados nos litotipos mais rígidos, como é o caso das rochas cristalinas e dos horizontes argilosos dos sedimentos terciários. Mencionam-se, a fim de ilustrar tais ocorrências, vários exemplos:

VALE DO RIO PINHEIROS

- *Ombreira oeste da Usina Elevatória de Traição* - neste caso as fraturas sub-horizontais ocorrem em rochas gnáissicas, formando ondulações, o que caracteriza valores muito baixos de σ_3 , não havendo sequer cisalhamentos visíveis (6).
- *Túneis dos Complexos Viários J. Quadros e S. Camargo, sob o rio* - tanto as rochas do Embasamento como os horizontes argilosos dos sedimentos terciários mostram claramente os fraturamentos transcorrentes associados com sistemas de fraturamentos sub-horizontais, com mergulhos variando geralmente de 30 a 40°.
- *Túneis da av. J. Kubitschek* - observou-se nas escavações das argilas rijas da Fm. Resende ("taguás") intenso imbricamento de fraturas cisalhadas

sub horizontalmente, lembrando estruturas "cone in cone" ou "shatter cones".

- *Fundações de edificação da Eletropaulo (confluência da av. J. Kubitschek, com a via Marginal)* - foram detectadas durante as escavações fraturas sub-horizontais onduladas e irregulares, próximas à superfície, abertas, com vários metros de extensão, saturadas, decorrentes de esforços horizontais.
- *Passagem de nível da av. Lineu de P. Machado* - o litotipo é gnáissico-pegmatítico com intenso fraturamento transcorrente e sub-horizonta, este último ondulado e extenso, abrangendo algumas dezenas de metros.
- *Real Parque* - observou-se na ombreira oeste do vale do rio a ocorrência de fratura sub-horizonta (com mergulho de 20-25°) em rochas do Embasamento, afetando extensa área da encosta voltada para o rio. A fratura era preenchida por mineral identificado supostamente como illita.

VALE DO RIO TIETÊ

- *Fundação da Barragem M. Temporária. (Cebolão)* - as argilas rijas da Fm. Resende ("taguás") tem fraturamento sub-horizonta intenso, similar ao das escavações da av. J. Kubitschek.
- *Aprofundamento da calha do rio sob a Ponte do Limão* - ocorrência de fraturas sub-horizontais bem definidas nas rochas gnáissicas do Embasamento de vários metros de extensão.
- *Obras de fundações de pontes nas proximidades da av. G. Mistral (Penha)* - idem.
- *Túneis para eletrodutos no bairro do Pari* - ocorrência de fraturas sub-horizontais nos sedimentos limonitizados (25) da Fm. Resende com vários metros de extensão.

PATAMAR DA AV. PAULISTA

- *Túneis metroviários, próx. à av. Consolação* - ocorrência de sistemas de fraturamentos sub-horizontais limonitizados (25)

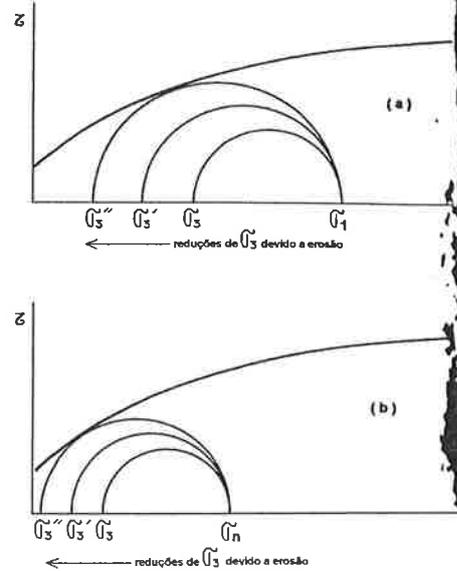


fig.7 - Envoltórias de ruptura atingidas por redução erosiva do capeamento (σ_3).

nos sedimentos argilosos da Fm. São Paulo com vários metros de extensão.

Procurou-se, através destes exemplos, evidenciar a incidência de estruturas geológicas de descontinuidade em setores topograficamente bem definidos da bacia de São Paulo, causados em sua grande parte, como decorrência da combinação dos processos morfo-tectônicos descritos.

A fig 8 ilustra, de forma esquemática, a combinação de estruturas geológicas de descontinuidade em consequência de tais processos morfo-tectônicos.

CONSEQUÊNCIAS GEOTÉCNICAS

Tendo em vista a moderna tendência da engenharia, em São Paulo, em intensificar a ocupação do sub-solo com obras destinadas a reservatórios, ligações viárias e metroviárias, dutos, fundações profundas e escavações em geral, torna-se imprescindível o conhecimento que se deve ter, claro e detalhado, da constituição geológica do substrato.

Assim, é importantíssimo que se possa contar com seções geológicas do sub-solo que além de identificar e distinguir claramente entre si as unidades geológicas presentes, correlacionem efetivamente os diversos horizontes se-

dimentares, de forma adequada e acessível aos interessados na elaboração dos projetos e na execução das obras, mesmo àqueles não afeitos aos detalhes e minúcias de natureza geológica.

É o caso de poder individualizar com maior grau de certeza horizontes litológicos de comportamento geotécnico crítico, por exemplo, quanto à condutividade hidráulica, quanto à estabilidade, quanto à deformabilidade etc.

Menciona-se, meramente a título de exemplo que, devido à consistência do sistema classificatório dos horizontes, conforme o sugerido neste trabalho, pode-se prever a ocorrência, ainda à frente de escavações que estavam sendo executadas para a construção de um túnel, da existência de aquíferos, que por seus posicionamentos, seriam críticos às escavações assim que estas os alcançassem. De posse de seções geológicas precisas pode-se providenciar antecipadamente sua drenagem, salvaguardando-se a escavação de prováveis instabilizações que, certamente, ocorreriam e de serviços de drenagens emergenciais que teriam que ser executados quando as escavações atingissem aquelas formações críticas.

A associação entre a constituição litológica e as feições estruturais que afetaram estes litotipos fornece subsídios ainda melhores aos projetos, particularmente àqueles de grandes extensões lineares.

Destaca-se aqui, como primeira observação relativa a este aspecto que os falhamentos transcorrentes, por si só, podem envolver, além de mudanças litológicas bruscas, o surgimento de litotipos com comportamentos geotécnicos distintos, além de espessamentos localizados do manto de intemperismo.

Quanto ao fraturamento sub-horizontal, tão peculiar na bacia, uma vez que se apresenta cisalhante e fechado, em geral não prejudicará de forma sensível obras de escavação de túneis, po-

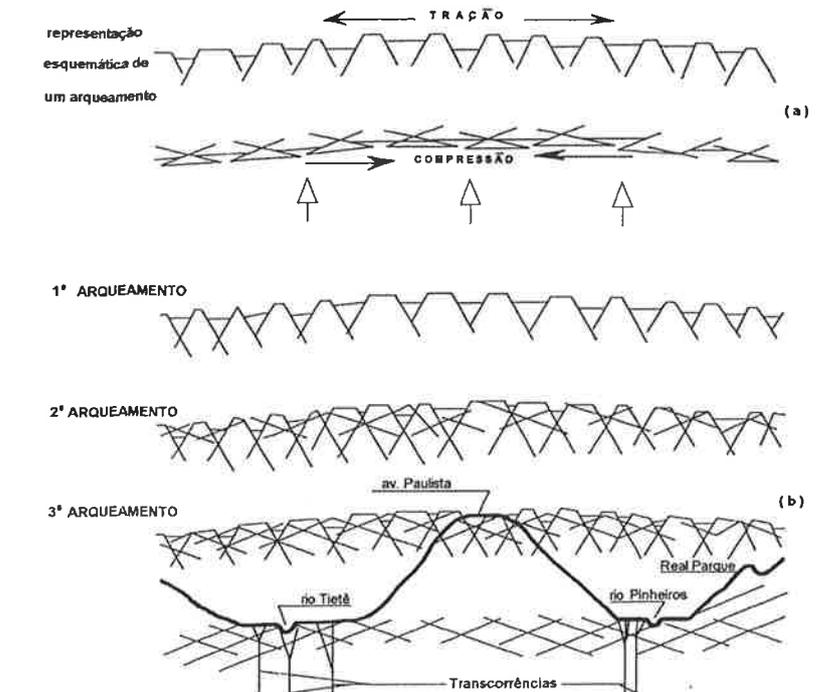


Fig.8 - Num arqueamento crustal (a) formam-se fraturas de tração (falhas normais) na parte externa, e de compressão (falhas inversas) na parte interna. Em (b) ilustra-se 3 fases sucessivas de arqueamento, em que as estruturas resultantes interagem. Destas 3 fases, a 1ª já foi totalmente erodida, a 2ª parcialmente, restando apenas o setor basal, cujas fraturas compressivas (sub-horizontais) encontram-se no mesmo nível do topo do último arqueamento, juntamente com as fraturas de tração da 3ª fase do arqueamento.

derá tornar-se entretanto crítico na estabilidade de taludes e de fundações.

Por fim, deve-se atentar para a possibilidade de ocorrência, ainda que secundária, de fraturas de tração, em atitude sub-vertical, as quais podem se constituir num dos fatores da instabilização de tetos de escavações.

RESUMO E CONCLUSÕES

Pelo que foi apresentado é possível efetuar, além de uma classificação simplificada que racionaliza a visualização da estrutura estratigráfica dos materiais sedimentares que compõem a bacia de São Paulo, a previsão dos locais de maior incidência, em diversos destes litotipos, de alguns sistemas de fraturamento, mais especificamente os sistemas sub-horizontais. Um dos fatores condicionantes da maior probabilidade de ocorrência destes fraturamentos é tão somente o local destas ocorrências; podem ser facilmente detectadas, ou nas várzeas dos principais cursos d'água da bacia, ou nos patamares da av. Paulista e de seus prolongamentos, ou

seja, são previsíveis em função das cotas topográficas das ocorrências. Já as fraturas sub-verticais, decorrentes das trações, são de ocorrência bem mais aleatória, mas com maiores probabilidades de incidência nos patamares mais elevados acima mencionados.

AGRADECIMENTOS

Contou-se, para a elaboração deste trabalho, com o apoio e estímulo dos Eng^{os} Prof. Dr. Arsênio Negro Jr., Prof. Jairo Pereira de Araújo, Gilberto Antonio Giuzio e Marcello Kutner, e do sr. Aleksander Szulc. Não se pode deixar de mencionar que a elaboração do presente estudo deve ser creditada também às proprietárias de diversas obras executadas na cidade de São Paulo, às Projetistas e às Empreiteiras. 

* GEÓLOGO PELA USP, DESENVOLVE ATIVIDADES EM GEOLOGIA DE ENGENHARIA, SEDIMENTOLOGIA E HIDROGEOLOGIA. TITULAR DA CADEIRA DE GEOTECNIA DA UMC.

** GEÓLOGO PELA USP, TITULAR DA USP-SÃO CARLOS, ESPECIALISTA EM GEOLOGIA ESTRUTURAL E GEOLOGIA DE ENGENHARIA.

- 1) ALMEIDA, F.F.M. (1955). As camadas de São Paulo e a tectônica da Serra da Cantareira. Bol.Soc. Bras. Geol., v.4, n(2, São Paulo, p.23-46.
- 2) ANGELIER, J. (1979). Determination of the mean principal direction of stresses for a given fault population. Tectonophysics, 56. Elsevier, p.T17-T26.
- 3) ARTHAUD, I. (1969). Método de determinação gráfica das direções dos eixos de deformação de uma população de falhas. Bull. Soc. Geol. de France (7), XI, (Trad. MAGALHÃES, F.S. & ABREU, W.A.-Inst. Pesq.Tecnol. do Estado de São Paulo S.A. (IPT), São Paulo ,p.729-737.
- 4) AB'SABER, A.N. (1980) - Súmula Geomorfológica do Planalto Paulistano. IN MESA REDONDA SOBRE ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS DA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO, São Paulo, p.33 - 36.
- 5) BADGLEY, P.(1959) - Structural Methods for the exploration geologist. Harper & Brothers, N.Y. p. 280.
- 6) BJORNBERG, A.J.S. (1992). Microestrutura dos solos - Solos da cidade de São Paulo (Mesa Redonda). Assoc. Bras. de Mec. Solos. Arsênio Negro Jr. et al. Editores. São Paulo. p. 95 - 109.
- 7) CRISTOFOLETTI, A. (1981) - Geomorfologia Fluvial, v.1 - Edgar Blücher Ltda. S. Paulo. p.125 - 135.
- 8) COIMBRA, A.M.; RICCOMINI, C.; MELO, M.S. (1983). A formação Itaquaquetuba: evidências de tectonismo no quaternário paulista. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 4, São Paulo. Atas, SBG, p.253 - 266.
- 9) CNEC - CONSÓRCIO NACIONAL DE ENGENHEIROS CONSULTORES S.A. (1988). Corredor Viário Túnel Pinheiros (Relatório), São Paulo.
- 10) COUTINHO, J.M.V. (1989). Alguns aspectos sedimentológicos e tectônicos na área da Bacia de São Paulo. In: Workshop - GEOLOGIA DA BACIA DE SÃO PAULO. Bol. IG-USP, Public. Esp., São Paulo, p.12 -15.
- 11) COZZOLINO, V.M. (1980). Considerações sobre o conceito de camadas do ponto de vista geotécnico, na Bacia de São Paulo. In: MESA REDONDA - ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS DA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO, São Paulo, Public. Esp. ABGE/SBG, São Paulo, p. 47 - 52.
- 12) DURY, G.H. (1959). The face of the earth. Pelican Books, London, p.22.
- 13) FARMER, I.W. (1968). Engineering properties of rocks. E & F.N. SPON Ltd. London. p. 61 - 69.
- 14) GOODMAN, R.E. (1976). Methods of geological engineering in discontinuous rocks. West Publi. Co. p. 183.
- 15) GOODMAN, R.E. (1989). Introduction to rock mechanics. 2nd. ed. John Wiley & Sons. N.Y. p.101 - 115.
- 16) HASUY, Y. & MIOTO, J.A. (1992). Geologia estrutural aplicada. Assoc. Bras. de Geol. de Engenharia - A.B.G.E. p.173 - 175.
- 17) KING. L. C. (1957). A geomorfologia do Brasil Oriental. Revista Bras. de Geogr. nº 2 (separata) Ano XVIII. Rio de Janeiro. P. 202 - 206.
- 18) KING. L. C. (1962). The Morphology of the Earth. Oliver & Boyd, Edinburgh & London. p. 302 - 323.
- 19) KOIDE, H. & BHATTACHARGY, S. (1977). Geometric patterns of active strike - Slip faults and their significance as indicators for areas of energy release. In: ENERGETICS OF GEOLOGICAL PROCESSES, Saxena S.K. & BHATTACHARGY, S. - Editors, Springer Verlag, N.Y. p.46 - 66.
- 20) MELO, M.S.; COIMBRA, A.M.; RICCOMINI, C. (1989). Evolução dos conhecimentos sobre a geologia da Bacia de São Paulo na década de oitenta. In: WORKSHOP- GEOLOGIA DA BACIA DE SÃO PAULO. Bol. IG - USP. Publ. Esp., São Paulo, p. 1 - 10.
- 21) PARKER, R.G. (1993). Foundations of structural geology. Blackie Academic & Professional. London, reprinted 1993 . p. 65 e 74.
- 22) PLANTA TOPOGRÁFICA DA CIDADE DE SÃO PAULO (1933). Societá Anonima di Rivelamenti Aerofotogrametrice - Sara . 1:20.000. Arquivos Eletropaulo, São Paulo.
- 23) RAMSEY, J.G. & HUBER, M.N. (1987) The techniques of modern structural geology. V.2. Academic Press. London. p. 527 - 533.
- 24) RICCOMINI, C. & COIMBRA, M.A. (1992)- Geologia da Bacia Sedimentar - Solos da Cidade de São Paulo (Mesa Redonda) - Assoc. Bras. de Mec. dos Solos - Arsênio Negro Jr. et all. Edit. S. Paulo. p. 37 - 94.
- 25) SUGUIO, K & BARBOUR, A.P. (1969). Morfologia e gênese das estruturas limoníticas dos sedimentos da Bacia de São Paulo. Anais Acad. Bras. Ciências, 41, (2). São Paulo. p. 161 - 180.
- 26) VARGAS, M. (1980). Geotecnia do Terciário de São Paulo - Histórico. In: MESA REDONDA - ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS DA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO, Publ. Esp. ABGE/SBG, São Paulo, p. 37 - 45.
- 27) VARGAS, M. (1992). - Evolução dos Conhecimentos. Solos da Cidade de São Paulo - (Mesa Redonda) - Assoc. Bras. de Mec. dos Solos - Arsênio Negro Jr. et all. Edit. S. Paulo. p. 1 - 35.