

26.1

Victor F. M. de Melo

410480

CONDICIONES TIPICAS DEL SUBSUELO Y PROBLEMAS DE ASIENTO EN SANTOS, BRASIL

TYPICAL SUBSOIL CONDITIONS AND SETTLEMENT PROBLEMS IN SANTOS, BRASIL

Alberto Henriques Teixeira (1)  
GEOTECNICA S.A. - Engenheiros Consultores (2)

Sumario: Este artículo es el primero de una serie destinada a contribuir a los conocimientos generales de los problemas de asiento por consolidación, tomando como base la experiencia obtenida en grandes edificios en la ciudad de Santos, durante los doce últimos años.

Presentamos algunos de los principales casos estudiados por la firma GEOTECNICA S.A.

Son completamente descritas en la forma habitual las características del subsuelo consideradas necesarias para el proyecto concienzioso de fundaciones. Son discutidas algunas correlaciones de las más interesantes características de las arcillas compresibles que son en general normalmente consolidadas. Son resumidos los procedimientos adoptados para el cálculo de los asientos de proyecto y son transcritos sus principales resultados para comparación con el comportamiento actual.

Son brevemente descritos los edificios y sus fundaciones y son resumidas y discutidas todas las informaciones sobre los asientos, cuidadosamente medidos.

Summary: This article is the first of a series intended to contribute to overall knowledge of problems of consolidations settlements, by drawing upon the experience collected in the past twelve years from big buildings in Santos.

A few of the principal cases studied by GEOTECNICA are presented.

The subsoil characteristics considered for responsible foundation design are completely described in the standard form.

Some correlations of interesting characteristics of the compressible clays predominantly normally-consolidated.

- 1) Engineer and Regional Director of São Paulo, GEOTECNICA S.A. - Engenheiros Consultores.
- 2) Consulting Engineers in Foundation and Earthwork Engineering, Brasil.

dated, are discussed. The procedures adopted for design settlement computations are summarized, and their principal results are transcribed for comparison with actual behaviour

The buildings and their foundations are briefly described, and all the information on settlements, carefully measured, is summarized and discussed.

Introdução:- Desde 1946 que a cidade de Santos (Brasil) vêm tendo um notável surto de crescimento, principalmente na orla marítima, com a construção de inúmeros edifícios com altura compreendida entre 10 e 20 pavimentos.

A natureza peculiar do subsolo nesse local provoca fortes recalques nos edifícios quando apoiados em fundações diretas rasas. O emprêgo de fundações profundas para impedir tais recalques é todavia impraticável em face ao fator econômico e à própria natureza do subsolo, uma vez que a parcela de custo de uma fundação desse gênero é excessiva quando comparada com o custo total do empreendimento.

Em vista disto extensos estudos das propriedades geotécnicas foram e vêm sendo procedidos, para aplicação no projeto consciente das fundações. Outrossim uma observação minuciosa do comportamento de várias estruturas vem sendo realizada, algumas datando de 1947.

Esbôco geológico da região:- A baixada santista é constituída por uma bacia de sedimentação subaquática quaternária, resultando geralmente numa sucessão de camadas espessas alternadas de areia e de argila. A espessura individual dessas camadas é quase sempre superior a 10 metros e, por sondagens executadas, tem-se verificado que esses sedimentos estendem-se, em alguns pontos até 65 metros de profundidade, onde então encontra-se o embasamento cristalino constituído por rochas gneissicas e graníticas. Estas rochas afloram em alguns pontos formando colinas e ilhas, algumas com altura de 200 metros.

Em grande parte da área adjacente ao mar a deposição superior é de areia, geralmente dotada de compactade relativamente alta, situando-se em profundidade as camadas de argila que são frequentemente de baixa consistência. Todavia a medida que se afasta das praias a tendência é de desaparecimento das deposições arenosas restando apenas um horizonte de argila de consistência muito mole até 50 metros de profundidade.

Amostradores empregados e resultados de sondagens típicas:- Os sedimentos arenosos foram predominantemente explorados pelo emprêgo de amostradores de percussão tipo Terzaghi-Peck ou Mohr-Geotécnica (1,2).

Nas camadas de argila as amostras indeformadas foram recuperadas por meio de amostradores de paredes delgadas de 2" a 4" de diâmetros, com relação de áreas variável entre 7% e 5%. Em alguns casos, onde a argila era de consistência muito mole, foi utilizado amostrador de pistão tipo Osterberg.

Nas figuras 1 a 5 são apresentados os resultados formais de algumas sondagens típicas e representativas dos locais de vários edifícios. Em uma das sondagens (para o edifício S.C., figura 2) a sondagem foi levada até se atravessar totalmente o manto de sedimentos e penetrando no embasamento cristalino, a 61m de profundidade.

Sedimentos arenosos:- As camadas de areias superficiais são geralmente de textura fina e muito uniformes situando-se o tamanho dos grãos entre 0,1 e 0,2 milímetros. A espessura desta camada é geralmente da ordem de 12m; excepcionalmente no local do edifício U esta camada reduz-se a espessura de 7 metros.

A compacidade deste depósito é via de regra medianamente compacto a compacto, variando o índice de resistência à penetração Mohr-Geotécnica entre 6 e 20; o ensaio padrão de penetração (Standard Penetration Test, de Terzaghi-Peck) varia de 9 a 30. Na zona de transição para a camada de argila subjacente, a tendência é da areia tornar-se argilosa, diminuindo a sua compacidade.

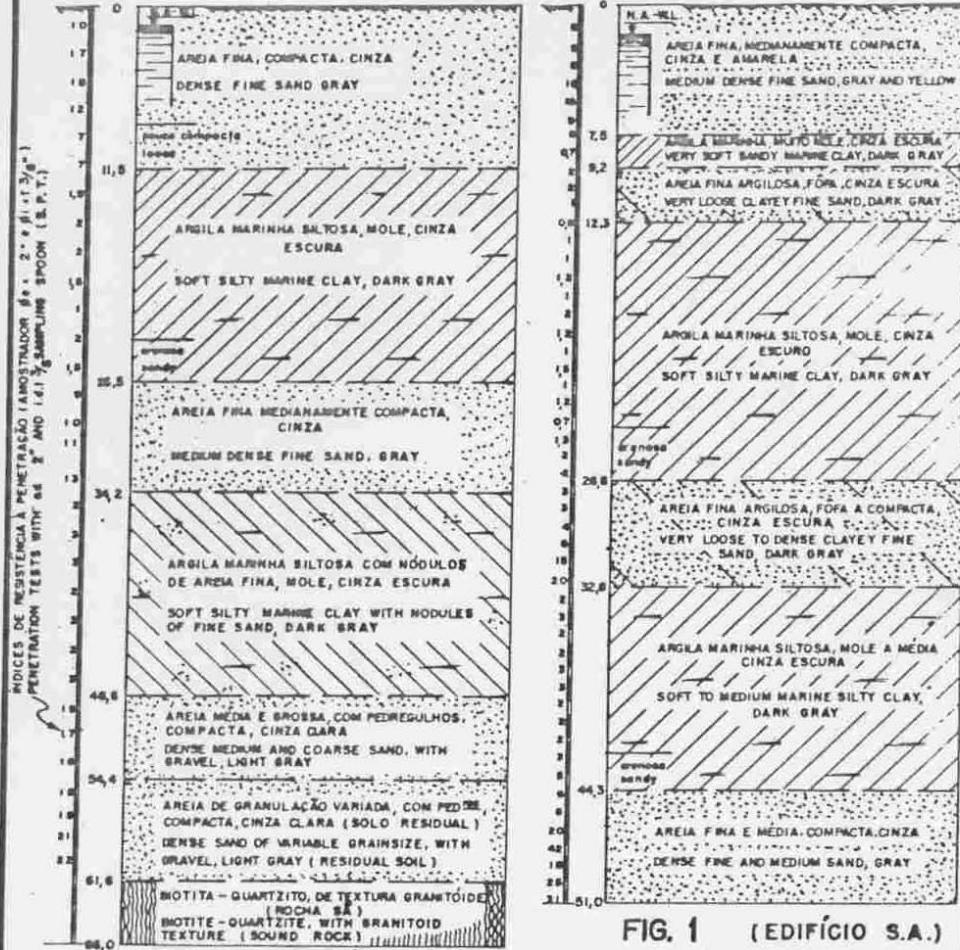
O peso específico natural deste sedimento situa-se entre 2,0 e 2,2 t/m<sup>3</sup>. Em ensaios de compressão triaxial esta areia apresenta um ângulo de atrito interno de 28° a 32°.

Em provas de carga diretas realizadas sobre esta areia, mediante o carregamento de uma placa circular de 0,80m à profundidade de 1,5m, obteve-se no caso de areia compacta um diagrama pressões-recalques praticamente linear até pressões da ordem de 70 t/m<sup>2</sup>, com recalques totais da ordem de 9 milímetros e recalques residuais da ordem de 3 milímetros.

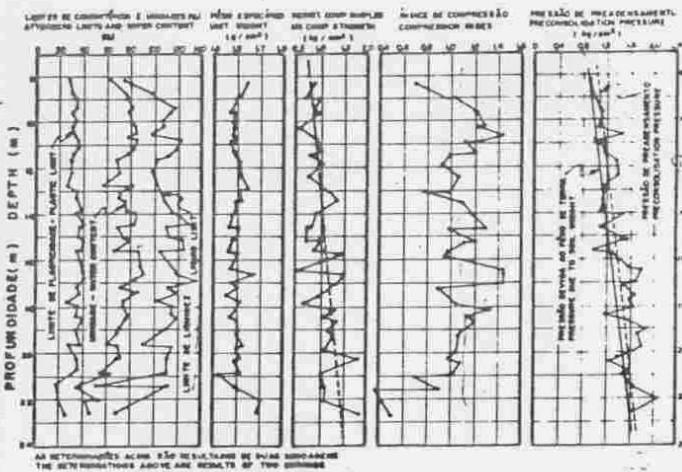
Os sedimentos arenosos profundos são inteiramente análogos, porém em alguns casos a sua granulação é ligeiramente mais grossa. Frequentemente encontram-se restos de conchas dispersos nestes depósitos arenosos.

Argilas marinhas:- As argilas encontram-se em camadas espessas, em alguns casos de até 16m. Estas argilas foram intensamente investigadas pela determinação de sua plasticidade, características de resistência e parâmetros de compressibilidade.

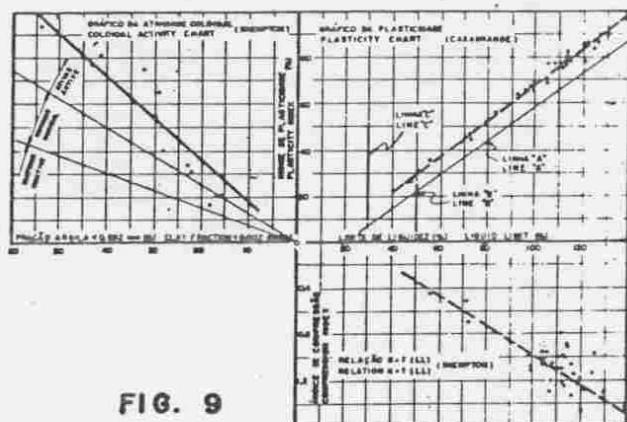
A análise termo-diferencial de uma amostra típica



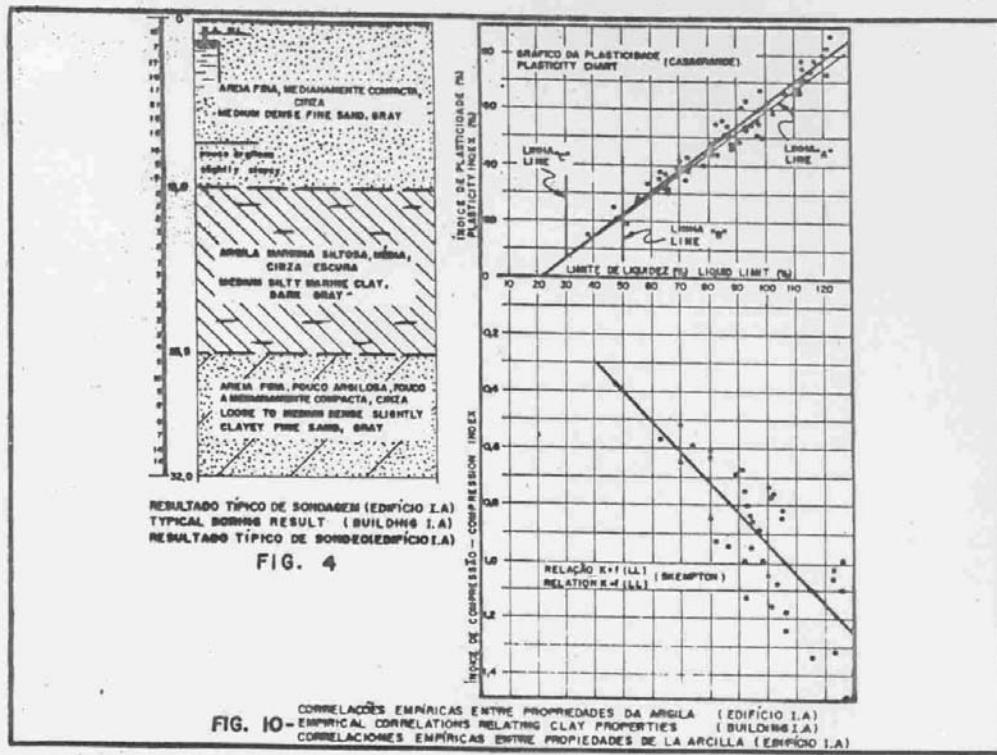
**FIG. 3 —** RESULTADO TÍPICO DE SONDAÇÃO (EDIFÍCIO U)  
RESULTS OF TYPICAL BORING (BUILDING U)

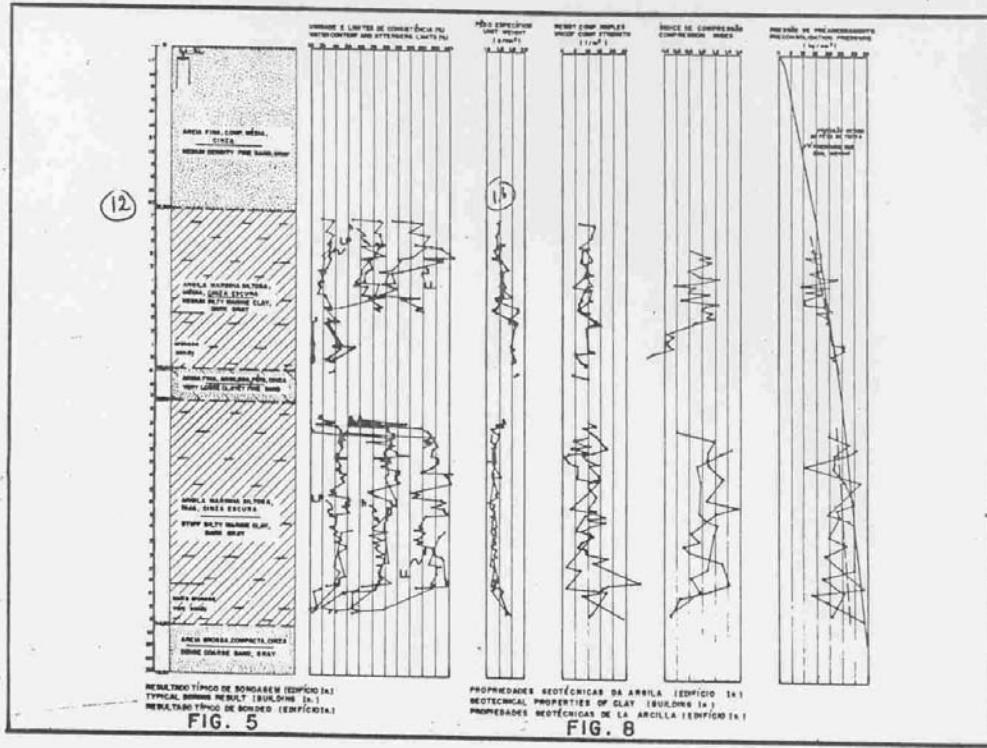


**FIG. 6 —** PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DA ARSILA (EDIFÍCIO U)  
GEOTECHNICAL DATA OF CLAY (BUILDING U)  
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LA ARCILLA (EDIFÍCIO U)



**FIG. 9**  
CORRELAÇÕES EMPIRÍCAS ENTRE ÍNDICES DA ARSILA (EDIFÍCIO U)  
EMPIRICAL CORRELATIONS RELATING CLAY PROPERTIES (BUILDING U)  
CORRELACIONES EMPÍRICAS ENTRE ÍNDICES DE LA ARCILLA (EDIFÍCIO U)





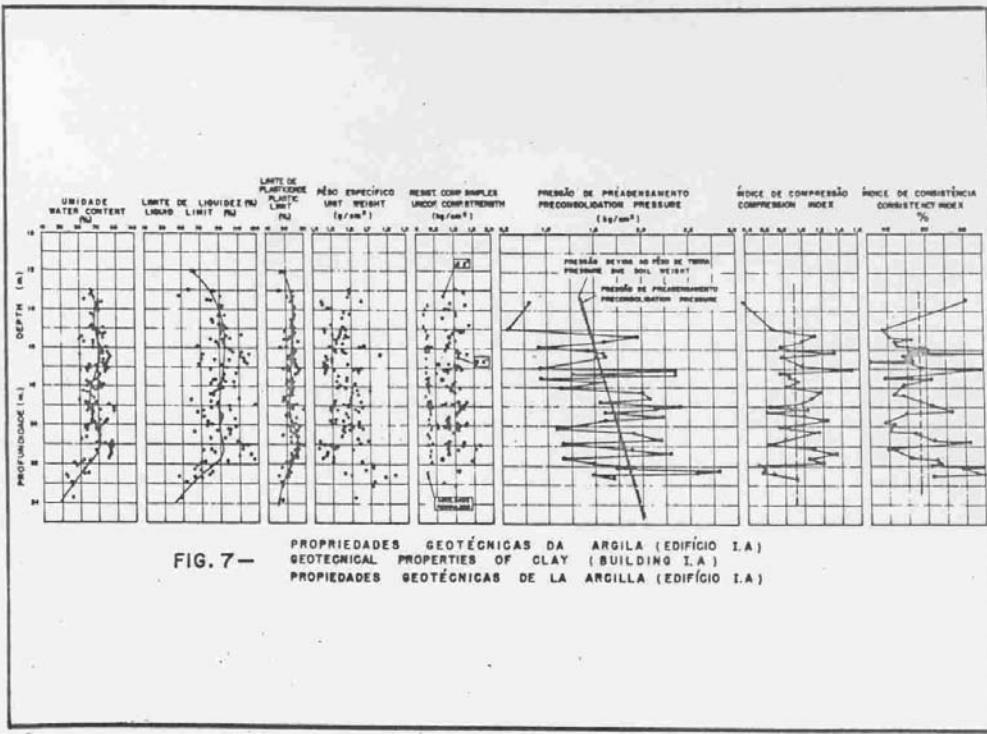
deste solo revelou uma alta porcentagem de minerais de mica hidratada e de tipo montmorilonoide porém contendo alguma caolinita (3).

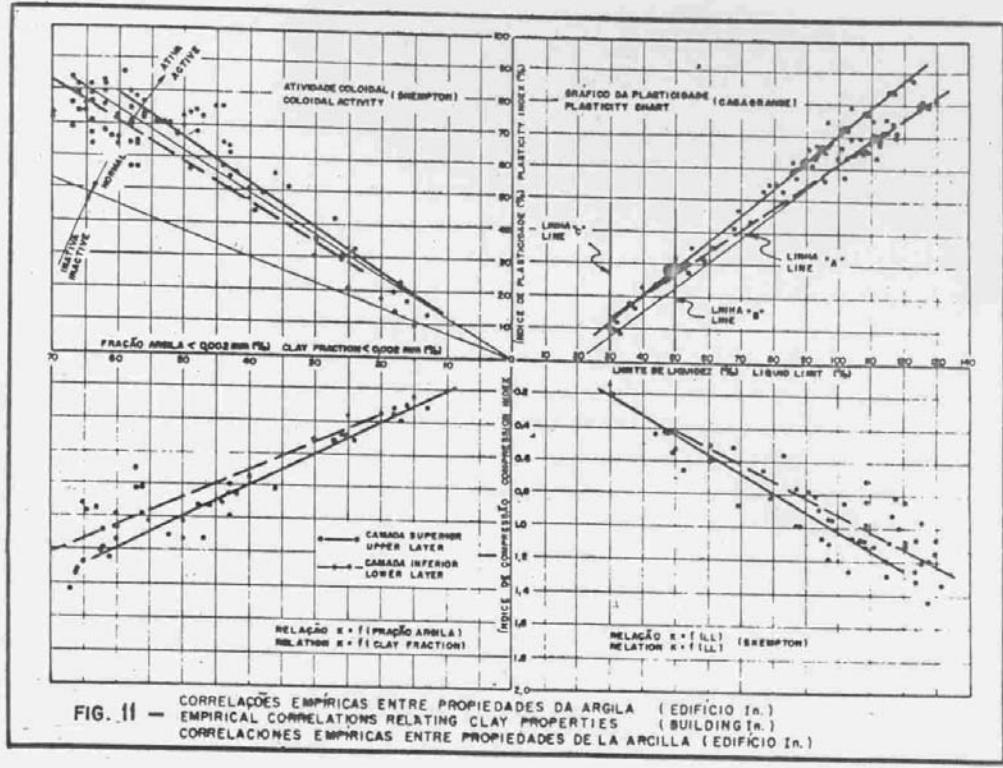
Nas figuras de 6 a 8 são apresentadas na forma de diagramas de sua variação com a profundidade as seguintes propriedades geotécnicas:- limites de consistência, umidade, peso específico natural, resistência à compressão simples; índice de compressão e pressão de préadensamento.

Dos dados apresentados tiram-se as conclusões seguintes, entre inúmeras outras que podem ser obtidas pelo exame atento dos diagramas:-

- a) pelos índices de resistência à penetração medidos durante a execução das sondagens classifica-se as argilas na categoria de argila muito moles. Todavia pelos ensaios de resistência à compressão simples elas situam-se na categoria de argilas médias e rijas.
- b) a argila varia ligeiramente de propriedades de local para local, quer nas suas características de plasticidade, quer naquelas de resistência e de compressibilidade.
- c) as argilas são normalmente adensadas.
- d) nas zonas de contato entre as camadas de argila e de areia há sempre uma transição de argila arenosa ou areia argilosa.
- e) a argila é medianamente sensível a sensível (sensibilidade da ordem de 4).
- f) em determinados casos alguns índices apresentam uma lei de variação com a profundidade, porém em outros a distribuição dos dados é bastante errática.
- g) procurou-se verificar a correlação entre o estado de consistência da argila e o seu índice de consistência (cujo valor médio num dos casos é de 48%). Todavia, comparando este valor com aquele apresentado em (4), que relata o caso de uma argila semelhante, porém altamente préadensada, onde o índice de consistência médio assume também o mesmo valor, conclui-se que a variação deste índice é muito pouco sensível às variações do estado de consistência da argila.

Nas figuras de 9 a 11 são apresentadas algumas das usuais correlações empíricas entre índices:- gráfico da plasticidade; gráfico da atividade coloidal; gráfico limite de liquidez-índice de compressão; destas correlações resulta aquela entre índice de compressão-fração argila. As argilas marinhas situam-se sempre ligeiramente acima da linha "A" do gráfico da plasticidade e são ativas (atividade coloidal entre 1,2 e 1,8).





Estimativa dos recalques: Para vários edifícios procedeu-se o cálculo sistemático e minucioso das pressões transmitidas às camadas de argilas por meio da fórmula de Boussinesq considerando as cargas dos pilares como sendo pontuais e independentes entre si. As pressões foram calculadas em pontos criteriosamente escolhidos em planta e em número equivalente a 70% do número de pilares em cada edifício. Em cada um desses pontos as pressões transmitidas foram calculadas em pelo menos 3 profundidades ao longo da altura de cada camada de argila.

Os recalques foram calculados pela fórmula usual:-

$$\Delta H = \sum \frac{K H}{1 + \varepsilon_1} \log \frac{P_f}{P_i}$$

onde:-  $\Delta H$  = recalque por adensamento (compressão primária) das camadas de argila quando submetidas à acréscimos de pressões  $P_f - P_i$ ;

$H$  = espessura das camadas de argila, de índice de compressão  $K$  e índice de vazios  $\varepsilon_1$

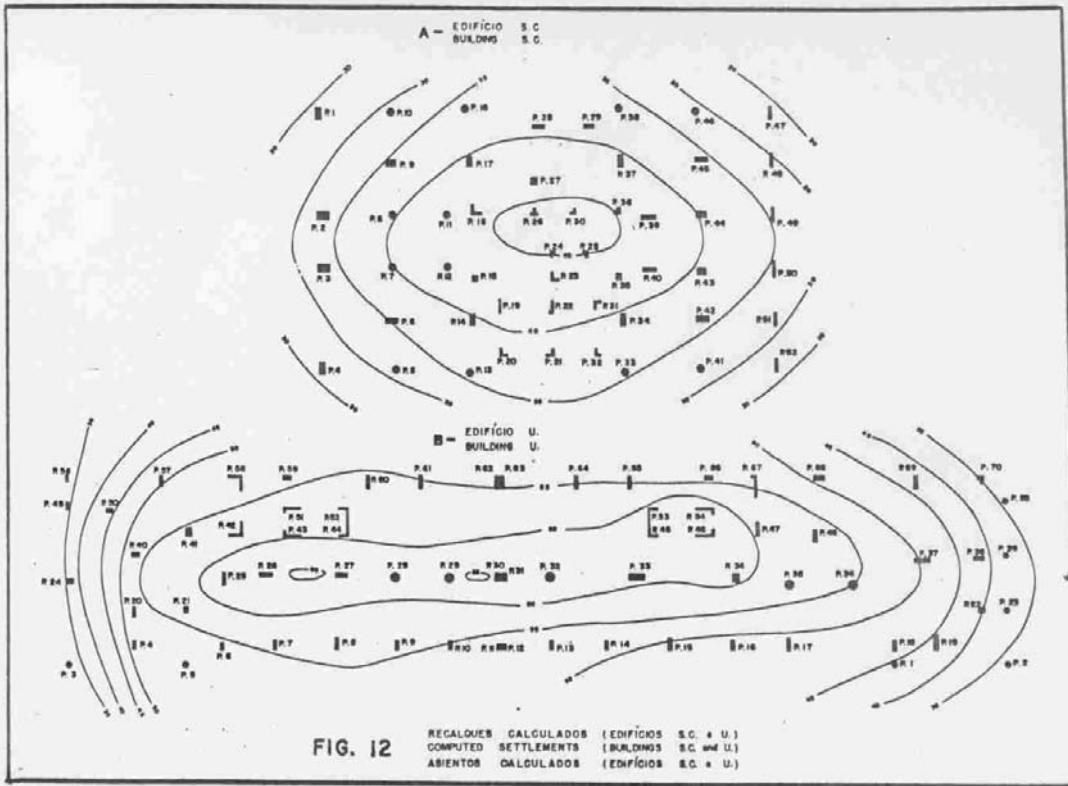
$P_i$  = pressão inicial na argila devida ao peso de terra e igual a pressão de préadensamento (argila normalmente adensada).

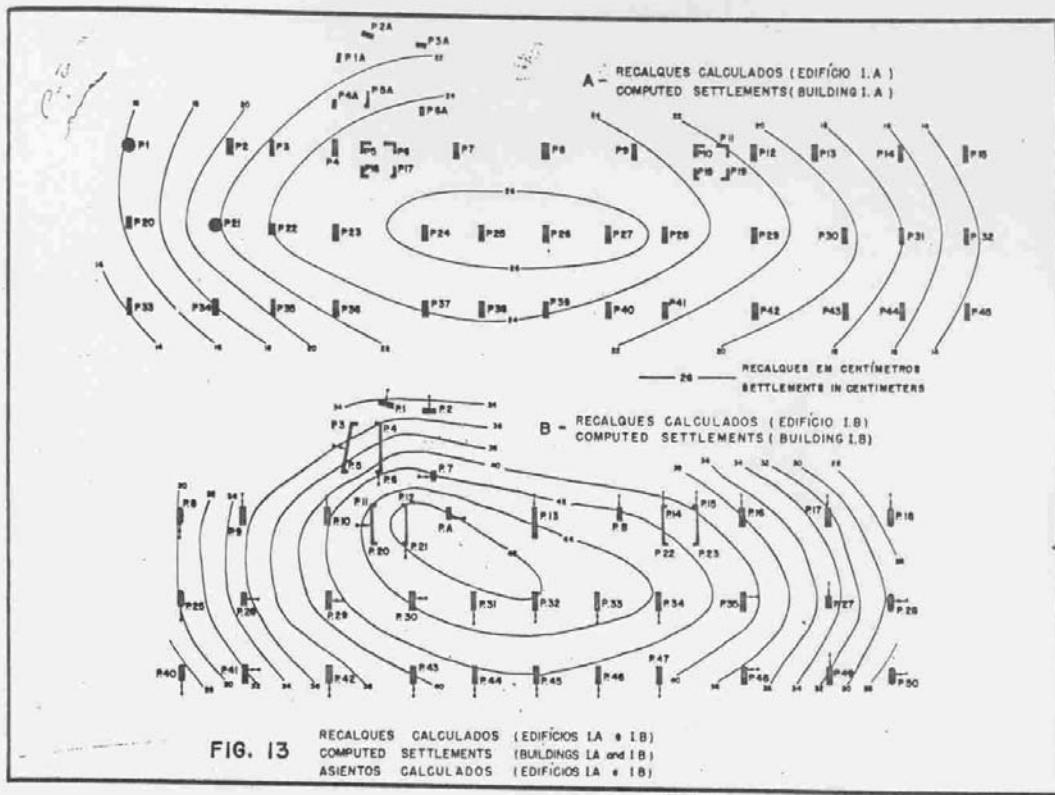
Nas figuras 12 e 13 são apresentados os resultados desta análise teórica dos recalques para os edifícios S.C., U., I.A. e I.B. Na tabela seguinte resumimos esses resultados:-

Edifício	re cal que		
	total máximo (cm)	total mínimo (cm)	diferencial específico
S.C.	46	26	1/50
U.	64	35	1/30
I.A.	26	14	1/70
I.B.	46	28	1/60

Em todos esses prédios incorporou-se às fundações um sistema de vigas de rigidez com função de redistribuir as cargas aplicadas nas sapatas de acordo com as deformações sofridas, tendendo assim a reduzir grandemente os recalques diferenciais entre pilares e atenuar os eventuais efeitos prejudiciais desses recalques sobre a estrutura.

Esta rigidez adicional bem como a rigidez da própria estrutura farão com que a hipótese acima empregada no cálculo, isto é, da flexibilidade absoluta da estrutura, não seja válida de forma que os valores constantes da tabela





representam uma ordem de grandezza dos valores reais não tendo significado absoluto e rigoroso. A influência da rigidez é no sentido de uniformizar os recalques, diminuindo sensivelmente os recalques diferenciais específicos.

Determinação do coeficiente de adensamento. As determinações dos coeficientes de adensamento médios representativos de todas as camadas de argilas compressíveis foram feitas considerando os acréscimos de pressões à partir da pressão inicial devida ao peso de terra, que é no caso da argila de Santos igual a pressão de préadensamento.

Todavia, como a determinação do coeficiente de adensamento para variações de pressões próximas a pressão de préadensamento é bastante aleatória, procedeu-se da forma abaixo que procura eliminar essa fonte de erro. Calculou-se o coeficiente de adensamento para pressões bastante acima da pressão de préadensamento e com este valor determinou-se o coeficiente de permeabilidade pela fórmula:-

$$k = \frac{c_v \alpha_v \gamma_a}{1 + \epsilon}$$

cujos valores, quando plotados com o índice de vazios em gráfico  $\epsilon = (\log k)$ , situam-se aproximadamente sobre uma reta. O prolongamento dessa reta até valores do índice de vazios próximos do préadensamento determina um certo valor  $\bar{\epsilon}_v$ .

Analogamente são calculados os coeficientes de compressibilidade ( $a = \Delta \epsilon / \Delta p$ ) a partir do ensaio de adensamento, cujos valores quando levados em gráfico  $\log p \times \log a$  situam-se sobre uma reta. A extrapolação desta reta até valores de  $p$  próximos à pressão de préadensamento determina um valor particular  $\bar{a}_v$ .

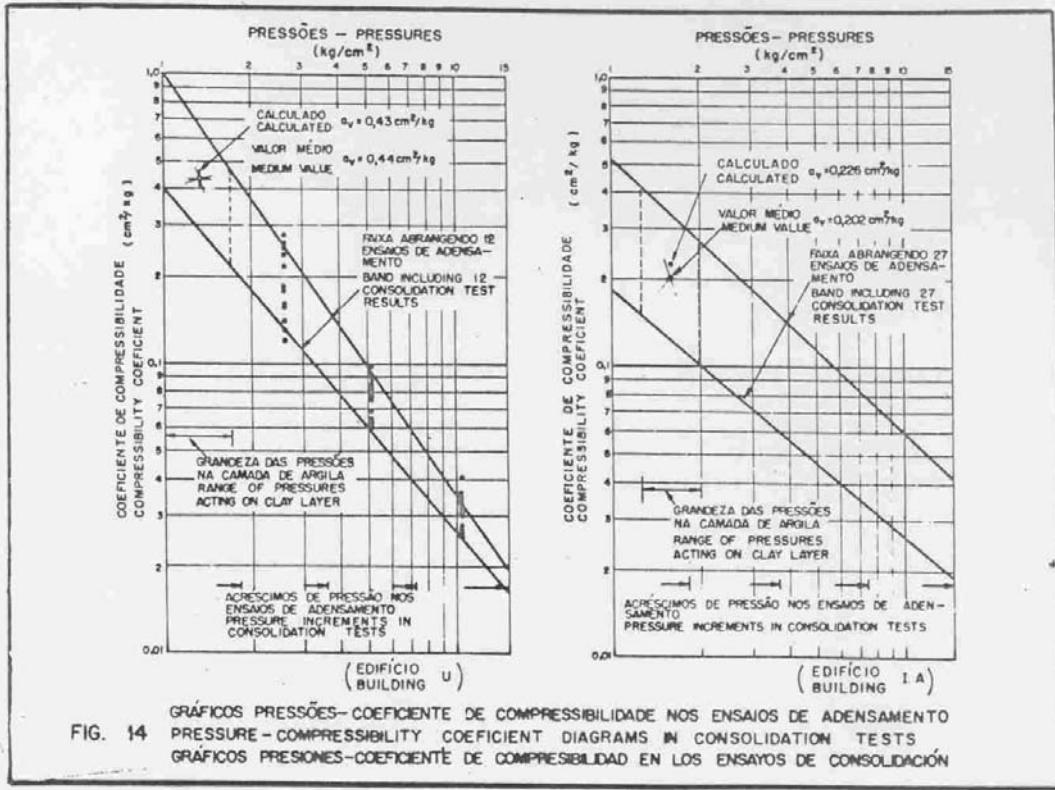
O coeficiente de adensamento é então calculado pela fórmula:-

$$c_v = \frac{\bar{a}_v (1 + \epsilon_m)}{\alpha_v \gamma_a}$$

onde:  $\epsilon_m$  é o índice de vazios médio dos valores correspondentes a  $p_1 = p_a + p_f$ .

Na figura 14 apresentamos os gráficos logarítmico das pressões-logarítmico do coeficiente de compressibilidade para o caso dos ensaios de adensamento realizados sobre as argilas dos locais dos edifícios I.A. e U.. Nessa figura estão indicadas apenas as faixas que abrangem todas as retas determinadas em cada ensaio de adensamento, e ainda a determinação gráfica do valor médio do coeficiente de adensamento para a gama de variação das pressões aplicadas na camada de argila.

Analiticamente calculam-se os parâmetros médios



estimados pelas fórmulas seguintes, que são adaptadas daquelas sugeridas por Terzaghi em (5): -

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum \varepsilon_i H_i}{\sum H_i} \quad \bar{a}_v = \frac{\sum a_{vi} H_i}{\sum H_i}$$

$$c_v = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i (1 + \varepsilon_i)}{a_{vi} c_{vi}} (1 + \bar{\varepsilon})^2}$$

Nestas equações os valores de  $\varepsilon_i$ ,  $a_{vi}$  e  $c_{vi}$  não aqueles determinados pelas extrapolações das retas acima referidas.

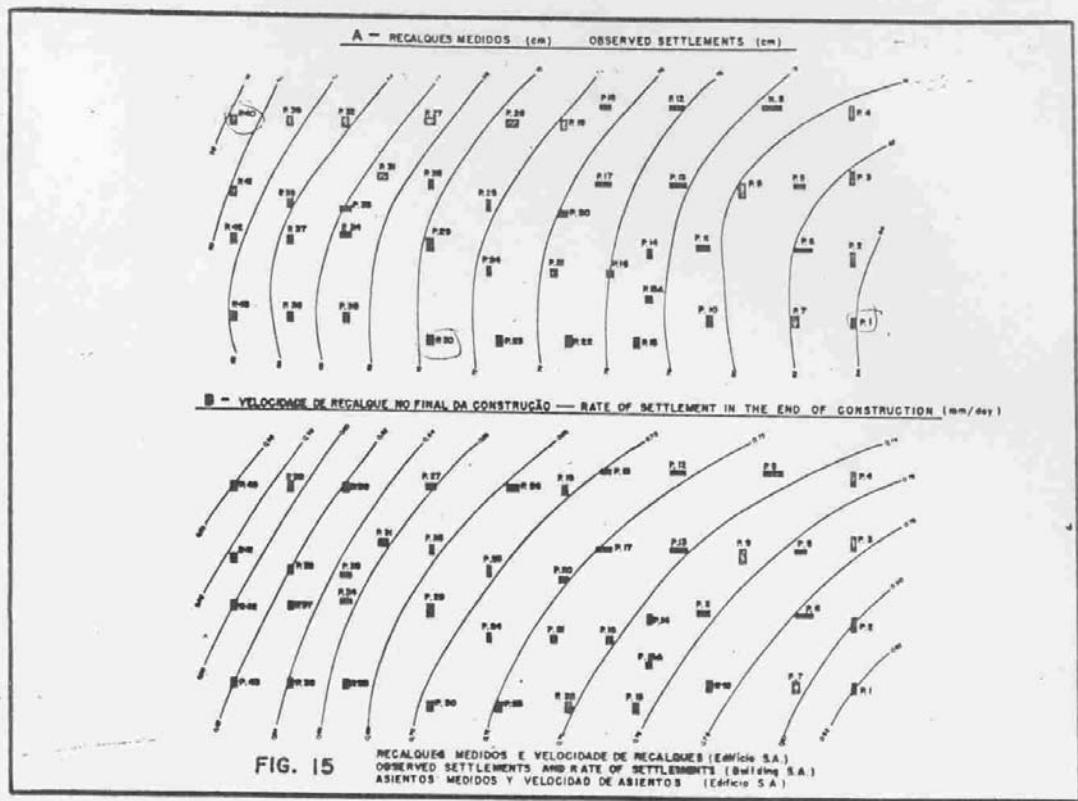
A aplicação deste método para os casos dos edifícios I.A. e U. resultou para o coeficiente de adensamento respectivamente os valores  $3,06 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{seg}$  e  $2,5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{seg}$ .

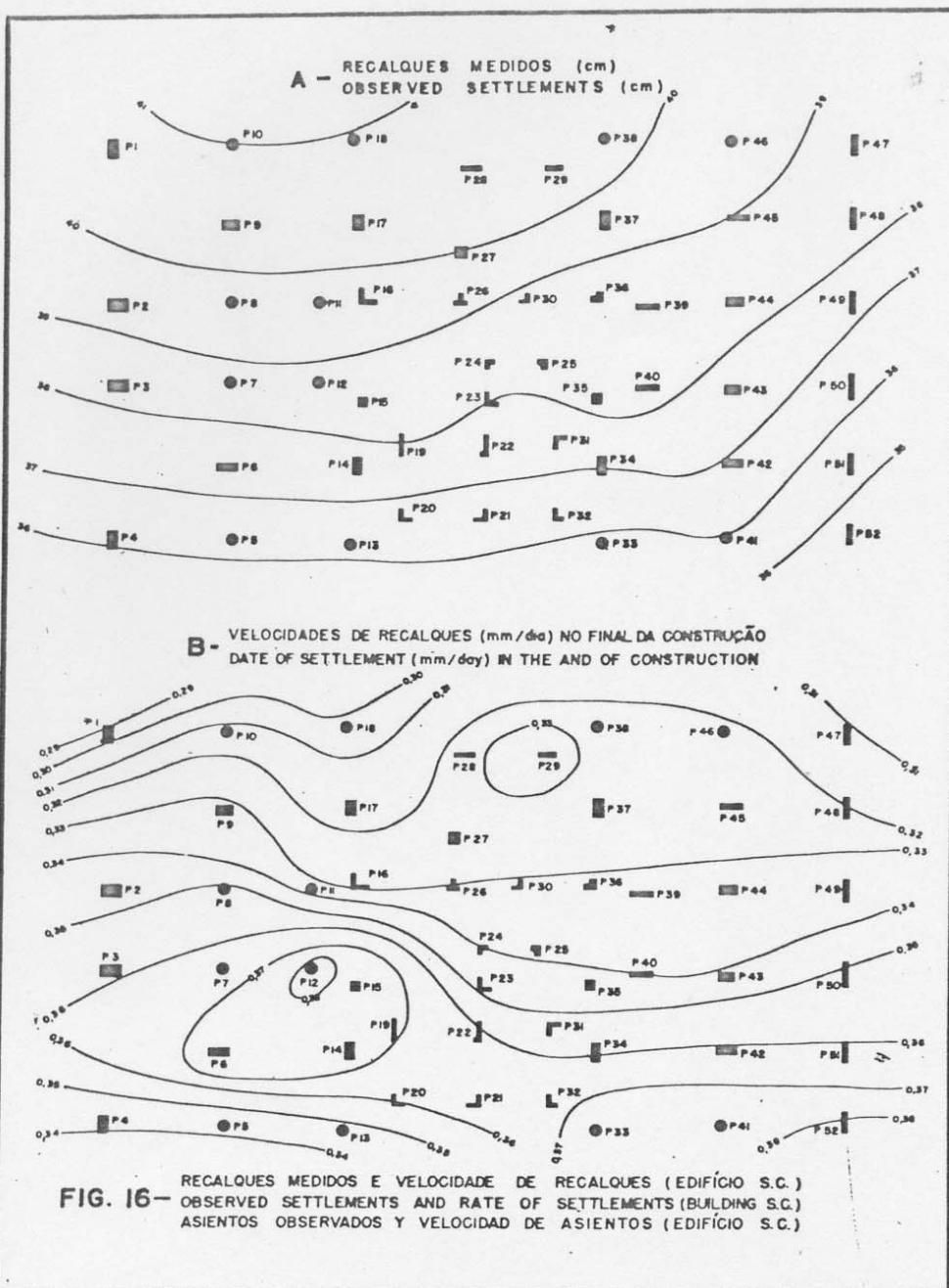
Recalques medidos: - Desde 1947, quando foi iniciada a construção do edifício S.A., que foi o primeiro de grande porte construído na orla praiana da cidade de Santos, vem sendo realizada uma minuciosa observação do comportamento de inúmeros edifícios quanto aos seus recalques. Esta observação consiste no nivelamento periódico de indicadores de altura instalados nos pilares de concreto dos prédios por meio de aparelho do tipo Terzaghi. Como referência fixa de nível foram instalados em cada edifício marcos de referência tubulares profundos engastados em depósitos arenosos compactos subjacentes à todas as camadas de argilas compressíveis.

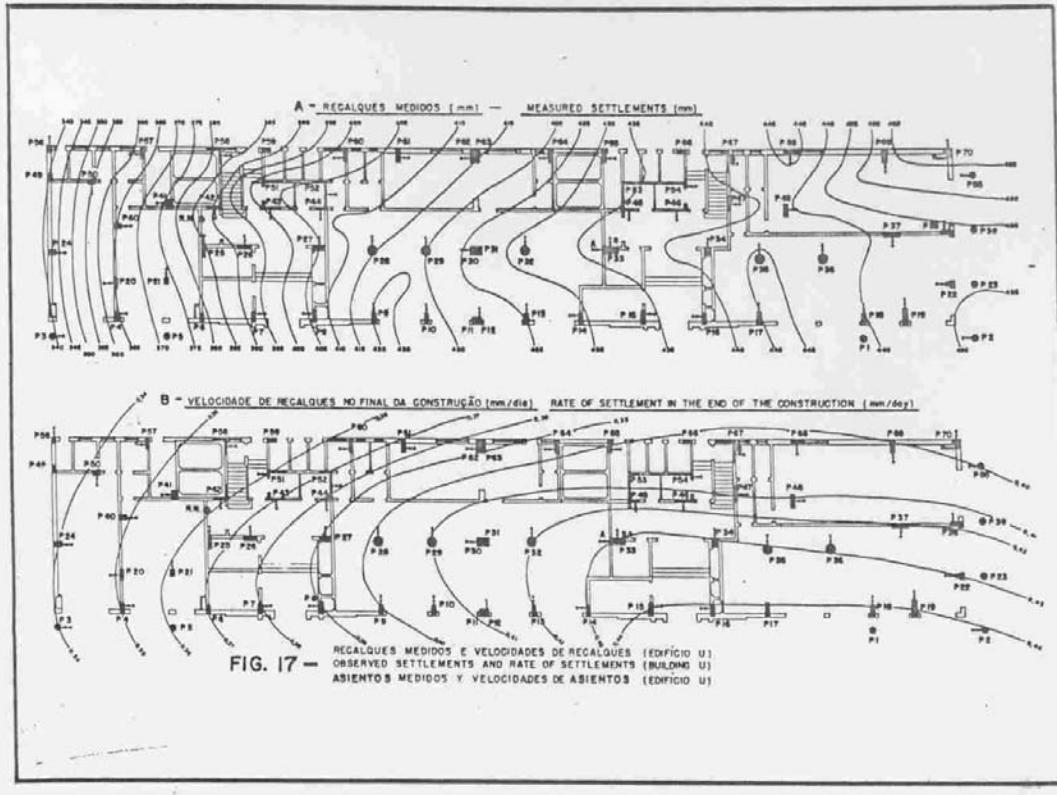
Edifício S.A.:- É um edifício com estrutura de concreto armado com 15 pavimentos e carga total de 7.500 t. Sua construção foi iniciada em março de 1947. A sua fundação é por meio de sapatas isoladas apoiadas à profundidade de 1,2m onde aplicam a pressão de  $2,5 \text{ kg/cm}^2$  e são interligadas por vigas, formando um reticulado para servir como elemento de rigidez adicional à estrutura e com a finalidade de reduzir os recalques diferenciais.

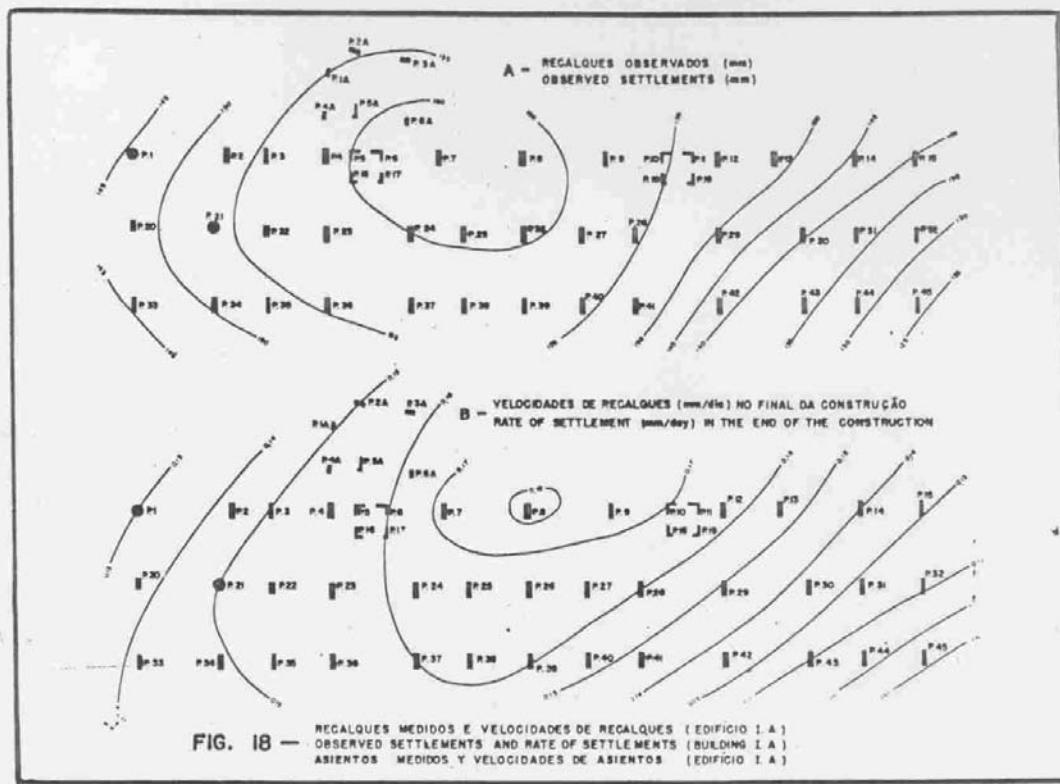
Edifício S.C.:- Este edifício iniciado em novembro de 1949, tem 14 pavimentos com uma carga total de 6.400 t. As fundações são por sapatas isoladas interligadas por vigas de rigidez. As sapatas, numa faixa central, apoiam-se na profundidade de 2m e nas faixas adjacentes à profundidade de 1m. Todas as sapatas aplicam na areia pressões de  $25 \text{ t/m}^2$ .

Edifício U.:- O edifício possui 10 andares apresentando em planta uma forma retangular bastante alongada. O peso total da estrutura é de 7.900 t e sua construção foi iniciada em setembro de 1950.









**Edifícios I.A. e I.B.:** Estes edifícios situam-se muito próximos e possuem respectivamente 8 e 15 pavimentos com cargas totais de 4.900 t e 7.800 t. As fundações do edifício I.A. são constituídas por sapatas corridas reunindo grupos de 3 pilares e dispostas geralmente em direção normal às curvas de iguais recalques calculados; ligando algumas destas sapatas encontram-se vigas de rigidez. A fundação do edifício I.B. é composta por 3 sapatas corridas longitudinais ao prédio. A construção de ambos os edifícios foi iniciada por volta de fevereiro de 1954 e junho do mesmo ano.

Os resultados das observações dos recalques, até o presente, desses cinco edifícios encontram-se nas figuras 15 a 19, onde estão traçadas as curvas de iguais recalques sobre as plantas de situação de pilares dos prédios. Nessas mesmas figuras são apresentadas as curvas de iguais velocidades de recalques quando estas atingem o máximo, por volta do final de aplicação das cargas.

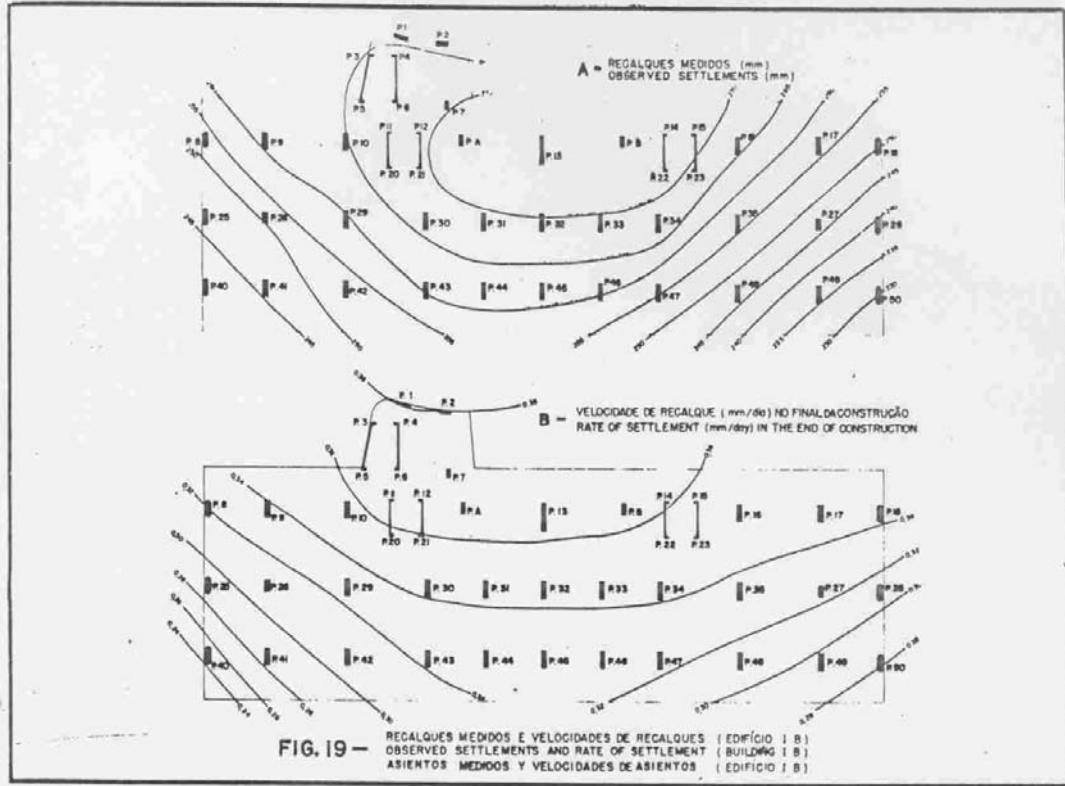
Nas figuras 20 a 24 são apresentadas, de cada edifício, curvas típicas tempo-recalque e tempo-velocidade de recalque.

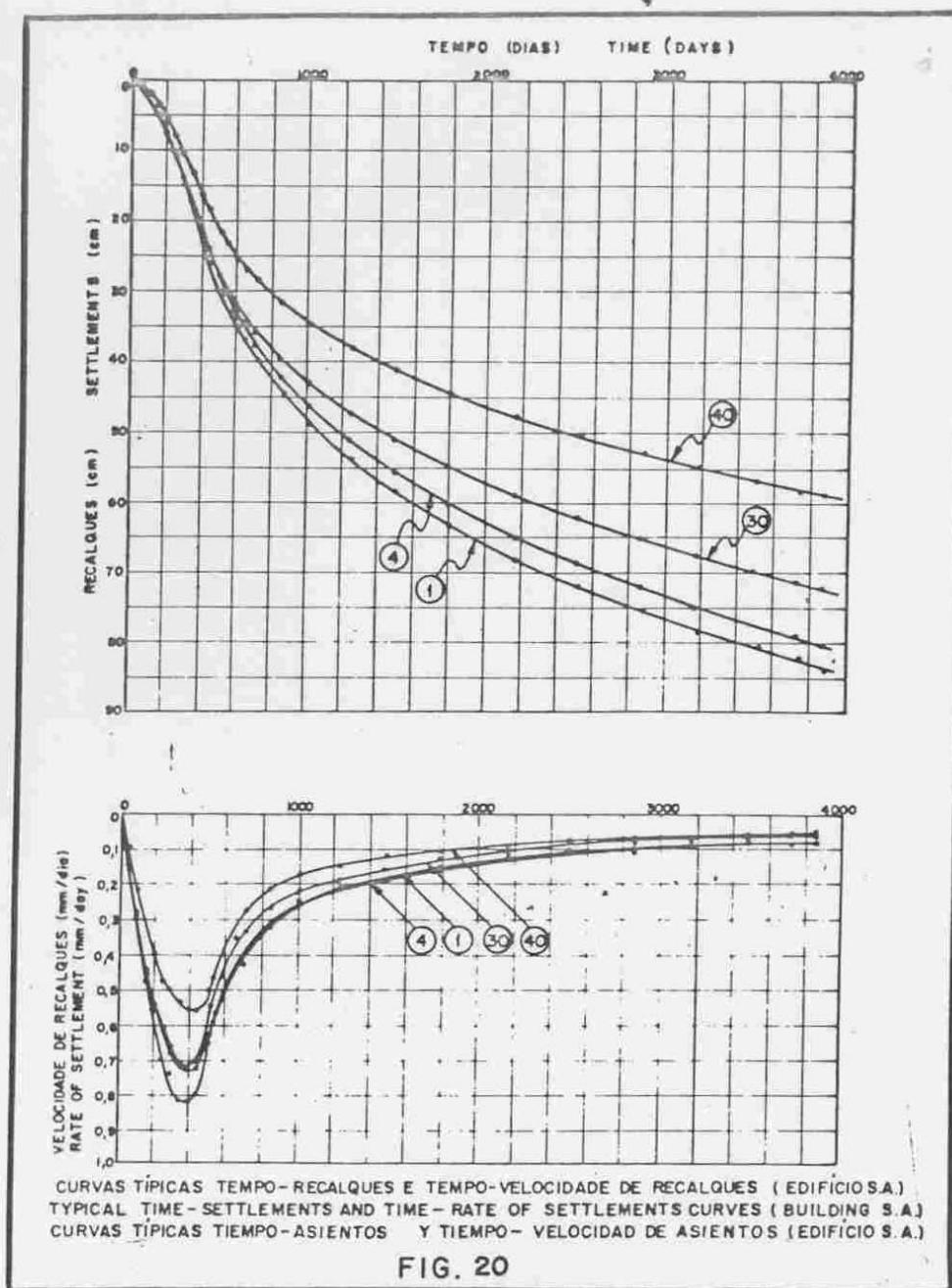
Nas tabelas abaixo resumimos alguns dos valores obtidos dessas observações:-

Edifício	r e c a l q u e s			
	total má- ximo (cm)	total mí- nimo (cm)	diferen- cial espe- cífico	diferencial de desapri- mo (cm)
S.A.	84	58	1/120	26
S.C.	41	35	1/300	6
U.	44,5	34	1/250	9,5
I.A.	16	12,5	1/550	2
I.B.	27	23	1/310	3,5

Edifício	velocidades máximas (mm/dia)	
	no final da construção	atual
S.A.	0,82	0,08
S.C.	0,38	0,10
U.	0,44	0,07
I.A.	0,18	0,04
I.B.	0,38	0,08

Com referência aos recalques medidos do edifício S.A., cumpre assinalar que pelas investigações do subsolo





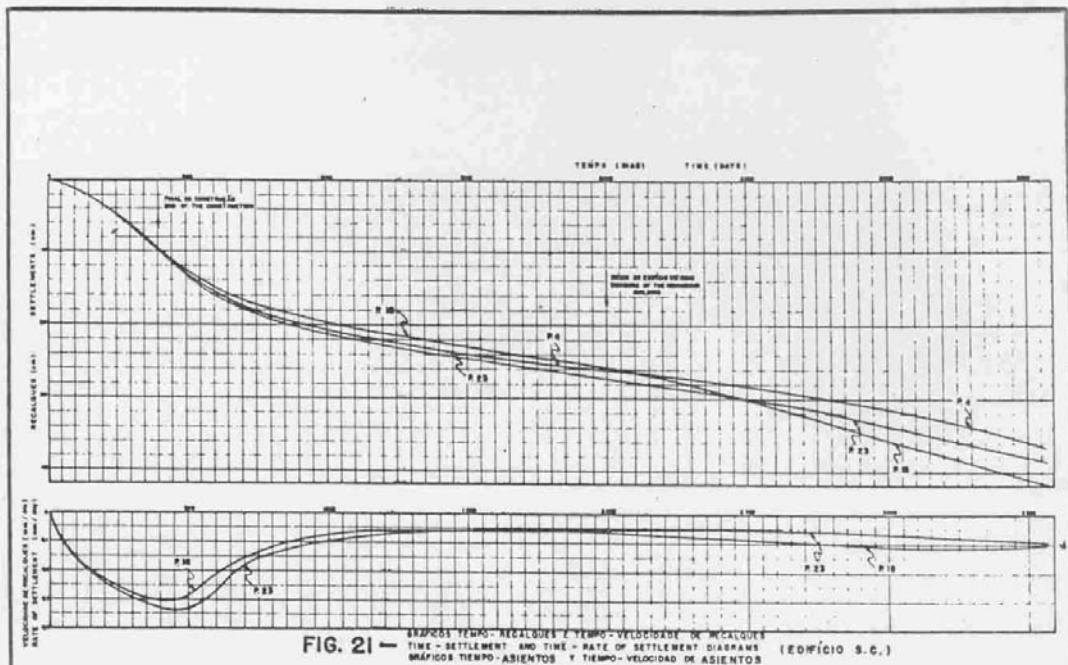


FIG. 21 — GRÁFICOS TIEMPO - RECALQUES Y TIEMPO - VELOCIDAD DE RECALQUE  
TIME - SETTLEMENT AND TIME - RATE OF SETTLEMENT DIAGRAMS (EDIFICIO S.C.)  
GRÁFICOS TIEMPO - ASIENTOS Y TIEMPO - VELOCIDAD DE ASIENTOS

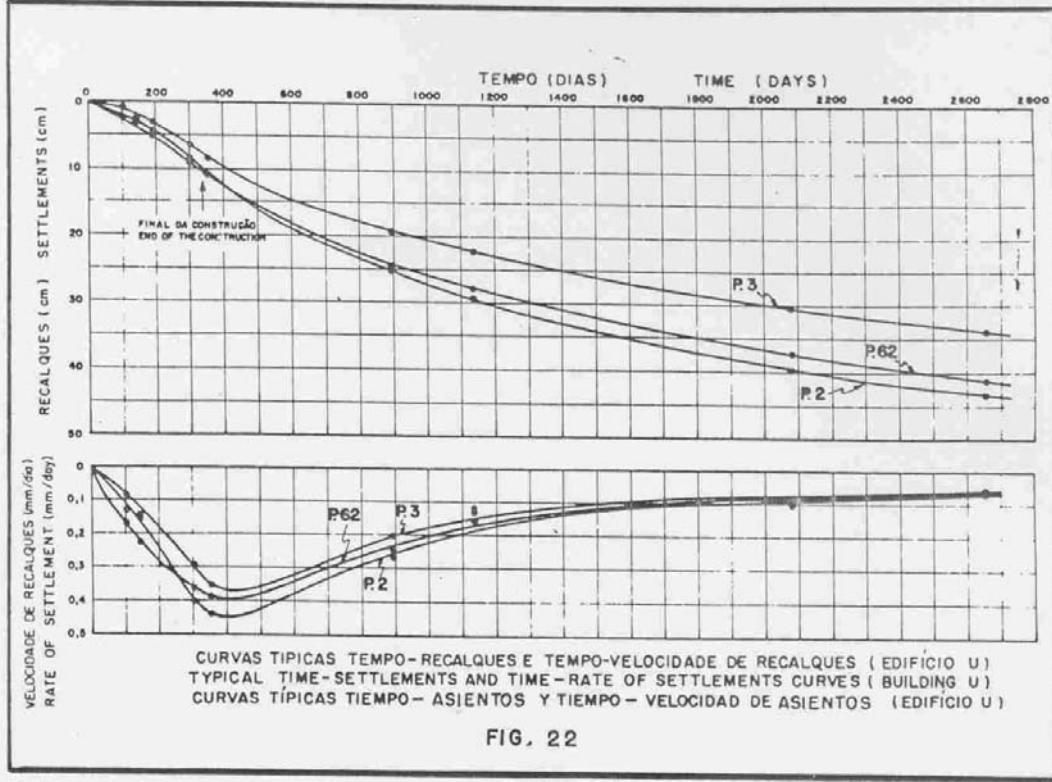


FIG. 22

h2

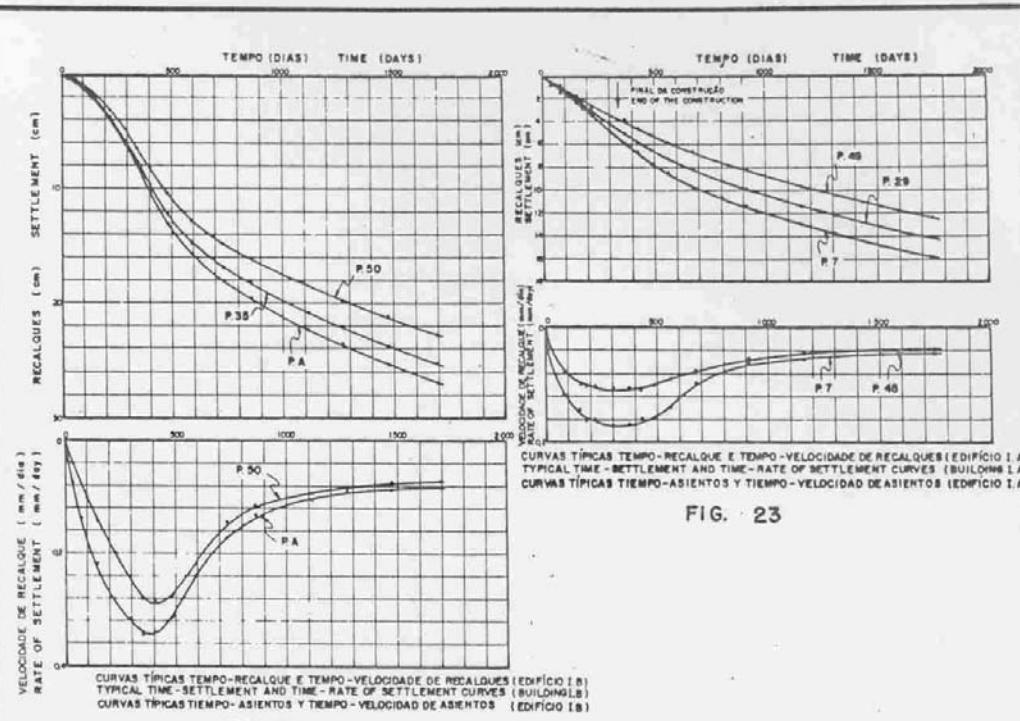


FIG. 24

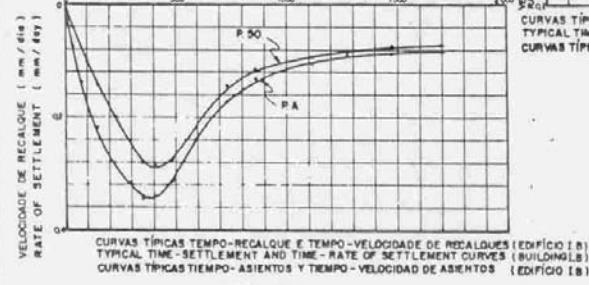


FIG. 24

procedidas na época não se verificou qualquer variação nas características do subsolo que pudesse explicar a ocorrência de maiores recalques num dos cantos do edifício (Pilar P 1 da figura 15).

Pela figura 21 podemos observar que os recalques do edifício S.C. foram muito influenciados pela construção de um edifício vizinho. Até aproximadamente 2.000 dias os recalques foram normais, dando-se o máximo no centro do edifício; após o início da construção do edifício vizinho nota-se uma aceleração dos recalques, principalmente nos pilares mais próximos daquele, e que vem provocando recalques diferenciais de desaprumo conforme verifica-se pela figura 16.

Conforme a análise procedida em (6) todos os recalques atuais desses edifícios ainda são provenientes da compressão primária das camadas de argila marinha.

Conclusões: - O subsolo na orla praiana da cidade de Santos é constituído até profundidades superiores a 50m por camadas de areia e argila alternadas e que são típicas da região.

Inúmeros resultados de ensaios de laboratório sobre amostras indeforadas caracterizam devidamente as propriedades geotécnicas da argila marinha. Vários locais são investigados minuciosamente, podendo-se concluir que em todos eles a argila situa-se ligeiramente acima da linha "A" do gráfico da plasticidade e é de natureza sensível e ativa. Outrossim, constatou-se pelos exames realizados que a argila é normalmente adensada e compressível.

Para vários edifícios fez-se a estimativa teórica dos recalques pelos métodos usuais disponíveis.

São apresentados ainda os resultados das observações minuciosas de recalques de vários prédios construídos nessa região, o mais antigo contando já 12 anos e onde o recalque máximo é atualmente de 84 cm. Comparando os recalques atuais como aqueles estimados teoricamente, concluimos que a esta previsão fornece apenas uma ordem de grandeza dos recalques a serem alcançados na realidade. Devem-se estes resultados às hipóteses adotadas no cálculo teórico.

#### REFERÉNCIAS

- 1 - Terzaghi, C. & Peck, R. - Soil Mechanics in Engineering Practice
- 2 - Mello, V.F.B. de, Silveira, E.B.S. & Quaresma, A.R. - Some field correlations on dynamic penetration resistance in exploratory borings, by Geotécnica, Brasil - Primer Congreso Panamericano de Suelos y Cimentaciones.

- 3 - Comunicação pessoal do Prof. T.W. Lambe do Soil Solidification Laboratory, M.I.T.
- 4 - Teixeira, A.H. - Caso de um edifício em que a camada de argila (Santos) se encontrava inusitadamente pradensada Primer Congreso Panamericano de Suelos y Cimentaciones.
- 5 - Terzaghi, K. - Sampling Testing and Averaging - Proceedings, the Purdue Conference on Soil Mechanics and Its Applications - September 1940.
- 6 - Teixeira, A.H. - Contribuição ao estudo da relação tempo-recalques de estruturas existentes - Primer Congreso Panamericano de Suelos y Cimentaciones,

Conclusions: - The subsoil in the shore area of the city of Santos consists of alternating layers of sand and clay typical in this region, reaching depths of more than 50m.

The geotechnical properties of the marine clay are adequately described by the results of a great number of laboratory tests performed on undisturbed samples. Several sites are investigated in detail, and it is concluded that in all of them the clay is situated slightly above the "A" line on the plasticity chart, and is sensitive and active. The studies also show that the clay is normally consolidated and compressible.

Settlement estimates, computed by the usual "theoretical" method are given for several buildings.

The results of detailed settlement observations are also given for several buildings in the area, the oldest of which was built 12 years ago and shows a maximum settlement of 84cm to date. A comparison of the present settlements with those estimated theoretically, leads to the conclusion that these estimates give at best only the order of magnitude of the settlements which will in reality develop. The discrepancies are attributed to the assumptions employed in the computations.

Conclusiones: - El subsuelo en la orla playera de la ciudad de Santos es constituido hasta profundidades superiores a 50m por camadas de arena y arcilla alternadas y que son típicas de la región.

Innumeros resultados de ensayos de laboratorio sobre muestras indeformadas caracterizan debidamente las propiedades geotécnicas de la arcilla marítima. Varios locales son investigados minuciosamente pudiéndose concluir que en todos ellos la arcilla se sitúa ligeramente encima de la línea "A" del gráfico de plasticidad es de naturaleza sensible y activa. Además, se constató por medio de los

amientos realizados que la arcilla es normalmente consolidada y compresible.

Para varios edificios se hizo la apreciación teórica de los asientos por los métodos usuales disponibles.

Son todavía presentados los resultados de las observaciones minuciosas de asientos de varios edificios construidos en esa región el más antiguo que tiene 12 años y donde el asiento máximo es actualmente de 84cm. Comparando los asientos actuales con aquellos apreciados teóricamente concluimos que a esta previsión suple apenas una orden la grandeza de los asientos a ser alcanzados en la realidad.

Estos resultados se deben a las hipóteses adaptadas en el cálculo teórico.