

182

6^o Congresso Nacional de Geotecnia

A Geotecnia
nas Infraestruturas
de Transportes, Energia e Ambiente

IST, Lisboa
15 a 18 de Setembro de 1997

Volume
2/3

Editado por:
Sociedade Portuguesa de Geotecnia
e Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico

FUNDAÇÕES POR ESTACAS: PREVISÕES E CONTROLES TRADICIONAIS REAPRECIADOS MEDIANTE ESTATÍSTICA.

PILE FOUNDATIONS: TRADITIONAL PREDICTIONS AND CONTROL REASSESSED BY STATISTICS.

de Mello, Victor F.B. - *Victor F.B. de Mello & Associados S/C Ltda.*

Sobral, Antonio Carlos S. - *Victor F.B. de Mello & Associados S/C Ltda.*

RESUMO

Empregando ampla documentação de estacarias com bons números de provas de carga, recorre-se a análises estatísticas, com suas dispersões, para explicar, corrigir, e redirecionar os principais procedimentos mais tradicionais e difundidos de projeto e controle de qualidade de estacarias.

ABSTRACT

Employing two sets of ample and good data from projects of driven precast concrete piles, with good numbers of load tests, the authors resort to unpretentious statistical regressions, with their dispersions, to explain, correct, and redirect, the principal more traditional and published procedures in use for design and quality control of driven pile foundation projects.

1. INTRODUÇÃO.

Modernamente as publicações e apresentações da Geotecnia dirigem-se com sofreguidão a favor de **DESENVOLVIMENTOS RECENTES** gerando sempre a impressão da prioridade por criatividades episódicas, descobertas casuais (de segunda ordem), **EUREKA**. De meu lado tenho procurado frizar que os **PROBLEMAS BÁSICOS DA PRÁTICA PROFISSIONAL** continuam os mesmos, apenas com desafios progressivamente crescentes, tanto por decrescente latitude de escolha de locais e condições geológico-geotécnicas, como por crescente exigência de qualidade do produto acabado. Assim, temos que formular e encarar os problemas e soluções como **SEMPRE INSUFICIENTEMENTE CORRETOS SALVO POR DECISÃO TRANSITÓRIA**, sempre associados a **COEFICIENTES DE AJUSTES** associados à experiência e às precisões da **OBSERVAÇÃO DE TAL EXPERIÊNCIA**, e, portanto, sempre requerendo **VISÃO NOVA E ATUALIZADA**, com percepção das dispersões, e, moto contínuo, com busca persistente da redução da faixa de tais dispersões.

Um caso de ampla difusão no campo das fundações é o das estacas pré-moldadas cravadas que foi bastante e continua sendo, tratado com confiança pelos empreiteiros, a despeito de que todas as investigações e publicações de visão acadêmica o renegam. Podemos listar uma série (resumida) de estudos publicados sucessivamente (Cummings, 1940; Sorensen, 1957; Flaate, 1964; Olson, 1967; Poulos, 1980; Liang, 1997). A frequência de tais estudos aumenta porquanto há décadas que não se ousa formular nova(s) fórmula(s) dinâmica(s), as velhas continuam orientando a rotina das obras, e multiplicam-se os estudos, motivados seja para comparar estacas cravadas com as escavadas (com mercado em expansão) seja para orientar reformulações de **CÓDIGOS DE FUNDAÇÕES**.

Desde Smith (1955, 1960) passou a ser reconhecida e aprimorada a Equação de Onda para a desejada orientação das estacas cravadas. E já há uma dezena de anos têm sido aprimoradas as Provas de Carga Dinâmicas, PCDs (Goble, 1980; Aoki, 1991; de Mello, 1993) sobre algumas estacas de cada estacaria, com difundido e reconhecido sucesso em minimizar a exigência e os ônus (logísticos e econômicos) das Provas de Carga Estáticas, PCEs.

Em princípio, em qualquer obra significativa a meta final só é suprida por poucas (1 a 2; $\leq 1\%$?) PCEs (comprobatórias, caras, a-posteriori, maioria de vezes arriscadas de não pertencerem ao universo estatístico representativo); um pequeno universo (6 a 12; 2 a 3% ?) merece ser parcialmente confirmado por PCDs; e, a estacaria total depende basicamente da GARANTIA DE HOMOGENEIDADE DE RESULTADO pelo controle de qualidade garantido dos procedimentos construtivos de cravação razoavelmente relacionados causa-efeito. Esta a razão pela qual persiste o uso, segundo preferências de cada Executora, de uma ou outra das clássicas Fórmulas Dinâmicas, F.Ds..

Estimamos que é inabalável na prática profissional a convicção de que a “nega” e/ou o “repique” da cravação fornecem um bom índice de CONTROLE DE QUALIDADE DE HOMOGENEIDADE. E, do fato da quase inexistência de comportamentos indesejáveis de estacarias pré-moldadas cravadas, não obstante o reduzidíssimo acêrvo e número de PCEs e PCDs, a conclusão intuitiva inexorável resulta de que esta aparente HOMOGENEIDADE BEM-SUCEDIDA implica estarmos trabalhando muito mais mediante RECEITAS bem seguras do que mediante CORRELAÇÕES (COM SUAS DISPERSÕES E RISCOS RESPECTIVOS). Relembro aqui (de Mello, 1987) a experiência, em setores diversos das tomadas de decisões, de que o ser humano opta muito mais ($\approx 70\%$) por evitar perda do que por procurar o ganho. Assim, concluímos que na maioria das decisões de extrapolar do campo experimental estatístico já estabelecido (no computador neurológico), decisões foram tomadas NA DIREÇÃO DO LADO SEGURO. (N.B. Se em certos casos não resultaram mais seguras, terá sido por engano quanto à influência causa-efeito do parâmetro específico).

Para simplificar nos limitaremos às estacas pré-moldadas de concreto armado, excluindo tópicos menos frequentes como penetrabilidades em camadas duras, tensões geradoras de quebras, etc.

2. PROPÓSITO DE INTERESSES POSSÍVEIS, E ESPECÍFICO ESCOLHIDO NO PRESENTE.

Resumidamente acompanhemos a sequência corrente (instituível em 99% dos casos profissionais de rotina) da investigação, interpretação, projeto, especificações técnicas PRELIMINARES, concorrência, adjudicação, e início de obra.... e consideremos as necessidades, passo a passo.

Frizamos deixar de lado um aspecto que na atual prática construtiva passou a ser tratado de forma prejudicialmente confusa. Quem realmente aplica prioritariamente sua experiência de cravação para a execução da obra é, tem que ser (por conceito legal e profissional, e por prática proveitosa nas repartições de responsabilidades) a EXECUTORA ESPECIALIZADA. Assim, as ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS EFETIVAS (obrigadas a comprovarem o atendimento aos requisitos formais, com conhecimento das Especificações Técnicas Preliminares da Projetista, porém sem se obrigar a seus pormenores como impositivos) serão as formalizadas pela Executora em sua Proposta, com os ajustes posteriores que resultarem SOB SUA RESPONSABILIDADE E POR SUA CONTA, em função de dados da própria obra.

Em nossas análises para o presente trabalho abordamos conhecimentos e desconhecimentos em seu todo, sem pretender repartir entre os diversos e sucessivos componentes da consecução da obra.

2.1. Previsão de comprimento da estaca, e das especificações técnicas preliminares de cravação.

Neste trabalho reportamos a perfis SPT de sondagens (mas em princípio o mesmo vale para qualquer perfilamento-índice vertical, CPT etc eventualmente tido como mais erudito). Ademais, limitamo-nos a dois casos “típicos” de São Paulo, em que os EFEITOS DE EXECUÇÃO da estaca são pressentidos e tidos como de pequena monta, inclusive sem pretendida distinção entre areias e argilas.

Duas grandes tarefas independentes, compõem a meta final única: A ESTACA TORNADA ADEQUADA. Por um lado, depende da homogeneidade/dispersões dos perfis SPT aos quais associar a interação solo-estaca. Existe sempre a necessária tentativa (para justificar projetos alternativos em escolha) de estimar, a partir do perfilamento vertical (de SPT etc.), qual será o comprimento mínimo de penetração, Lok., que possa garantir uma resistência provida na interação solo-estaca (no mínimo igual

ou) pouco maior do que a resistência admitida para a seção de concreto como “estrutura”. Assim, buscamos associar um $L_{ok} = f_1(SPT)$. Por outro lado, depende da homogeneidade/dispersões dos comprimentos L cravados, associados às cargas de trabalho $Q_{trab} = f_2(L_{ok}) = f_3(SPT)$.

Intuitivamente as esperanças de que as funções supra não comecem como estéreis, baseam-se em fatos como: - a) alguma analogia de SPT-cravado e estaca L -cravada; b) as mesmas energias (e parâmetros associados) de cravação dariam L maior nas posições de solo de SPT menor, e vice-versa.

2.2. Fiscalização generalizada de toda a estacaria.

Começada a cravação-piloto, orientada preliminarmente segundo 2.1, busca-se orientar os de REAJUSTES ESPECÍFICOS À OBRA (N.B. não conhecemos casos em que se tenham aplicado mini-reajustes também para blocos com distintos grupos de estacas, no geral entre 1 e 6, o que pareceria justificável).

Passam a ser diametricamente opostas as metas a) da Executora, no sentido do mínimo de ajuste (que afete os custos e lucros); b) da Fiscalização, no sentido de maximizar os L para resguardo quanto a comportamentos ulteriores. Porém, em princípio cada estaca continua a ser cravada com dois propósitos básicos: (i) garantir L_{ok} para $Q_{trab} \geq Q_{trab}$ ESPECIFICADO; (ii) garantir homogeneidade. Toda a estacaria é cravada segundo tais critérios rudimentares de cravação, orientada pelos índices convencionais das “Fórmulas Dinâmicas F.D.”, Energia E , Nega n , Repique r , etc...

2.3. Orientação mais específica e moderna baseada em Provas de Carga Dinâmicas, PCDs, deduzidas através da Equação de Onda e registros de vibrações interpretados por programas computadorizados.

As PCDs podem ser executadas de forma rápida e econômica, sobre 6 a 8 estacas por dia, em paralelo com a própria cravação da estacaria, e provendo curvas carga-recalque que, para pequenos recalques, foram comprovadas assemelharem-se bastante às Provas de Carga Estáticas, PCEs. Assim, em raciocínio sequencial é proveitoso começar por estabelecer os elos entre o acompanhamento técnico rudimentar da cravação (fórmulas dinâmicas) e o monitoramento mais sofisticado de algumas PCDs.

Perante tal mister seria importante que se realizassem séries de PCDs sucessivas numa mesma estaca enquanto seu L for progressivamente aumentado (conjugadamente com as alterações dos índices rudimentares das fórmulas dinâmicas). Para fins estatísticos seriam necessárias várias séries análogas. Praticamente inexitem tais informações, CONSTITUINDO-SE ESTA NA MAIOR LACUNA ATUAL neste campo de estacas pré-moldadas cravadas. Quiçá a explicação seja fácil, por dois dominantes complexos de insuficiência científica: um, de que as fórmulas dinâmicas nada valiam, seriam irrecuperáveis, mereciam ser olvidadas; outro, o de que perante os insistentes ensinamentos críticos quanto às grandes diferenças entre comportamentos estáticos e dinâmicos, e as enormes vantagens práticas das PCDs, o que era essencial e prioritário era estabelecer o elo $PCD \approx PCE$.

Frizamos que a minimamente aceitável aplicabilidade do procedimento supra requer que se ensaiem com diferentes L já dentro da gama máxima de negas típicas de praça, por exemplo $1 < n < 20\text{cm}$, para que não misturemos condições de penetrabilidade (em que maiores deformações adulteram a semelhança estática \approx dinâmica, $PCD \approx PCE$) e as de nega. Assim em geral a variação de L será pequena, aumentando as dispersões estatísticas.

Conforme adiante explicaremos, o que mais falta, para aliviar as tendências de executar estacarias mais conservativas e caras do que necessário, seria o elo F.D. \rightarrow PCD, tanto mais que o elo $PCD \rightarrow PCE$ deixa de lado, por enquanto, as estacas de grande diâmetro.

Frizamos que acatamos aqui sem qualquer discussão, quer de procedimentos quer de interpretação, as CARGAS NOMINAIS DE RUPTURA das PCDs conforme determinadas por PDA-CASE-CAPWAP. Vários assuntos merecem apreciação crítica, inclusive diferenciadamente de caso a caso: porém, não

cabe aqui desviar do propósito básico, já demasiado amplo e complexo.

2.4. Prova de adequação da estacaria perante Códigos e Normas, via Provas de Carga Estáticas, PCEs.

Dependendo da avaliação subjetiva da importância da estacaria e/ou de seus problemas, em alguma fase da obra executam-se umas poucas (1 a 3 ?) Provas de Carga Estáticas, PCEs; na maioria dos casos são orientadas no sentido apenas de **DEMONSTRAR TEREM SIDO ATENDIDOS OS REQUISITOS DA NORMA**. [N.B. Reconheça-se que muitas são as obras em que nem se realiza qualquer PCE, independentemente da recomendação da Norma]. Assim sendo, não havendo qualquer incentivo para realmente se ensaiar in totum, levando a carga até a ruptura efetiva, na maior porcentagem dos dados disponíveis só se conclue que a Q_{rupt} será maior do que a atingida no limite da prova (cargueira ou tirantes dimensionados para economia, posto que o projeto da estacaria não seria beneficiado por valores maiores de prova). Via de regra as estacas escolhidas para a realização das PCEs tendem a ser, as que tiverem dado os índices menos favoráveis de nega/repique (entre as estacas da obra parcial executada): e, também, devido a problemas logísticos, são raros os casos em que as PCEs correspondam a PCDs anteriores (ademais da possível diferença pelo tempo de cicatrização).

Em resumo, as PCDs e PCEs não são amostras progressivamente menores do mesmo universo estatístico; os valores das PCEs (independente das interpretações das curvas carga-recalque) soem a ser **LIMITES INFERIORES DO UNIVERSO, E VALORES QUE NAS ESTACAS TÍPICAS TENDERÃO A SER MAIORES DO QUE OS OBTIDOS NA RESPECTIVA PCE**.

2.5. Prova final da adequação da estacaria cravada perante o comportamento da superestrutura.

Lamentavelmente reconheçamos que em quase todas as fundações dos edifícios, residenciais ou comerciais, a estacaria procura atender a requisitos formais que a engenharia da construção civil estrutural pouco se dignou considerar como mercedores de monitoramentos causa-efeito, cargas, recalques, Δ (cargas), Δ (recalques diferenciais), danos. Casos de tanques etc têm cargas definidas, e essencialmente nenhuma tendência a incrementos de cargas. Os edifícios altos, com painéis de alvenaria encunhada, tem cargas nominais (falta medição nas bases dos pilares) e redistribuições por rigidês (após gerados os recalques diferenciais) também ainda desconhecidas. [N.B. Espanta a falta de curiosidade e empenho observacional, frente a um parque de prédios como o de Santos, tão análogos e tão “ricos” em recalques e danos]. As Normas e Códigos se abstêm de abordagens inquiridoras no assunto.

A experiência popular mostra, que são poucos os casos de prédios sobre estacarias pré-moldadas cravadas com comportamentos indesejáveis, de fissuras e trincas nos acabamentos e (eventualmente) nas estruturas. Tal indicação tem que ser apreciada sob uma sequência de considerações: a) estas estacarias tendentes a serem muito conservativas; b) estacas geralmente dando recalques insignificantes até as cargas de trabalho, e acelerações dos gradientes de recalques/cargas na fase pré-ruptura; c) fissuras de acabamentos só geráveis após o acabamento executado, e portanto essencialmente por recalques retardados e/ou pelos incrementos das cargas vivas; d) insinuação de condições de início de plastificação (pré-ruptura) enfatizando a preocupação por Q_{rupt} ; e) as dificuldades de execução de eventual reforço, se necessário, para estacarias cravadas e edifício pronto, ocupado.

Na “prova dos nove” da obra finalizada a contento se reconhece nosso viés automático de só considerá-la funcionando bem, frequentemente melhor do que necessário. Não se diga que edifícios com recalques, digamos, de 4 cm funcionariam desfavoravelmente, em comparação com os que recalquem apenas 1cm: não sabemos. Sabemos, sim, que desprezamos a contrapartida: do prazer de uma empreitada de cravação fechada a contento quanto a logísticas e preços, sem os ônus de exigências desmesuradas. Alguém, a Sociedade, paga os preços dos exageros injustificáveis. Adiante veremos que a tendência de ônus está sendo a do aumento do número de quebras de estacas na cravação.

3. DOIS CASOS RAZOAVELMENTE DOCUMENTADOS PRESENTEMENTE ANALISADOS.

A Fig. 1 apresenta dois casos de estacarias pré-moldadas de concreto cravadas, que por distintas razões tiveram acompanhamentos mais meticolosos do que corrente. O caso A atendia a requisitos do Código de Fundações, tendo as peculiaridades geotécnicas de: a) uma cravação com pré-furo, essencialmente sem atrito lateral, b) com resistência de ponta obrigada a se garantir em horizonte denso de saprolitos granito-gnaissicos conhecidos por grandes dispersões de resistências SPT, c) estacas de pequena carga com cravação limitada por riscos de quebra. O Caso B tratava de um projeto inovador para edifício exigente, empregando ESTACAS REDUTORAS DA CARGA NA FASE FINAL EFETIVA DE CARGA-RECALQUE, em situação de: a) estratos sedimentares tidos como homogêneos perante a prática, b) interesse na homogeneização dos mini-comportamentos posteriores carga-recalque, c) estacas relativamente robustas, trabalho cumulativo atrito-ponta.

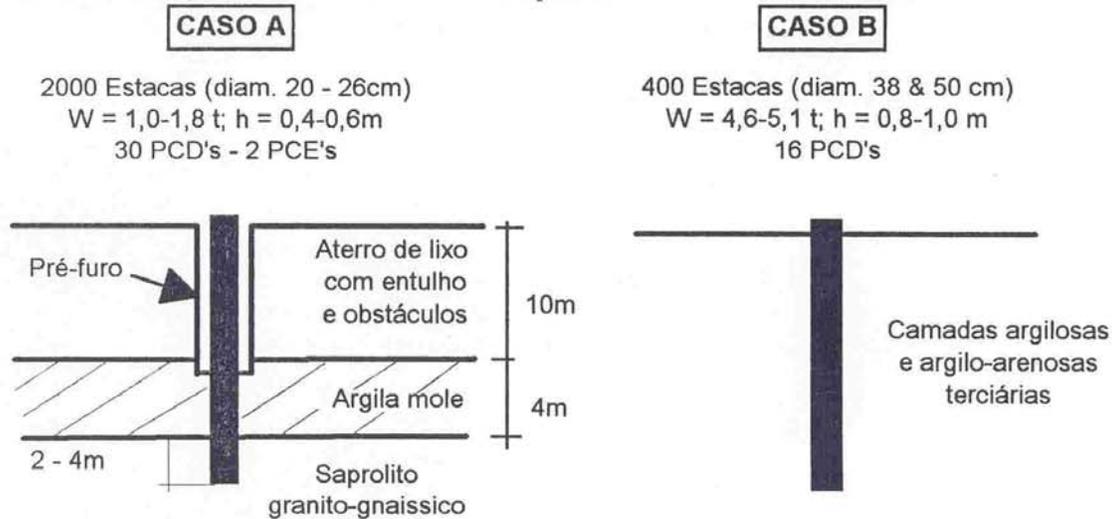


Fig. 1 - Os dois casos utilizados para discussão, esquemático.

As especificações técnicas das cravações indicavam as costumeiras negas n (e, muito menos frequentes, repiques, r) sem maiores referências a Energias E , fórmulas dinâmicas F.D., etc. Os dois casos contaram com bom número de PCDs que foram reduzidos a condições razoavelmente análogas para agrupamento em universos estatísticos idealizadamente uniformes.

3.1. Tentativas de regressões simples de parâmetro único.

Na Fig. 2 reproduzimos as singelas tentativas de regressões simples de parâmetro único, únicas que até o presente adentraram (timidamente) na geotecnia. Dispensa-se comentar os coeficientes de correlação R^2 tão baixos, excluindo qualquer hipótese de trabalhos embasados em CORRELAÇÕES: as estacarias estão sendo cravadas para ATENDER SOBEJAMENTE A RECEITAS, prevendo índices, e cargas correspondentes, nitidamente maiores do que os mínimos almejados (limitados apenas por riscos de que-

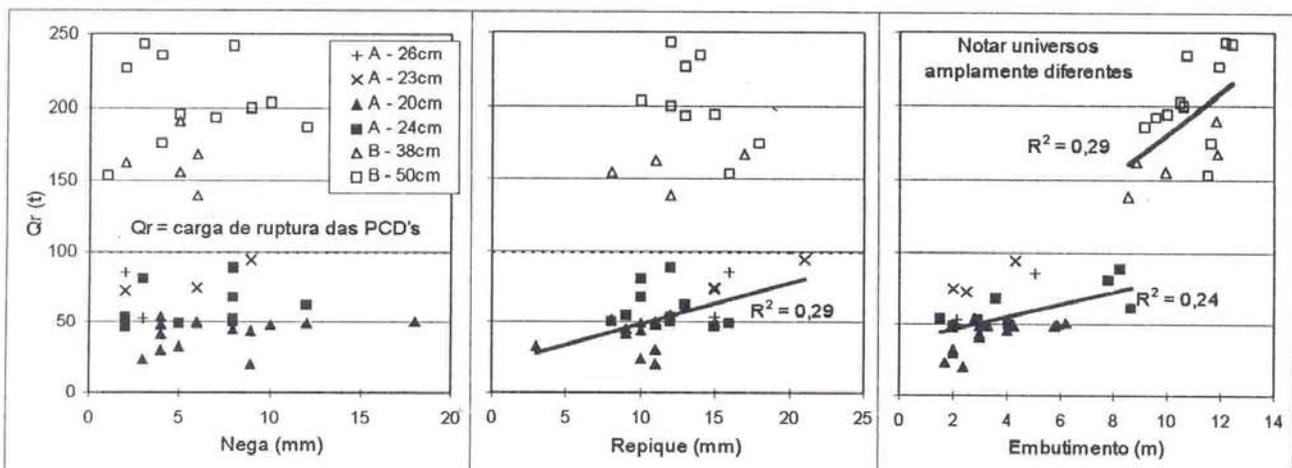


Fig. 2 - Regressões de parâmetro único analisadas

bras). [N.B. Parecem inexistir tentativas de estimar os índices de cravação associáveis aos riscos de quebra, fator relevante para a otimização econômica das obras]. Assustam porém as dispersões: pelo lado do critério de rejeição, de requisitos mínimos, elas se “normalizadas” (Gaussiana) indicariam insignificante fração de ocorrências extremas fora do limite.

Para trabalhar com o máximo de dados uniformizados a despeito das (pequenas) diferenciações de estacas empregadas, transformamos as Q_{rupt} nominais das PCDs em tensões no concreto (seção global nominal) isto é, a tensão (aplicada à cabeça) que presumidamente levaria a deformações solo-estaca tidas como correspondentes às de ruptura (Fig. 3). Marcamos nas mesmas Curvas de Frequência (admitidas normalizadas Gaussianas) as posições das tensões admitidas (por catálogo) nas respectivas estacas-estrutura, e as posições comparativas das frequências de menos do que 10% e 5%, respectivamente.

Assustará concluir que em até aproximadamente 10% dos casos, nas cargas usuais de trabalho empregadas com estas estacas e cravações, estas estacarias teriam um Coeficiente de Garantia* $CG \leq 1$, isto é as estacas entrariam em alguma plastificação solo-estaca, correspondente a maior ritmo recalque/carga.

O que cabe frizar é que os dados resultaram relativamente consistentes com os propósitos que orientaram as cravações. A cravação do caso A procurou ser o mais exigente possível, para atendimento a Código, e forneceu indicações relativas aos limites de cravação, pelas quebras que ocorreram (Fig. 3). Enquanto isto a cravação do caso B procurou atender a eventual compatibilização de comportamentos $\Delta carga/\Delta recalque$, enrijecendo-as no final de carregamentos e acabamentos.

Sobressai de tais análises preliminares que existem racionalidades na experiência de cravação; falta é admiti-lo abertamente, e submeter o assunto, devéras complexo, a regressões estatísticas.

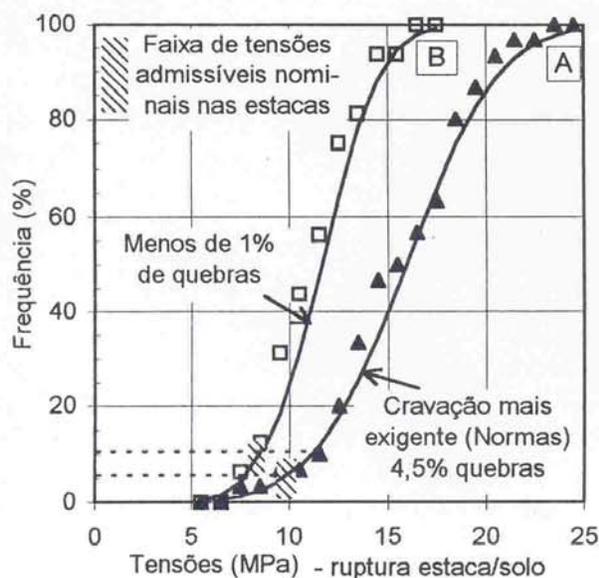


Fig. 3 - Curvas de frequência de “tensões de ruptura” na seção cheia das estacas.

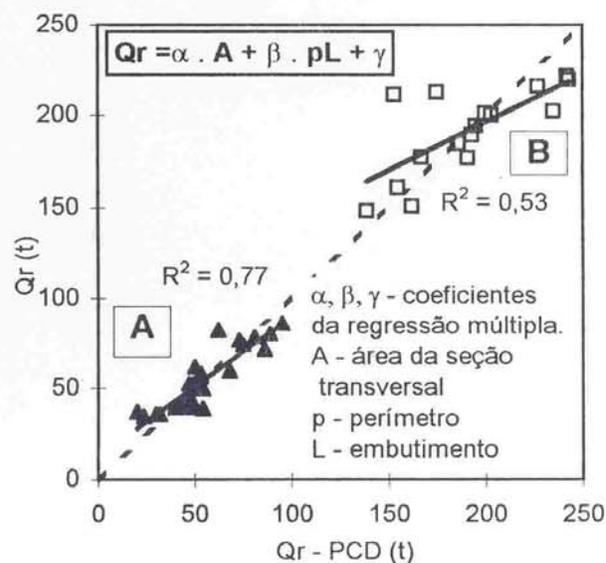


Fig. 4 - Exemplo do benefício resultante de uma regressão múltipla simplificada.

3.2. Tentativas de regressões múltiplas das cravações.

Sem qualquer presunção a mais do que parcos conhecimentos de generalistas no assunto de apoio e

* Deixamos de repetir as reiteradas publicações (de Mello, 1981) relativas ao franco benefício do Coeficiente de Garantia em comparação com o Coeficiente de Segurança tradicional.

controle provido por estatística, cumpre-nos consignar o espanto sobre: a) a raridade de qualquer REGRESSÃO MÚLTIPLA na geotecnia; b) a quase inexistência da investigação e divulgação de FAIXAS DE CONFIANÇA em torno de regressões, mesmo as simples; c) o atraso de décadas comparado com, por exemplo, o campo da SAÚDE; d) concentrado dispêndio em aprimoramentos pseudo-científicos de poucos casos de peso, ao invés de na grande integral de milhões de casos correntes.

Para uma primeira regressão múltipla dentro da linha lógica, empregamos os parâmetros principais associados à fórmula estática: geometrias de atrito e de ponta junto com o EMBUTIMENTO L.

A Fig. 4 mostra os resultados, perceptivelmente favoráveis. Parece justificar-se, inclusive, o corolário de que as REGRESSÕES resultaram piores para o Caso B, das estacas mais robustas orientadas um tanto mais singularmente. Em síntese, como as PCDs fazem parte do ciclo completo decisório enunciado em 2.1 a 2.5, parece-nos como encorajador e promissor empregar regressões múltiplas racionais.

3.3. Persistiriam tendências racionais e racionalizáveis, com os índices rudimentares ?

Pesquisamos a seguir a possível racionalidade dos índices rudimentares de Nega e Repique. Aceitando a progressão (inexorável) das resistências com o embutimento (Fig. 2c), ocorreu, no caso A, durante a logística devéras premente da cravação da estacaria, ter que recorrer a pesquisar e adotar um ÍNDICE RUDIMENTAR RACIONAL referente ao efeito incremental almejado. Propôs-se realizar medidas parciais de negas e repiques sob sucessivos aumentos de cravação/penetração (embutimento). Recorreu-se a 18 estacas com cravações propositadamente interrompidas conseguindo grupos de 2 a 5 pontos por estaca. Embora as negas e os repiques eram reconhecidos como observados em condições inusitadas, de valores relativos a penetrabilidades boas e não de (n,r) típicos, empregaram-se seus valores idealizada e simplificadamente dentro do conceito da integração (área) dos efeitos. Resultaram os gráficos das Figs. 5a) (nega) e b) (repique), bastante eloquentes em confirmar a racionalidade do conceito e dos índices, mesmo rudimentares. Para confirmação adicional plotamos na Fig. 5c os gráficos dos mesmos dois índices contra as cargas de ruptura das PCDs (de outros casos em que chegou a realizar-se a PCD). Vê-se que se chega a estabelecer regressões merecedoras de interesse, e, IMPORTANTE, que resultam bem diferentes as duas estacas tidas como muito semelhantes. [N.B. Haverá formas variadas de procurar aprimorar o procedimento adotado para as áreas de contribuição dos índices de nega ou repique e/ou outros promissores: dispensamos adentrar no assunto porque indicarão tendências análogas, analogamente racionalizáveis].

Cabe enfatizar que se sentiu a grande valia que teria a possível execução de umas 2 - 3 PCDs sobre a mesma estaca (e algumas adicionais do universo) durante rápidas interrupções da cravação/penetração, registrando-se os (L, n, r) correpondentes. Infelizmente o ritmo premente da obra não o permitiu. É sem duvida uma forte recomendação para caso(s) futuro(s).

Em conclusão só nos cabe: 1) advogar a intensificação de buscas e ajustes de regressões múltiplas, inclusive associadas às F.Ds, para a cravação da estacaria; 2) admoestar contra exageradas buscas por sofisticções, determinismos, análises numéricas mais refinadas etc de casos singulares, em comparação com a fertilidade do melhor entendimento da significância de parâmetros-índice em função de regressões racionalizáveis extraídas de, e aplicadas a, milhares de casos.

3.4. Regressões simplificadas aplicadas às FD's mais correntes, com seus vários parâmetros.

Aceitando a tese da prioridade por regressões múltiplas, passamos a expor realidades até frustrantes, talvez tenham sido responsáveis pela predominante impressão da insatisfação quanto às F.Ds.: (abstendo-nos de reiterar as exaustivas críticas quanto às teorias de impacto, trabalho, impulso, etc das quais derivam):

- (1) as regressões mais favoráveis variam de caso a caso;
- (2) a procura pelas regressões melhores não flue por caminho simples e sistemático;

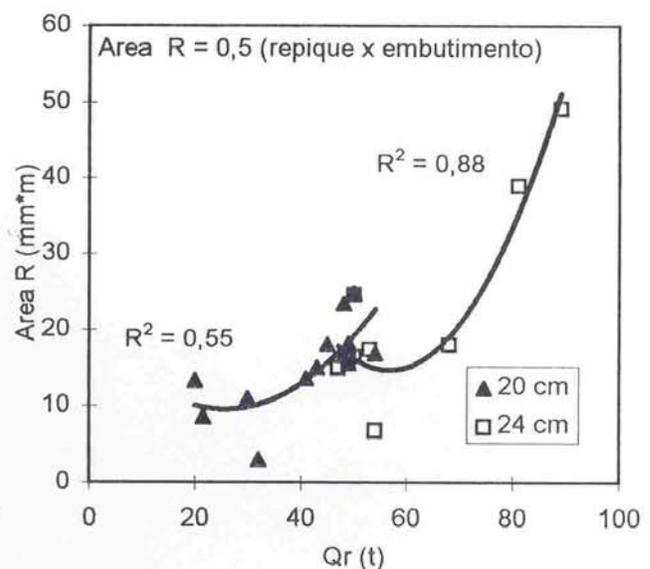
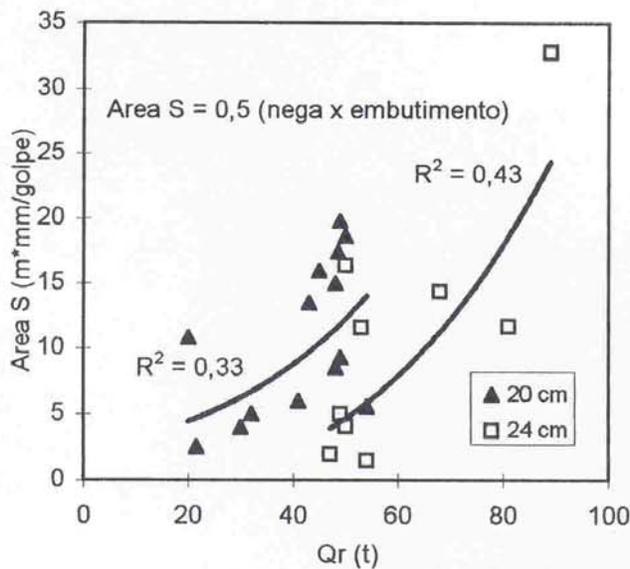
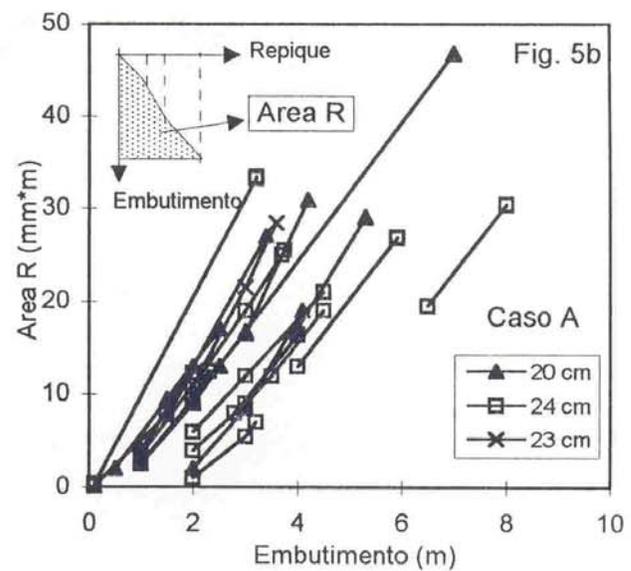
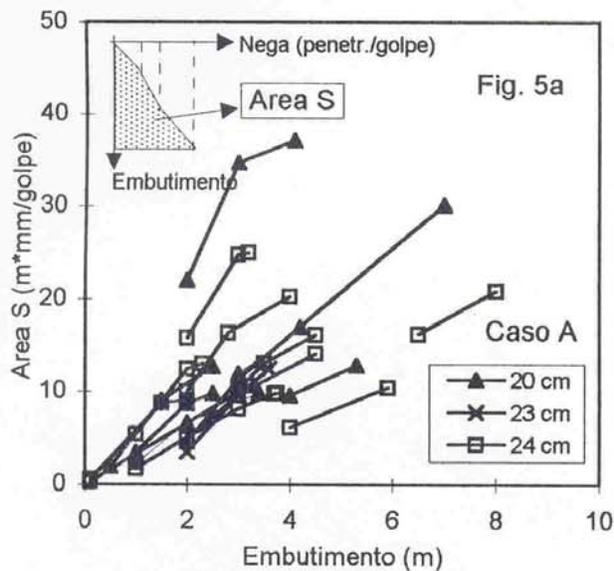


Fig. 5c) Demonstração de regressões aceitáveis para Q_r obtidas de PCD's, empregando: nega e repique.

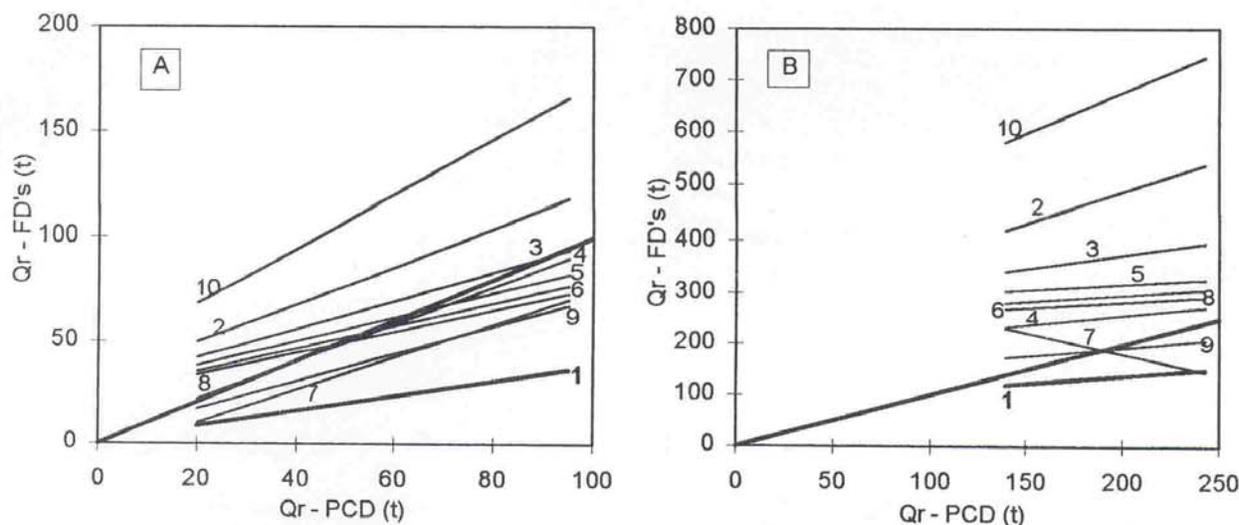
Fig. 5 - Busca de parâmetro racional para orientar embutimentos via de índices grosseiros (nega, etc.).

(3) por enquanto falta muita complementação de buscas pelo apoio da estatística (um pouco aprimorada) a favor de um melhor entendimento dos Índices Significativos da cravação de estacarias; etc.

Temos a convicção de que uma vez que se documentem as Executoras com programas computacionais de fácil aplicação na obra para as regressões, e a sequência lógica 2.1 a 2.5 for seguida, o volume de dados será tão grande e fértil, que todas estas estacarias se beneficiarão muito e rapidamente.

Além, das fontes básicas (Cummings, 1940; Chellis, 1951) não tem sido poucas as publicações (inclusive recentes) de colegas ilustres, relativas aos resultados das F.Ds. na prática. Frente a um assunto de veras complexo e errático pecaram via de regra pela atitude de análise relativamente esperançosa de soluções simples generalizáveis, com insuficientes dados, face à dispersão de caso a caso.

Começamos por aplicar regressões direto às mais correntes F.Ds.. Na Fig. 6 os resultados levam a algumas conclusões contundentes. (1) Todas as fórmulas se comportam bem melhor no Caso A, de estacas e cargas menores, do que no B, de estacas e cargas mais robustas. QUIÇÁ a crítica decorra do referencial das PCDs. (2) Os Coeficientes de Ajuste (englobando Coeficientes de Segurança CS) tem



Fórmulas Dinâmicas	Coeficiente		Fórmulas Dinâmicas	R ²	
	Caso A	Caso B		Caso A	Caso B
1 - Engineering News	0,47	0,28	6 - Hiley	0,27	0,02
2 - Weissbach	0,40	0,13	7 - Brix & Becker	0,16	0,02
3 - Stern (Universal)	0,32	0,05	8 - Taylor	0,27	0,02
4 - Wilcoxon	0,38	0,08	9 - Vulcan Iron	0,39	0,20
5 - Redtenbacher	0,26	0,01	10 - Rankine	0,40	0,13

Fig. 6 - Regressões simples aplicadas a Fórmulas Dinâmicas (FD's).

que ser muito diferenciados, de fórmula a fórmula (cuidado com generalizações dos Códigos). (3) Via de regra as posições relativas (e Coeficientes de Ajuste respectivos) das diferentes F.Ds. resultaram semelhantes nos dois casos. (4) A mais rudimentar das fórmulas, ENGINEERING NEWS, acabou dando (em A e B) os melhores R²*, inclusive com valores PREVISTOS UM POUCO PESSIMISTAS, para o lado seguro (atitude correta na engenharia). Tal como mencionado para o SPT (de Mello, 1971) é bastante frequente a melhor correlação entre parâmetros globais complexos (LUMPED PARAMETER) com muitos dados, desde que fisicamente análogos.

Continuando a analisar, a Fig. 7 apresenta duas pormenorizações relativas à FD Engineering News que deu as melhores aparências de correlação. Na Fig. 7a) colocaram-se diretamente as cargas de rupturas nominais, calculadas pela FD vs. "medidas" nas PCDs. Em comparação, na Fig. 7b) colocaram-se os valores relativos, as relações Q_{calc.}/Q_{med.}. Chocantemente invertem-se as conclusões: o Caso B das estacas robustas resulta com R² bem melhor, e com Coeficiente de Ajuste calculado/medido mais próximo do almejado 1,0. Liminarmente servem estas fortemente diferentes aparências para ressaltar que existem obstáculos a vencer não obstante a documentada esperança de sucesso progressivo. A maior erraticidade do CASO A pode estar associada às cravações relativamente esbeltas através de pré-furos. Permanece a impressão de que as PCDs dão Q_{rupt.} nominais mais baixas nas estacas de maiores diâmetros: se os pontos do CASO B da Fig. 7a) forem todos deslocados um tanto para a direita, melhoraria a semelhança dos dois Coeficientes de Ajuste calculado/medido.

3.5. Exemplo. Alerta liminar a respeitar, porém por vezes só revelado na tentativa.

Friza a estatística que os parâmetros devam ser variáveis independentes. Por outro lado, em conceituação abstrata tudo está inter-relacionado, nada é estritamente independente. Resulta assim que

* É importante ressaltar que para as decisões do engenheiro pouco adianta apenas a determinação dos R², havendo necessidade de calcular as FAIXAS DE CONFIANÇA em torno das médias. Não cabe neste trabalho adentrar em tais pormenores, bastando, para as presentes teses, empregar os R² como primeiros indicadores da EXISTÊNCIA OU NÃO DE ALGUMA CORRELAÇÃO, e, comparativamente, as presumíveis CORRELAÇÕES MAIS CONVINDATIVAS.

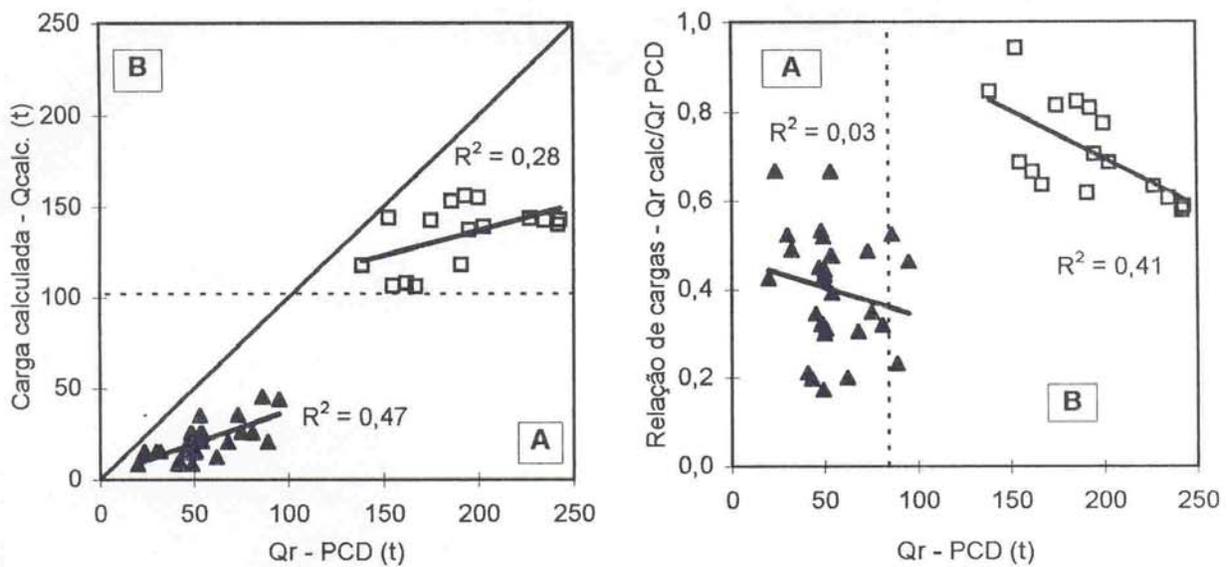


Fig. 7 - Duas formas de continuar tentando regressões, válidas ou não.

perante as complexidades das inter-relações o importante é a independência de parâmetros dominantes, e, por vezes isto só se revela após a obtenção da regressão, e a aplicação de raciocínio crítico.

A Fig. 8 ilustra o tipo de caso. A tentativa de correlação entre repique e embutimento se revela caótica, Fig. 8a. Porém empregando (Fig. 8b) o parâmetro (Area R) x (embutimento) da Fig. 5b resulta um bom $R^2 = 0,79$ na regressão contra embutimento. Ilusório, pois o embutimento, dominante, está colocado dos dois lados.

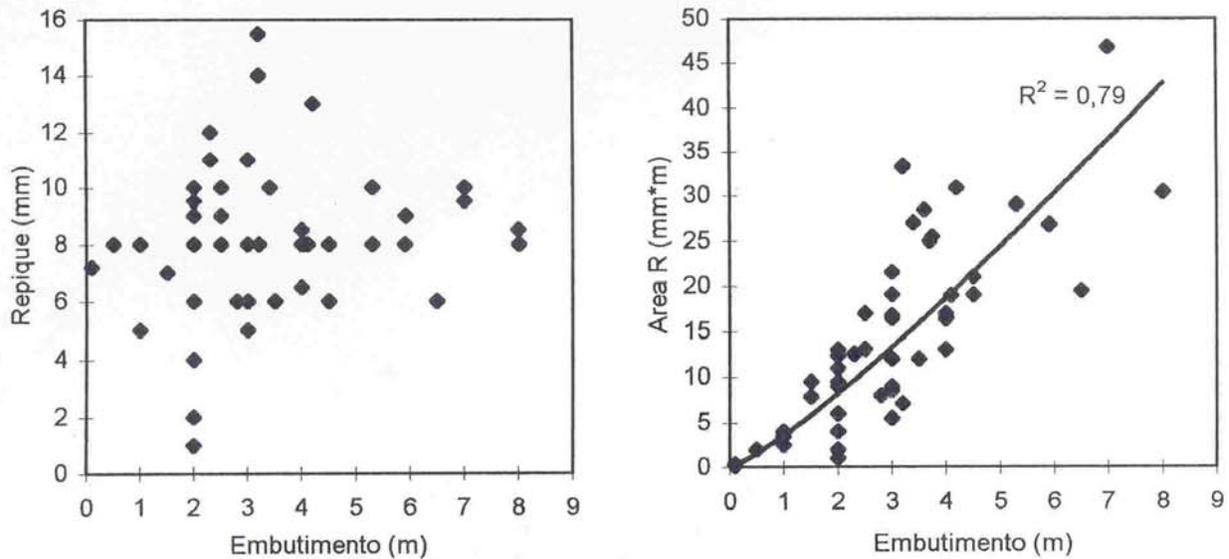
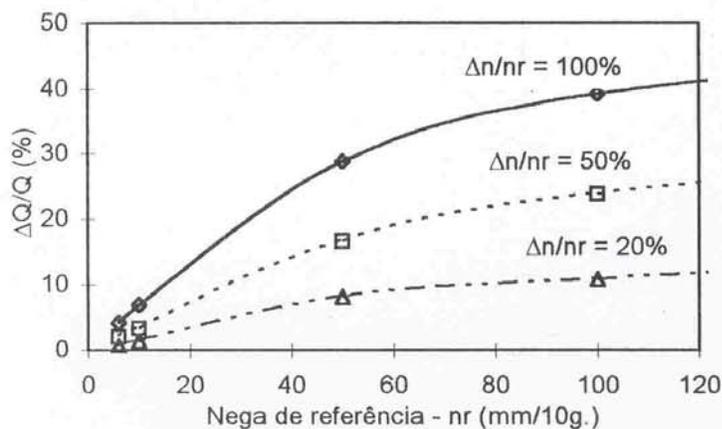
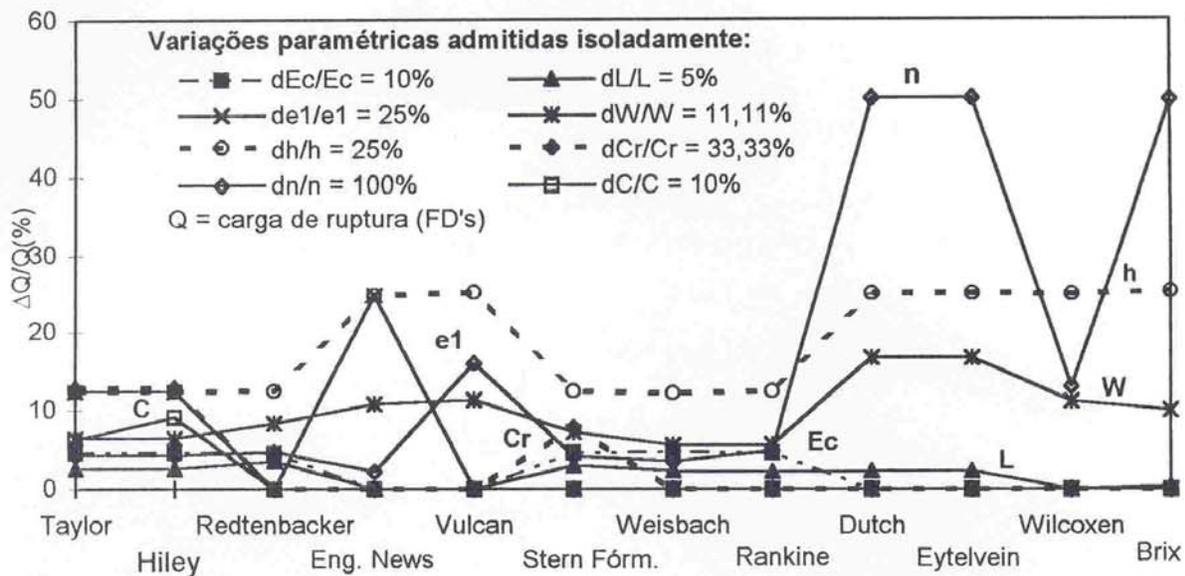


Fig. 8 - Exemplo de regressão estatística espúria.

3.6 Indicação simples da relevância dos parâmetros dentro das FDs e suas imprecisões observacionais.

Dentro de cada uma das F.Ds. procuramos estimar de acordo com a prática da obra (variável de obra a obra) com seus equipamentos, operários e instrumentos, qual a provável gama de variação observacional, e correspondente consequência sobre a PORCENTAGEM DE ERRO SOBRE A Q_{rupt} . ESTIMADA. Os resultados, diretamente apreciáveis, constam na Fig. 9a, indicando que medições merecem mais atenção em cada F.D.

Uma das metas muito procuradas para maior conforto é a de “apertar as negas”. Usando a “F.D.geral”



n = nega (mm/10 golpes)
 Ec = módulo de deformação do concreto
 L = embutimento
 e1 = eficiência do impacto (martelo)
 W = peso do martelo
 h = altura de queda do martelo
 Cr = coef. de restituição elástica
 C = relação entre o recalque real do topo da estaca e o recalque de uma estaca de ponta.

Fig. 9 - Importâncias relativas de parâmetros nas FD's.

(Taylor, 1948) confirmamos o conhecimento da prática: sob negas mais apertadas do que cerca de 20mm/10golpes, os resultados se confundem: isto sem ter em conta as perdas de vibrações da massa terrosa circundante (que aumenta desproporcionalmente com negas apertadas). Nestes limites se chega às condições de quebras.

3.7. Exercício de regressão múltipla misturando índice estranho, SPT.

Uma formulação muito mencionada, que resolvemos empregar como exemplo, é a de Uto, K. et al (1985) definindo a carga de ruptura pela equação

$$Q_r = A \cdot E_c \cdot K / (e_0 \cdot L) + N_m \cdot p \cdot L / e_f \quad (1)$$

onde: N_m = valor médio do SPT ao longo do fuste; $K = C_2 + C_3$ = repique elástico e $C_3 \cong n$ (nega); A , p = área e perímetro da estaca. Para estacas de concreto: $e_0 = 2W/W_p$ (W_p = peso da estaca); $e_f = 2,5$.

Com base na equação acima a regressão múltipla pesquisada seguiu o seguinte modelo:

$$Q_r = a \cdot A \cdot n + b \cdot A + c \cdot p \cdot L^2 \quad [tf;cm] \quad (2)$$

Os resultados indicaram os seguintes valores: $a = 0,0022 \pm 0,0165$; $b = 0,139 \pm 0,021$ e $c = 5,7 \times 10^{-7} \pm 1,4 \times 10^{-7}$ e com coeficiente de correlação $R^2 = 0,73$, bem favorável comparado com as melhores regressões analisadas.

Na Fig. 10a mostramos na forma de um gráfico de áreas as proporções que cada parcela da fórmula acima representa do valor total (Q_r). Fica evidente que a parcela $Q_1 = a \cdot A \cdot n$, pode ser considerada desprezível face às demais. Assim sendo repetindo a regressão múltipla a fórmula poderia ser escrita:

$$Q_r = (0,139 \pm 0,021) \cdot A + (5,7 \times 10^{-7} \pm 1,3 \times 10^{-7}) \cdot p \cdot L^2 \quad (3)$$

Na Fig. 10b, indicamos a comparação entre os valores medidos e aqueles calculados utilizando a correlação acima. Nota-se que a maior parte dos valores se situa na faixa de variação de $\pm 20\%$.

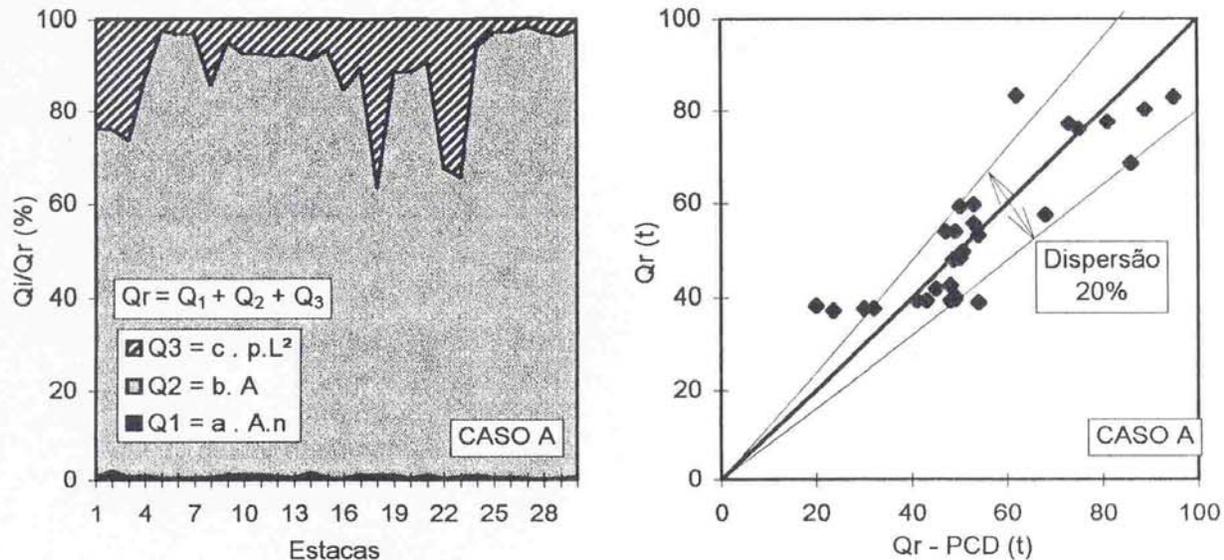


Fig. 10 - Regressão múltipla baseada na fórmula de Uto, 1985

3.8. Orientações básicas para as DECISÕES DE ENGENHARIA relativas à estacaria cravada.

Retornamos à menção anterior, em rodapé, quanto à frequente ilusão relativa à valia dos R^2 das regressões. Tem sua função rápida preliminar: mas os R^2 podem ser análogos com dispersões muito diferenciadas, desde que os dados dos dois lados da regressão se equilibrem quanto a momentos. O que importa é chegar a FAIXAS DE CONFIANÇA em torno da regressão: e isto inclusive diferenciando a faixa de confiança de MÉDIAS (possivelmente aplicável a grupos de muitas estacas) e a faixa de confiança de VALORES INDIVIDUAIS (a respeitar no caso de pilares apoiados sobre estacas unitárias).

Reconhece-se ser mais trabalhoso e singular, de caso a caso, o estabelecimento de tais faixas de confiança. Porém, será uma etapa final logicamente indispensável. Na Fig. 11a apresentamos as faixas de confiança correspondentes ao caso da Fig. 4 (Caso A).

Uma revelação curiosa da Fig. 11a merecerá apreciação específica ulterior pelo mero fato, em princípio inescapável, de que as melhores regressões não resultam(arão) paralelas à linha de equivalência calculado \approx observado. Significa que para a mesma estaca/estacaria/FD, o coeficiente CS a exigir (para cobrir a dispersão negativa) teria que variar ao longo da gama da carga de ruptura (segundo a supercavação). Neste caso duplica-se o exagero na imposição UNIFORME de um CS qualquer (ex. 1,8).

Finalmente cabe fechar frisando que a confirmação da consecução do produto almejado depende da “cobertura” do universo da estacaria por um número adequado de provas de carga, em primeira instância pelas PCDs. Na Fig. 11b está configurada uma análise dos resultados disponíveis do CASO A mostrando: (a) a definição progressivamente melhorada da “média” em função do número de PCDs, (b) a partir de que número de PCDs, seja conforme foram cronologicamente executadas, seja segundo cronologias randômicas Monte Carlo, passa a ser inconsequente a realização de PCDs adicionais. É baseado em tal de raciocínio, e documentação interpretada, que deveriam decorrer as exigências dos Códigos de Fundações quanto a números de provas de carga para as estacarias. No caso específico comprova-se que para pilares sobre grupos de estacas (validando estatisticamente o recurso a médias)

após a execução de 12 a 15 PCDs as demais PCDs representaram um desperdício.

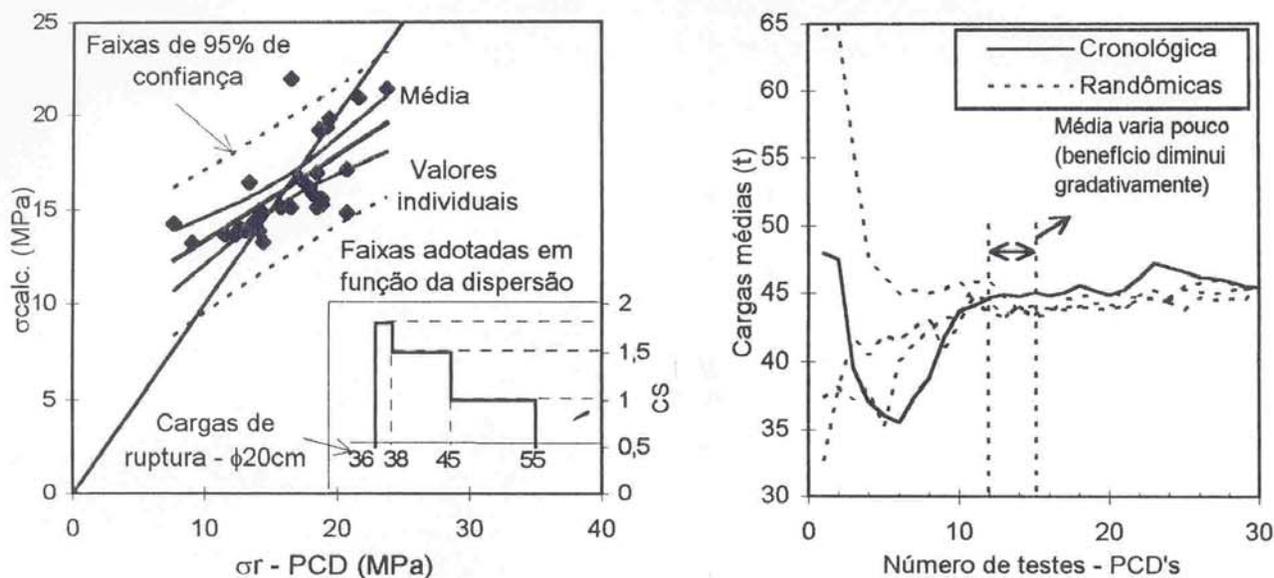


Fig. 11 - Estudos mais decisórios do Caso A perante Códigos.

4. PRÉ-ESTIMATIVAS DE L_{ok} ATRAVÉS DE PERFIS SPT, PARA ANTEPROJETO. (item 2.1).

Surgem aqui as maiores dispersões, conjugando as dos perfis SPT com as das cravações/penetrações EFETIVAS. As principais consequências práticas são: (1) perante antecipações de Projeto Básico, preparar-se para alguma margem de incerteza quanto ao TOTAL DA ESTACARIA (comparação na mediana, não próximo aos extremos); (2) perante a contratação da Executora, reconhecer ser indispensável pagar por metro cravado (e prover meios para minimizar cravações exageradas, que custarão mais, mesmo sem quebras); (3) perante todo o ciclo de decisões 2.1 a 2.5, a ênfase, repetida, do passo inescapável que tem que incluir algum tratamento estatístico bayesiano recorrendo a F.D. (ajustada, aprimorada) (itens 2.2 com 2.3).

Nos anos 1952-9 em São Paulo, estacas de concreto de 25 a 50 t e comprimentos da ordem de 8 - 15 m, em sedimentos terciários efetivamente contribuintes em condição bastante homogênea de atrito/ponta, o autor senior acompanhou com muito respeito (de surpresa curiosa) como o saudoso Prof. Odair Grillo “batia o olho” nos perfis SPT, quase um edifício por dia útil, e marcava a lápis a posição prevista para a penetração da estaca Lok. (C.S. 1,5). Procurando destilar tal experiência propôs (de Mello, 1977) umas “regrinhas preliminares de bolso” a serem submetidas a bombardeio crítico. Em princípio os Lok. dependeriam da somatória ΣSPT (de metro em metro), sendo Lok. equivalente a $\Sigma SPT \approx \sigma_c$ (tensão nominal de trabalho, de compressão na seção de concreto).

Na Fig.12 estão apresentados um bom número de dados (providos por duas Empresas amigas com muitos trabalhos, uma Projetista/Consultora, Godoy e Maia, e outra Executora, BENATON) que foram analisados com relação a estacas: (1) dentro de um raio de 5m das sondagens, (2) dentro de um raio de 10m. Para cada perfil de sondagem, com seu perfilamento de ΣSPT aumentando com a profundidade, estão marcadas as somatórias ΣSPT para os L cravados, mínimo e máximo.

Nenhum dos pilares/edifícios registrou qualquer problema. Portanto, só nos interessariam os L_{min} . Já vimos que cravar a mais do que o mínimo efetivamente necessário não é difícil, e tende a ser uma prática compreensivelmente procurada. Nestes conjuntos de dados ocorreram pouquíssimos casos em que a “regrinha de bolso” resultou absurda. Preocupados em respeitar a prioridade por teorizações, e conscientes do nível grosseiro de tais regrinhas INEXORÁVEIS NA INTENSIDADE DA PRÁTICA PROFISSIONAL, repete-se o que foi enfatizado no Congresso Internacional (de Mello, 1977) que a regrinha só foi (e agora é) oferecida à imolação de sacrifício, para concitar as Empresas Executoras,

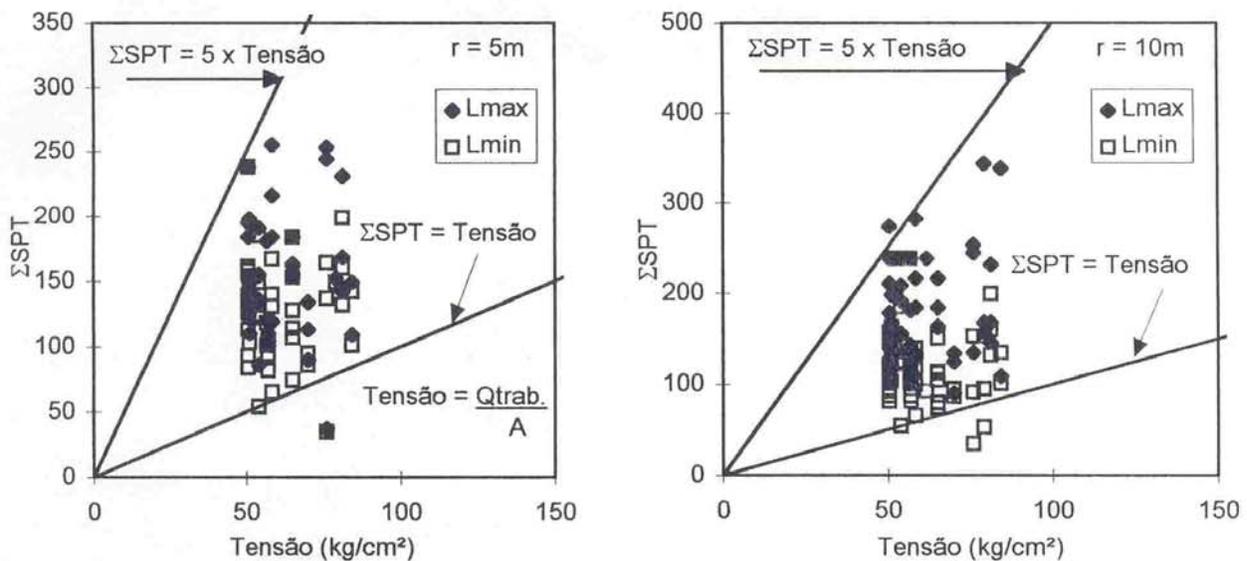


Fig. 12 -Testando uma regrinha de bolso oferecida à imolação (1977).

milionariamente documentadas, a que não deixem de expôr suas práticas da intimidade.

Finalizando a presente exposição reportamos à Fig. 13 em que retornamos aos Casos A e B. Na Fig. 13a indicamos as dispersões inerentes às sondagens: apesar de que as somatórias atenuem dispersões pontuais (SPTs erráticos), percebe-se que no uso final, DECISÓRIO, as dispersões dos Σ SPT ainda são brutais. Porém, raciocínios não são derrubados, e sim confirmados: nos sedimentos, B, a dispersão é bem menor do que nos saprolitos densos granito-gnáissicos, A. Haveria condição de reduzir erraticidades de SPT, densificar mais as sondagens, etc para diminuir erraticidades de consequências? Em parte, sim: porém, nunca a ponto de dispensar o controle de estaca para estaca, cada estaca definindo pela própria cravação o seu perfilamento efetivo, e isto mormente em casos tipo A.

Nas Figs. 13b,c oferecemos uma análises colaterais de interesse. A Fig. 13c dá as curvas de frequência acumulada de dispersões (%) de L, associadas a cada sondagem, usando todos os L de estacas dentro de raios de 5, 10 e 15m. Confirmam-se as distribuições muito mais abertas no saprolito (Caso A) do que nos sedimentos (Caso B), com suas respectivas distribuições de SPT condizentes com as erraticidades dos subsolos. Confirmam-se também as medianas mais e mais distantes (do ideal de 0%) de dispersão com o aumento do raio. Para evitar o viés interpretativo associado ao benefício de um maior número de dados (estacas) aprofundamos a análise interpretativa recorrendo ao Caso B para comparar na Fig. 13b dispersões médias percentuais, sempre usando o mesmo número de estacas que estavam disponíveis para o limite de 5m de raio. É interessante concluir (a favor de orçamentos de concorrências) que dispersões médias situaram-se entre 5 e 17%. Também que a cravação efetiva das estacas amplia a dispersão: os limites máximo e mínimo de grupos randômicos (Monte Carlo) do menor número de estacas deram dispersões menores do que com o total realmente cravado.

5. CONCLUSÃO.

Submetemos terem sido adequadamente demonstradas as participações sucessivas de todos os passos da lógica de projeto/execução de estacarias cravadas. Em trabalho separado será apresentada uma formulação mais racional para o elo da F.D. atualmente o mais criticado e acanhado por razões indiscutivelmente contundentes. Prevalece porém em nível prático bem realístico o procedimento da validação estatística por regressão simples e/ou múltipla, reconhecida como variável de caso a caso, a ser ajustada em cada canteiro desde o início. O importante é que as Executoras se documentem, e documentem a profissão, com sua inestimavelmente valiosa prática profissional, sem se acanharem quanto ao usp, sempre presente, de COEFICIENTES DE AJUSTE.

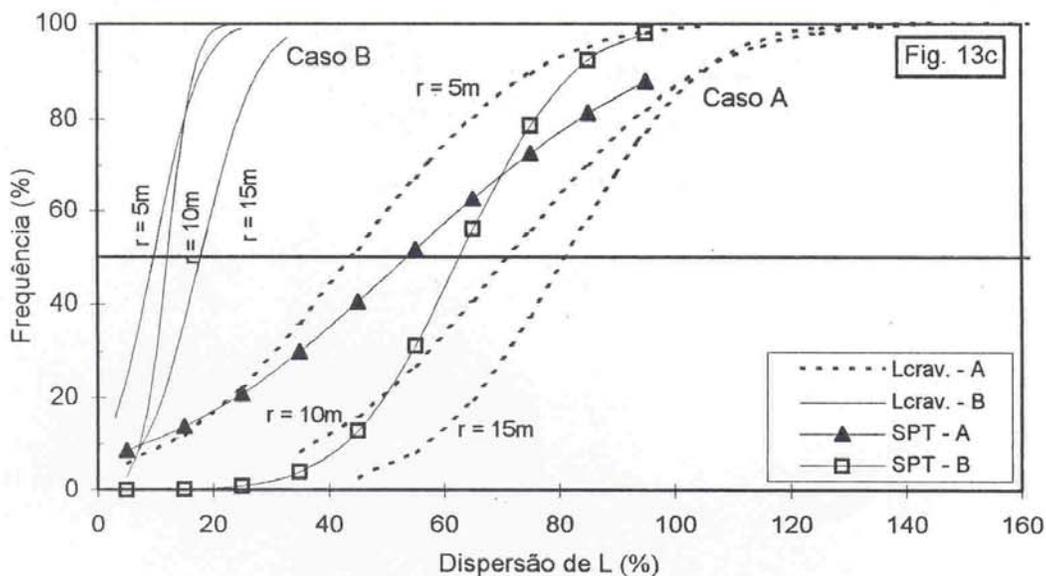
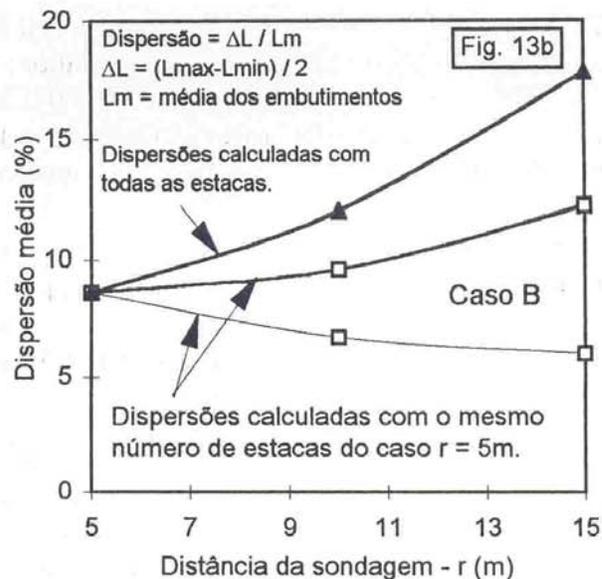
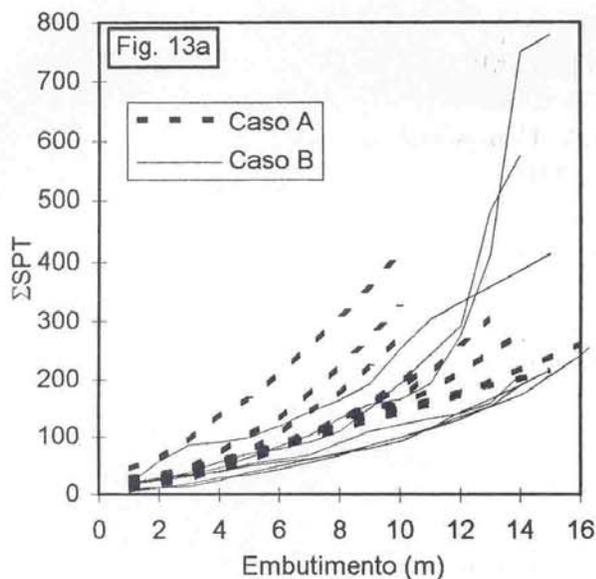


Fig. 13 - Análises de dispersões de sondagens e de comprimentos L.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Aoki, N.; de Mello, V.F.B. (1991). Dynamic loading curves. IV International Conference Stress-Wave theory to piles. The Hague. Balkema. pp. 525-530.

Burland, J.B. et al. (1977). Behaviour of Foundations and Structures. Proc. of the IX ICSMFE, Tokyo, vol. 2, pp. 495-546.

Chellis, R.D. (1951). Pile Foundations. New York: McGraw-Hill.

Cummings, A.E. (1940). Dynamic Pile Driving Formulas. Journal of the Boston Society of Civil Engineering, January, pp. 392-413.

de Mello, V.F.B. (1971). The Standard Penetration Test. IX PCSMFE, Puerto Rico, vol. 1, pp.1-86.

de Mello, V.F.B. (1977). Behaviour of Foundations and Structures. Proc. of the IX ICSMFE, Tokyo, vol. 3, pp.364-367.

- de Mello, V.F.B. (1981). Proposed Bases for collating Experiences for Urban Tunnelling Design. Symposium on Tunnelling and Deep Excavations in Soils. ABMS, São Paulo, pp. 197-219.
- de Mello, V.F.B. (1987). Risk in Geotechnical Works: Conceptual and Practical Sugestions. VIII PCSMFE, Cartagena, vol. 4, pp. 319-347.
- de Mello, V.F.B.; Aoki, N. (1993). Updating realism on large-diameter bored piles. Deep Foundations on Bored and Auger piles. Ghent. Balkema, pp. 35-42.
- Flaate, K. (1964). An investigation of the Validity of three Pile-driving Fomulae en Cohesionless Material. NGI, Public.56, pp. 11-22.
- Goble, G. G. et al (1980). The analysis of pile driving. A State-of-the-Art. International Seminar on Applicability of Stress-Wave on Piles. Stockholm, pp. 131-161.
- Heerema, E.P. (1981). Dynamic point resistance in sand and in clay for pile driveability analysis. Ground Engineering, September, vol. 4, n°6, pp. 30-37.
- Holloway, D.M. et al. (1975). The Mechanics of Pile-Soil Interactive in Cohesionless Soils. School of Engineering Duke University, Soil Mechanics Series, n°39, chapter II, pp. 7-49.
- Litkouhi, S.; Poskitt T.J. (1980). Damping constants for pile drivability calculations. Géotechnique, vol. 30, n°1, pp. 77-86.
- Liang, R.Y.; Zhou, J. (1997). Probability Method Applied to Dynamic Pile-driving Control. J. ASCE, vol. 123, n° 2, pp. 137-144.
- Olson, R.E.; Flaate, K.S. (1967). Pile-Driving Formulas for Friction Piles in Sand. Journal, ASCE, vol. 93, SM6, pp. 279-296.
- Poulos, H.G.; Davis, E.H. (1980). Pile Foundations Analysis and Design. John Wiley, New York.
- Rausche, F. et al.. (1972). Soil Resistance Predictions from Pile Dynamics. Journal ASCE, vol. 98, SM9, pp. 917-937.
- Smith, E.A.L. (1955). Impact and Longitudinal Wave Transmission. Transactions, ASME, August.
- Smith, E.A.L.(1960). Pile-Driving Analysis by the Wave Equation. Journal ASCE, v.86, SM4, 35-61.
- Sorensen, T.; Hansen B. (1957). Pile Driving Formulae - An Investigation based on Dimensional Considerations and a Statistical Analysis. Proc.of the IV ICSMFE, London, vol. 2, pp. 61-65.
- Taylor, D.W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics. New York: Wiley.
- Tien N.T. (1987). Dynamic and Static Behaviour of Driven Piles. SGI, Report n°33.
- Uto, K. et al. (1985). Dynamic Bearing Capacity Wave Theory, Pile Driving Control. Proc. on Penetrability and Drivability of Piles, San Francisco, vol. I, pp. 201-204.
- Wonnacott, T.H.; Wonnacott, R.J. (1980). Introdução à Estatística. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.