

2 Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre os principais aspectos referentes à aplicação da equação de onda em estacas cravadas e estacas “in loco” e, a utilização das fórmulas dinâmicas que usam a ‘nega’ e ‘repique’ baseadas na lei de choque de Newton. Estas aplicações serão usadas para o cálculo da resistência mobilizada da estaca.

2.1. Introdução

A monitoração durante cravação de uma estaca é uma ferramenta importante e usualmente empregada no controle e aferição de fundações em estacas cravadas. Então valendo-se dos elementos obtidos durante a cravação para a avaliação da resistência mobilizada das estacas, são utilizadas as chamadas fórmulas dinâmicas que partem da medição da “nega” que é a penetração que sofre a estaca ao receber um golpe do pilão ao final da cravação, observa-se que a nega é uma condição necessária para conhecer a resistência mobilizada de uma estaca.

A tentativa de determinação da resistência mobilizada das estacas utilizando-se as “fórmulas dinâmicas” de cravação, sempre envolveu uma serie de incertezas tanto em relação à validade das teorias empregadas no desenvolvimento das mesmas, quanto em relação á segurança dos resultados obtidos.

Essas incertezas normalmente implicavam na utilização de elevados coeficientes de segurança para cada formula, visando, principalmente, a garantia da capacidade de carga diante de diversas situações de cravação e, consequentemente deixando-se de lado os aspectos econômicos.

É nesse contexto que, nos anos 30 foi proposto um ensaio baseado na equação de onda. Este ensaio utiliza a onda gerada pela cravação para verificação do desempenho das estacas solicitadas axialmente, embora por questões de dificuldades no processamento e na interpretação dos dados, apenas nos anos 60 se tenha iniciado a sua aplicação.

Com o surgimento das provas de carga dinâmica o controle de estaqueamento de fundações desenvolveu-se significativamente nos últimos anos devido à facilidade na execução desses ensaios e seu relativo baixo custo. Este ensaio foi desenvolvido numa tentativa de aperfeiçoamento das fórmulas de dinâmicas, sendo Newton em 1931 o primeiro a referir que no processo de cravação se desenvolve um efeito ondulatório. Em 1938, Fox publicou o primeiro conjunto de equações para estimar a capacidade resistente das estacas a partir do ensaio de carga dinâmico, este ensaio consiste basicamente na aplicação de energias crescentes sobre o topo de uma estaca, seguido de registro dos sinais das ondas de tensão refletidas e, interpretação dos mesmos através de algum método de cálculo específico. No Brasil, há um predomínio praticamente absoluto dos métodos CASE e CAPWAP, os quais são regulamentados pela NBR 13208/2007 - “Ensaio de Carregamento Dinâmico” que trata da metodologia empregada para a realização deste ensaio.

No início da década de 60 um estudo bastante detalhado foi realizado pelo ‘Michigan State Highwa Department’. Nele ressalta-se que a abundância de informações concernentes às condições do solo e experiências em cravação de estacas forneceram uma oportunidade não usual para um estudo mais extensivo das fórmulas dinâmicas de cravação. Apesar disso, não se conseguiu chegar a uma conclusão final a respeito da aplicabilidade dessas fórmulas dinâmicas na previsão da resistência mobilizada das estacas.

O uso dessas fórmulas deve ser restrito ao controle da uniformidade do estaqueamento, sendo que o engenheiro deve escolher uma fórmula de acordo com a sua experiência e julgamento.

De fato, as fórmulas dinâmicas de cravação baseadas no repique elástico constituem ferramentas bastante eficazes no controle de capacidade de carga em estacas, segundo mostram diversos estudos sobre este assunto como: Uto et al. (1985), Aoki (1986), Souza Filho e Abreu (1990), Gomes e Lopez (1986), Danziger (1991), Aoki e Alonso (1993), etc.

2.2. Fundações profundas

2.2.1. Conceito de fundações profundas

A NBR 6122/96 define fundação profunda como “elemento de fundação que transmite a carga ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste), ou por uma combinação das duas, em que está assente em profundidade superior ao dobro de sua maior dimensão em planta, e no mínimo 3m, salvo justificativa. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas, os tubulões e os caixões”.

Conceitua-se também estaca como “elemento de fundação profunda executada inteiramente por equipamentos ou ferramentas, sem que, em qualquer fase de sua execução haja descida de operário. Os materiais empregados podem ser: madeira, aço, concreto pré-moldado, concreto moldado in-situ ou mistos”.

A NBR 6122/96 define a estaca cravada por percussão como “tipo de fundação profunda em que a própria estaca ou um molde é introduzido no terreno por golpes de martelo (por exemplo: de gravidade, de explosão, de vapor, de diesel, de ar comprimido, vibratório, Hidráulicos). Em certos casos, esta cravação pode ser precedida por escavação ou lançamento.

As estacas são elementos bem mais esbeltos que os tubulões, caracterizados pelo grande comprimento e pequena secção. São implantados no terreno por equipamentos situado à superfície. São em geral utilizados em grupos.

2.2.2. Classificação de estacas

As fundações por estacas podem ser classificadas de acordo como o material e o processo executivo. As estacas classificadas pelo tipo de material são construídas de madeira, concreto, aço ou mistas. Já pelo método ou processo de execução são classificadas em estacas de deslocamento e escavadas.

As estacas de deslocamento são aquelas introduzidas no terreno através de algum processo que não provoca a retirada do solo, sendo deste grupo às estacas pré-moldadas, metálicas, madeira, tipo Franki.

As estacas escavadas ou sem deslocamento, são aquelas executadas “in situ” através de perfuração do terreno por um processo qualquer, com remoção de material, com ou sem revestimento, com ou sem utilização de fluido estabilizante.

Dentro deste grupo temos: as estacas tipo Strauss, estaca trado rotativo, hélice contínuo, Raiz.

Tabela 2.1 - Classificação de fundações profundas (Ferreira, 1998).

Fundações Profundas	Tipo de Classificação	Terminologia		
Estaca	Quanto ao Material	Aço - Perfil metálicos e Trilhos		
		Concreto	Pré-Moldada	Concreto Armado Concreto Protendido
			Moldado no Local	C/ Revestimento Perdido C/ Revestimento Recuperado
		Madeira		
		Areia		
		Mista	Aço + Concreto Madeira + Concreto	
	Quanto à Execução	Cravadas	Injeção D'água Percussão Prensagem (Mega) Aparafusamento Vibração	
		Escavadas	Com ou Sem Lama Com ou Sem revestimento	
	Quanto à Finalidade	Estacas de Sustentação - Transmite a carga a camadas profundas e resistentes do solo		
		Estacas de Tração ou Horizontais - Resistem a carga de tração ou horizontais		
		Estacas de Compactação - Destinam-se a compactação de terrenos arenosos		
		Estacas de Reforço - Destinam-se a reforçar fundações já concluídas		
	Quanto ao Trabalho	Estacas Pranchas - Destinam-se a contenção lateral das terras		
Flutuantes ou de Atrito - Transmitem a carga ao terreno predominantemente por atrito lateral				
Quanto a inclinação	Ponta - Transmitem a carga ao terreno profundo pela ponta			
	Vertical Inclinada			
Tubulão	Quanto à Execução	A Céu Aberto	Com nível d'água rebaixado Sem rebaixamento do nível d'água	
		Sob Ar Comprimido		
Quanto ao Tipo de Escavação	Mecânica - Com revestimento de aço perdido ou não, e eventualmente amadurecimento longitudinal			
	Manual - Com ou sem revestimento de camisa de concreto			
Caixões				
Fundações Mistas		Terminologia		
Superficial + Profunda		Estaca ligada a estaca (Estaca T), Estaca abaixo de sapata (Estapata), Radier sobre estacas, Radier sobre tubulões		

Neste presente trabalho serão apresentados os tipos de estacas estudadas.

Estacas pré-moldadas de concreto

As estacas pré-moldadas de concreto são constituídas de peças prontas que podem ser concreto armado. A sua instalação no terreno pode ocorrer por cravação, prensagem ou vibração e não há remoção do solo na região onde é executada.

A energia empregada na cravação deve ser suficiente para que a estaca penetre no terreno sem que haja danos à sua constituição. Devido à vibração e ruídos que causam durante a instalação, sua instalação não é recomendada em áreas onde, na vizinhança, existam construções antigas (Gotlieb,2010).

Vantagens:

- Permita uma boa fiscalização durante a concretagem;
- Permite a moldagem de corpos de prova para verificação da resistência à compressão;
- Permite a moldagem das estacas no local da obra;
- Permita a emenda de uma peça na outra.

Desvantagens:

- Tem limitações de comprimento, sendo fabricadas em segmentos;
Requerem armaduras especiais para içamento e transporte.

Estacas metálicas

As estacas metálicas podem ser perfis laminados, perfis soldados, trilhos soldados, ou estacas tubulares. Podem ser cravadas em todo tipo de terrenos, possuem facilidade de corte e emenda, podem atingir grande capacidade de carga, trabalham bem à flexão; e, são utilizados em serviços provisórios, podem ser reaproveitadas varia vezes.

Seu emprego necessita cuidado sobre a corrosão do material metálico.

Vantagens:

- Atingem grandes profundidades;
- Podem atravessar camadas resistentes de solo;
- Pequena vibração durante a cravação;
- Não apresenta atrito negativo;

- Uma estaca pode ser feita com vários perfis soldados um ao outro;
- Emenda fácil de executar.

Desvantagens: Sua maior desvantagem é o custo maior em relação às estacas pré-moldadas de concreto, Strauss e Franki.

Estaca Hélice contínua

A estaca tipo hélice contínua é executada mediante a introdução no terreno de uma haste tubular dotada externamente de uma hélice contínua a qual é descida no terreno por aplicação de um torque. Durante a penetração e dependendo do diâmetro da haste, não ocorre a retirada do solo escavado, resultando uma estaca do tipo implantada sem deslocamentos do solo. Ainda, pode ocorrer além de uma certa profundidade, que o solo fique totalmente aderido às pás da hélice quando então, na continuação da penetração, a estaca passa a ser por deslocamento de solo. Na parte inferior da haste tubular existe um tampão, a ser perdido, que impede a penetração do solo no seu interior.

Alcançada a cota desejada inicia-se a concretagem por bombeamento de concreto pela haste tubular sob pressão constante de 1kg/cm², retirando-se a composição de perfuração sob velocidades constante. Durante a remoção da haste um limpador mecânico retira o solo que está aderente entre as pás da hélice contínua.

Imediatamente após o término da concretagem é inserido dentro do concreto, por gravidade ou com o auxílio de um vibrador, a armação.

Vantagens:

- Os equipamentos são dotados de instrumentos que monitoram continuamente toda a execução das estacas;
- Não há desconfinamento lateral do solo;
- Como o concreto é bombeado sob pressão ele preenche continuamente o volume escavado, fornecendo uma maior resistência por atrito lateral da estaca;
- Devido o monitoramento eletrônico é permitido um controle contínuo da qualidade de execução da estaca;

- Permite a execução de cerca de 200m a 300m de estaca por dia em condições normais de terreno.

Desvantagens:

- Custo relativamente elevado;
- Numero de equipamentos limitados no Brasil.

Estacas raiz

Segundo a NBR 6122, a estaca raiz caracteriza-se pela execução: por perfuração rotativa ou rotopercussiva e por uso de revestimento (conjunto de tubos metálicos recuperáveis) integral no trecho em solo, e que é completada por colocação de armação em todo comprimento e preenchimento com argamassa cimento-areia. A argamassa é adensada como o auxílio de pressão geral dada por ar comprimido.

Essas estacas têm a particularidade que permitem sua utilização em casos em que os demais tipo de estacas não podem ser empregadas.

Vantagens:

- Não produzem choques nem vibrações;
- Há ferramentas que permitem executá-las através de obstáculos tais como blocos de rocha ou peças de concreto;
- Os equipamentos são, em geral, de pequeno porte, o que possibilita o trabalho em ambientes restritos;
- Podem ser executadas na vertical ou em qualquer inclinação;
- Não provocam muitos ruídos e vibrações;
- Atingem grandes profundidades.

2.3. Fórmulas dinâmicas de cravação de estacas

2.3.1. Introdução

As fórmulas dinâmicas são os métodos mais antigos e mais usados frequentemente na estimação da resistência mobilizada das estacas cravadas. Todas essas fórmulas relacionam a resistência mobilizada última para uma “nega” (penetração permanente da estaca para cada golpe de martelo) e assume que a resistência à cravação é igual à capacidade de carga da estaca sob carregamento estático.

Há um grande número de fórmulas dinâmicas que estão disponíveis desde faz 160 anos para previsão da resistência mobilizada de estacas. Smith (1960) afirma que aos princípios dos anos 1960 os editores da revista Engineering News Record, tinham mais de 450 fórmulas dinâmicas para estacas.

Segundo Poulos e Davis (1980) o principal objetivo em usar as fórmulas dinâmicas de cravação são geralmente para estabelecer uma carga de trabalho confiável para uma estaca usando os registros da cravação da estaca, ou para determinar os requerimentos da cravação, requeridos para uma carga de trabalho.

A carga de trabalho é geralmente determinada pela aplicação de um apropriado fator de correção para o cálculo da resistência última, porém este fator de correção vai depender de várias considerações sobre a fórmula usada e o tipo de estaca que se esta cravando. Também porque as fórmulas dinâmicas não tomam em conta a natureza do solo, os fatores de segurança podem variar de um lugar a outro lugar.

As primeiras fórmulas publicadas datam de meados do século XIX e, em sua grande maioria, fundamenta-se na teoria de choque ou a lei de impacto e conservação dos princípios da energia de Isaac Newton e se modificam para ter em conta as perdas da energia durante o impacto e durante a propagação das ondas de tensão; a qual é indiscutivelmente inválida à cravação de estacas. Essas fórmulas foram utilizadas por muito tempo, porém, sempre sem um conhecimento adequado a respeito da confiabilidade dos resultados gerados. Somente nas últimas décadas realizaram-se estudos comparativos entre algumas fórmulas de cravação e os resultados de provas de carga estáticas, como por exemplo os de

Sorensee Hasen (1957), Agerschou (1962) e, Flaate (1964). De um modo geral a dispersão dos resultados estatísticos apresentados pelas correlações não eram satisfatórios, resultando no abandono de diversas destas fórmulas (De Rosa, 2000).

Uma grande melhora na estimação da resistência mobilizada da estaca, pelos métodos dinâmicos seria desde o uso da equação de onda para avaliar a propagação de uma onda de compressão descendente na estaca, cujo objetivo principal é para obter uma melhor relação entre a resistência mobilizada última da estaca e a penetração permanente da esta (nega) que pode ser obtida desde uma simples fórmula dinâmica.

Mais recentemente as fórmulas baseadas na medição do repique elástico tiveram substancial aumento de credibilidade, principalmente no Brasil, onde a equação proposta por Chellis (1961) vem sendo amplamente pesquisada e difundida, e no Japão, onde desenvolveram-se algumas fórmulas fundamentadas na equação da onda, como as proposta por Uto et al. (1985) e Matsuo et al. (1989), as quais também utilizam-se dos resultados da medição do repique elástico.

As fórmulas dinâmicas são utilizados como complementos aos controles de campo. Dificilmente em uma obra instrumenta-se todas as estacas e, por tanto, é necessário que de alguma forma se obtenha uma avaliação do estaqueamento na execução, e que seja possível estimar a capacidade da estaca antes do ensaio de cravação.

Estas fórmulas dinâmicas buscam justamente correlacionar a energia de queda do martelo com a resistência à cravação da estaca, através da nega. Estas fórmulas, basicamente enfocam a conservação de energia e, algumas de elas, incorporam as leis de choque de Newton. A maioria destas fórmulas foi deduzida com base na lei de Newton referente ao impacto entre dois corpos rígidos, e igualam a energia de queda do martelo com a nega multiplicada pela resistência dinâmica à cravação. Inicialmente estas fórmulas não levavam em consideração as perdas de energia durante o choque; posteriormente, estas perdas foram levadas em consideração e introduzidas nestas fórmulas. Há de ser notar que logo diante que tais perdas variam de acordo com o modelo proposto por cada autor (Velloso & Lopes 2002).

Segundo Manual ABEF (2002), estipula-se a nega e repique como parâmetros de controle que deverão ser obtidas para todas as estacas cravadas. O repique constitui a parcela elástica do deslocamento máximo da estaca e a nega vem a ser o deslocamento permanente da estaca (NBR -6122/1996)

Segundo a norma NBR 6122(2010) as fórmulas dinâmicas baseadas na nega ou repique elástico visam principalmente assegurar a homogeneidade das estacas cravadas e executadas in situ. Em determinados tipos de terreno deve ser levado em conta, na verificação da nega, sua diminuição (cicatrização) ou aumento (relaxação) ao longo do tempo.

2.3.2. Aplicabilidade e limitações das fórmulas dinâmicas

A grande maioria das fórmulas dinâmicas foram desenvolvidas na lei de Newton referente ao impacto e modificadas para levar em conta as perdas de energia. A rigor, a lei de Newton referente ao impacto não se aplica a corpos que sofrem deformações da ordem de grandeza das observadas no impacto do martelo com a estaca, e só é válida para dois corpos livres. Ora a estaca não pode ser considerada como sendo um corpo livre, em decorrência das forças de resistências ao longo de sua superfície lateral e da força resistente na sua ponta. Além disso, existem outros fatores influentes importantes que deveriam ser todos eles, relacionados nas fórmulas dinâmicas, (Nakao, 1981).

- (a) As forças de resistência do solo não são constantes durante o período de tempo em que a estaca penetra no terreno porque o solo, além de apresentar certas características elásticas, apresentam também características de viscosidade.
- (b) As compressões elásticas temporárias dos acessórios de cravação, da estaca e do solo absorvem quantidades de energia que não contribuem para a penetração.
- (c) Ocorrem perdas de energia no impacto, pois tanto o cepo como o coxim apresentam coeficientes de restituição menores que a unidade.
- (d) Sendo a estaca uma peça estrutural longa e esbelta, cada parte incremental dela, em qualquer instante da cravação, sofre um deslocamento diferente do das demais partes, pois a energia de cravação não se propaga

instantaneamente ao longo de todo seu comprimento. p.e. a fórmula de Hiley não leva em conta os fatores (a) e (d).

De um modo geral, toda fórmula dinâmica inclui um ou mais fatores que devem ser obtidas experimentalmente. Se a determinação desses fatores é baseada em condições muito especiais. Assim, a aplicação de uma fórmula dinâmica só deve ser feita levando-se em conta as variações nas condições locais e nos tipo de estacas e equipamentos de cravação.

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura referem-se à validade dos coeficientes envolvidos nas fórmulas dinâmicas analisadas e são baseadas em comparações com resultados de provas de carga estática em diversos locais. Em geral, esses estudos mostram a evidencia de uma grande dispersão nos resultados obtidos por uma fórmula determinada e, eventualmente, tentam reduzir essas dispersões por meio de ajustamento estatístico dos coeficientes ou pela introdução de novos parâmetros empíricos.

2.3.3. Tipos e principais fórmulas dinâmicas

Analiticamente, as fórmulas derivadas da lei de impacto podem ser expressas pela equação abaixo, que compara a energia aplicada pelo martelo com o trabalho realizado para romper o solo, acrescido das perdas de energias ocorridas:

$$e_f . W . H = R . S + Q \quad (2.3.1)$$

Sendo:

e_f : Eficiência do martelo

W: Peso do martelo

H : Altura de queda do martelo

R : Resistência oposta pelo solo à penetração, admitida igual à resistência mobilizada última.

S: Penetração permanente da estaca para cada golpe (nega)

Q : Perdas de energia.

Esta expressão governou o principio utilizando na dedução de inúmeras fórmulas propostas, fundamentadas nas leis anteriormente citadas. Basicamente, a diferença entre estas fórmulas encontra-se no termo referente à perda da energia,

conforme será visto adiante, deformações elásticas eram consideradas “perdas”. No tanto, de acordo com Terzaghi (1948), a deformação elástica da estaca não pode ser considerada perda de energia, pois, para que esta ocorra é necessária uma reação oposta pelo solo capaz de provoca-la, caso contrário haveria predominantemente deformação plástica do solo. Seguindo este mesmo raciocínio, Chellis (1961) propôs a utilização da lei de Hooke no cálculo da resistência oposta pelo solo, conforme será visto mais diante, considerando que a estaca deforma-se proporcionalmente a esta resistência. Atualmente, as fórmulas deduzidas à luz da equação da onda também admitem essa proporcionalidade, como as fórmulas propostas por Uto et al. (1985) e Matsuo et al. (1989).

No entanto, neste item do trabalho será adotado o conceito utilizado na dedução das fórmulas dinâmicas de cravação derivadas da equação (2.3.1), na qual as energias não utilizadas na penetração permanente da estaca são consideradas perdas.

Uma das fórmulas mais antiga foi proposta em 1859 por Redtenbacher, denominada “fórmula clássica pura ou racional completa”, na qual são consideradas todas as perdas de energia supostamente ocorridas durante a cravação. O primeiro termo refere-se à energia transmitida pelo martelo, já deduzida da energia dissipada antes do choque; o segundo termo representa o trabalho realizado no deslocamento da estaca, e os demais termos representam a energia dissipada devido ao rendimento do golpe, às deformações elásticas da estaca, do capacete (considerando-se todo sistema de amortecimento) e do solo, respectivamente:

$$\underbrace{\underbrace{e_f \cdot W \cdot H}_1 = \underbrace{R \cdot S}_2 + \underbrace{\frac{e_f \cdot W \cdot H \cdot P \cdot (1 - \eta^2)}{W + P}}_3 + \underbrace{\frac{R^2 \cdot L'}{2 \cdot E' \cdot A'}}_4 + \underbrace{\frac{R^2 \cdot L}{2 \cdot E \cdot A}}_5 + \underbrace{E_s}_6}_{(2.3.2)}$$

Onde:

- 1 : Energia total transmitida pelo golpe do martelo;
- 2 : Trabalho realizado para deslocar a estaca;
- 3 : Termo de eficiência do impacto Newton;
- 4 : Energia dissipada na compressão elástica do capacete;
- 5 : Energia dissipada na compressão elástica da estaca;
- 6 : Energia dissipada na compressão elástica do solo (Es) mais outras perdas

- P : Peso da estaca;
 η : Coeficiente de restituição;
 L : Comprimento total da estaca;
 A : Área da seção transversal da estaca;
 E : Módulo de elasticidade da estaca;
 L', A' e E' referem-se ao capacete.

Embora aparentemente correta, esta expressão e, conseqüentemente, todas as suas derivações, baseiam-se na teoria do choque de Newton, a qual não é aplicável à cravação de estacas. No entanto, de acordo com Costa Nunes (1958), até os estudos de Cummings (1940) considerava-se aceitável o fundamento teórico adotado.

Segundo Cummings (1940), afirma que, a aplicação da lei de Hooke no cálculo da energia gastada em deformações elásticas apenas para solicitações estáticas, não sendo, portanto, correta para cargas dinâmicas. Cummings (1940) adverte ainda que por definição, o coeficiente de restituição considerado na teoria de impacto de Newton já inclui todas as perdas de energia decorrentes do golpe do martelo. Desta forma, as perdas devido às deformações elásticas estariam sendo duplamente consideradas. Este pesquisador, no entanto, descarta qualquer possibilidade da aplicação desta teoria à cravação de estacas visto que esta se restringe a corpos livres (suspensos).

Segundo a Rosa (2000), embora as afirmações de Cummings (1940) sejam corretas, atualmente tem-se obtido bons resultados com a aplicação da lei de Hooke em carregamentos dinâmicos.

A partir da expressão (2.3.2) é possível deduzir inúmeras outras desde que assumidas determinadas suposições referente à dissipação da energia. Um conjunto de fórmulas dinâmicas será estudas no presente trabalho.

A continuação se descreve cada um das fórmulas dinâmicas baseadas na conservação de energia e a lei de choque de Newton.

2.3.3.1. Fórmula de Sanders (1850)

A fórmula de Sanders, proposta em 1851, iguala a energia de queda do martelo com o deslocamento da estaca multiplicado pela resistência à cravação

(ou seja, a energia potencial do martelo é integralmente transformada em trabalho). A hipótese adotada na fórmula de Sanders se despreza qualquer perda de energia (figura 2.1).

Para se obter a resistência admissível de uma estaca através desta fórmula, a resistência à cravação deve ser dividida por um fator de correção igual a 8, que fará o devido desconto da resistência dinâmica (Velloso & Lopes, 2002)

$$W.H = R.S \quad (2.3.3)$$

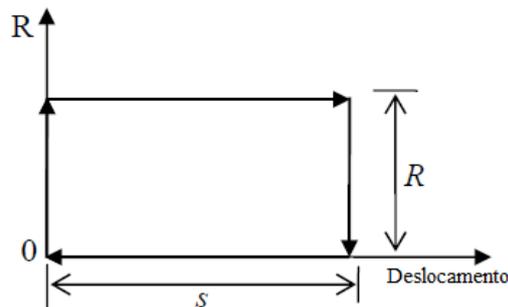


Figura 2.1- Hipótese adotada na fórmula de Sanders (Araújo, 1988).

2.3.3.2. Fórmula de Weisbach

Supondo que a única perda seja devido à compressão elástica da estaca, deduz-se a equação proposta por Weisbach em 1850, a qual considera que toda a reação oposta esteja concentrada na ponta da estaca.

$$W.H = R.S + \frac{R^2.L}{2.E.A} \quad (2.3.4)$$

Onde:

$$R = \frac{-S.A.E}{L} + \sqrt{\left(\frac{S.A.E}{L}\right)^2 + \frac{2.W.H.A.E}{L}} \quad 2.3.4A$$

Chellis (1961) entende que o valor de “L” a ser adotado na fórmula de Weisbach corresponde ao comprimento total da estaca, o que significa desprezar qualquer contribuição de resistência devido ao atrito lateral. No entanto, Chellis (1961) sugere a utilização da chamada “profundidade do centro de resistência à

cravação” (L'), conforme a denominação proposta pelo mesmo, para incluir a parcela de resistência lateral.

Esta fórmula usa um fator de correção igual a 2,6.

A expressão (2.3.5) é o resultado da modificação da fórmula de Weisbach, por Jambu em 1957, o qual introduziu empiricamente o termo $(1.5+0.3P/W)$, que tem por finalidade compensar as perdas de energia devido ao impacto, ignoradas pela fórmula de Weisbach.

$$R = \frac{-S.A.E}{L} + \sqrt{\left(\frac{S.E.A}{L}\right)^2 + \frac{2.e_f.W.H.E.A}{L\left(1.5+0.3\frac{P}{W}\right)}} \quad (2.3.5)$$

Nesta expressão são desprezadas as dissipações referentes ao encurtamento de solo e do capacete.

2.3.3.3. Fórmula dos Holandeses (1812) e Brix

A fórmula dos Holandeses é idêntica à fórmula de Eytelwein que foi desenvolvido em um momento em que as estacas de aço e concreto estavam sendo usada com maior frequência nos Estados Unidos, no lugar de usar estacas de madeira, esta fórmula foi modificada pela Engineering News Record (ENR).

A fórmula dos Holandeses, proposta em 1812 desconsidera todas as perdas devido às deformações elásticas, além de assumir o impacto como sendo totalmente inelástico ($\eta=0$), o que corresponde a admitir que, após o choque, tanto o martelo quanto a estaca deslocam-se com a mesma velocidade, obtém-se:

$$R = \frac{W.H}{S\left[1 + \frac{P}{W}\right]} \quad (2.3.6)$$

Segundo o “Department of Civil de Washington State Transportation Center, 1985”, recomenda um fator de correção de 6.

Segundo Chellis (1961), deve-se adotar um F.C=10 para martelos de queda livre e F.C=6 para martelos a vapor.

A fórmula de Brix despreza a elasticidade que possa ocorrer individualmente à estaca e ao martelo (Gonçalves, 2008). Use-se um fator de correção de $F.C=5$.

$$R = \frac{W^2 H.P}{S.(W+P)^2} \quad (2.3.7)$$

2.3.3.4.

A fórmula da Engineering News Record (ENR)

A fórmula Engineering News Records (ENR), proposta por A.M. Wellington em 1888, se baseia na premissa de que, sob ação do martelo, a estaca se encurta elasticamente e depois penetra no solo encontrando uma dada resistência “R”, foi intensamente utilizado nos Estados Unidos durante muitos anos. Esta equação, embora aparentemente empírica, é também um desenvolvimento da fórmula racional, cuja energia potencial ($W.H$) corresponde à área definida no gráfico resistência versus deslocamento (OABD) da figura (2.2), e a energia perdida compreende à área (BCD):

$$\begin{aligned} W.H &= OABD \\ W.H &= OABCD + BDC \\ W.H &= R(S + K/2) \end{aligned}$$

Ou seja:

$$R = \frac{W.H}{S + K/2} \quad (2.3.8)$$

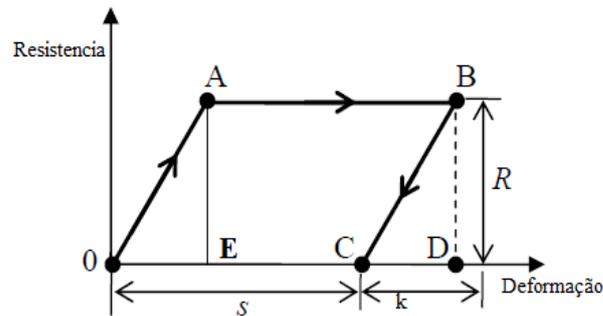


Figura 2.2 – Gráfica resistência x deslocamento do topo da estaca para um golpe (Whitaker, 1976).

Foram sugeridos valores empíricos para o encurtamento por Willington $k/2 = 1$ ” para martelos de queda livre.

Onde “S” é a deformação plástica do solo (nega) e “K” é a deformação elástica do solo e da estaca, também denominada “repique elástico”.

Algumas expressões, como as de Engineering News Records (ENR), adotam valores constantes em suas fórmulas ou atribuem valores empíricos a determinados parâmetros como a deformação elástica do solo, deformação elástica total, etc. Nestas equações é necessária a aplicação das unidades de medida estabelecidas pelos autores.

2.3.3.5. Fórmula de Hiley

A fórmula de Hiley proposta em 1925 desenvolveu sua fórmula em uma tentativa de eliminar alguns erros associados com a avaliação da absorção da energia pelo sistema estaca-solo durante a cravação.

A proporcionalidade existente entre a tensão e a deformação específica em uma estaca, considerando-a como sendo perfeitamente elástica, é dada pela equação estabelecida por Hooke, a rigor, válida somente para carregamento estático por não considerar os efeitos das ondas geradas por um carregamento dinâmico. A energia (E_e) corresponde a esta deformação dada por:

$$E_e = \frac{R^2 \cdot L}{2 \cdot E \cdot A} = \frac{R \cdot C_2}{2}$$

A equação de Hiley supõe as seguintes perdas:

1. Eficiência do martelo, (e_f);
2. As perdas no impacto, $\left(e_f \cdot W \cdot H \cdot \left[\frac{P \cdot (1 - \eta^2)}{W + P} \right] \right)$, onde η é coeficiente de restituição;
3. Perdas por compressão elástica do capacete $\left(\frac{R \cdot C_1}{2} \right)$;
4. Perdas por compressão elástica da estaca $\left(\frac{R}{2} \cdot \frac{R}{E} \cdot \frac{L}{A} = \frac{R \cdot C_2}{2} \right)$;
5. Perdas por compressão elástica do solo $\left(\frac{R \cdot C_3}{2} \right)$;

Então pode-se rescrever a equação (2.3.2)

$$R \cdot S = e_f \cdot W \cdot H - e_f \cdot W \cdot H \cdot \left[\frac{P \cdot (1 - \eta^2)}{W + P} \right] - \frac{R \cdot C_1}{2} - \frac{R \cdot C_2}{2} - \frac{R \cdot C_3}{2}$$

Combinando os termos, obtém-se a fórmula de Hiley, para esta fórmulas se considera uma fator de correção entre 2 e 6.

$$R = \frac{e_f \cdot W \cdot H}{S + \frac{1}{2} \cdot (C_1 + C_2 + C_3)} \cdot \frac{W + \eta^2 \cdot P}{W + P} \quad (2.3.9)$$

Na qual:

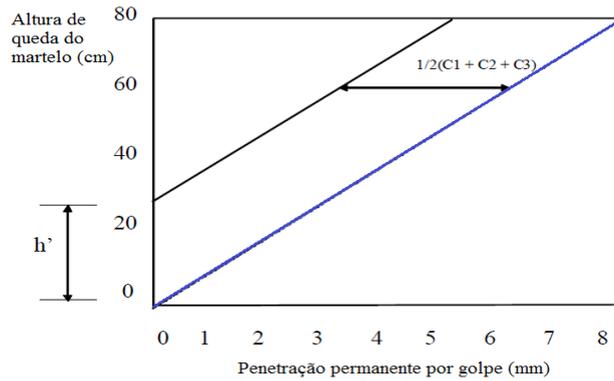
C_1 : deformação elástica do capacete, cepo e coxim;

C_2 : deformação elástica da estaca;

C_3 : deformação elástica do solo.

Os valores de C_1 , C_2 , e C_3 podem ser encontrados nas tabelas de Chellis (1961) ver tabelas (2.2) e (2.3).

Chellis (1961) sugere medir os valores de ‘S’ e ‘ $C_2 + C_3$ ’ em campo, através do dispositivo mostrado na figura (2.4). O qual consta de um referencial fixo e de um papel fixado à estaca, onde registra-se a “nega” e o repique elástico através do deslocamento de um lápis sobre o referencial. Chellis (1961) sugere, ainda, obter encurtamento elástico total ($C_1 + C_2 + C_3$) para martelos de queda livre através de gráfico altura queda versus penetração conforme à figura (2.3), onde h' é a maior altura de queda cujo valor da nega é igual a zero.



Legenda:

Penetração por golpe x altura de queda 

Paralela traçada a partir da origem 

Figura 2.3 - Gráfico altura de queda x deslocamento (Chellis, 1961).

No presente trabalho o valor da compressão temporária elásticas da estaca ‘ $C_2 = R.L/E.A$ ’ proposta por Chellis, será inserido na equação geral de Hiley (2.3.9), assim como ‘ T ’ é denominado energia líquida que alcança o sistema estaca – solo definida como:

$$T = e_f \cdot e_{iv} \cdot W \cdot H \quad (2.3.9A)$$

Temos:

$$R = \frac{-EA}{L} \cdot \left(S + \frac{C1 + C3}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{EA}{L} \right)^2 \cdot \left(S + \frac{C1 + C3}{2} \right)^2 + \frac{2 \cdot EA \cdot T}{L}} \quad (2.3.9B)$$

Onde:

e_f : Eficiência do martelo

e_{iv} : Fator de eficiência do impacto

W : Peso do martelo

P : Peso da estaca

Onde o valor de ‘ e_{iv} ’ depende do valor do coeficiente de restituição ‘ η ’

$$e_{iv} = \frac{W + \eta^2 \cdot P}{W + P} \quad (2.3.9C)$$

Os valores do coeficiente de restituição são apresentados nas tabelas do anexo (1).

Tabela 2.2 - Compressão temporária C_1 do capacete, coxim e cepo (em polegadas e milímetros) Chellis, (1961).

Material para que o golpe é aplicado	Cravação fácil P1 = 500psi (3,5MPa) C_1 (mm) - (plg)	Cravação média P1 = 1000psi (7,0MPa) C_1 (mm) - (plg)	Cravação dura P1 = 1500psi (10,5MPa) C_1 (mm) - (plg)	Cravação muito dura P1 = 2000psi* (14Mpa) C_1 (mm) - (plg)
Sobre a cabeça da estaca de madeira sem capacete.	(1,00) – (0,05)	(2,00) – (0,10)	(3,00) - (0,15)	(5,00) – (0,20)
Capacete sobre estaca de concreto.	(3,00) – (0,12)	(6,0) – (0,25)	(9,0) – (0,37)	(12,5) – (0,50)
Capacete de aço sobre estaca metálica.	(1,0) – (0,04)	(2,0) – (0,08)	(3,0) – (0,12)	(4,0) – (0,16)
Estacas de aço sem capacete.	(0,00) – (0,00)	(0,00) – (0,00)	(0,00) – (0,00)	(0,00) – (0,00)

(*) Para tensões de cravação maiores a 2000psi use valores de ' C_1 ' da ultima coluna.

Tabela 2.3 - Compressão temporária do solo valores de ' C_3 ' em polegadas (Chellis, 1967).

Tipo de estaca	Cravação fácil $p_3 = 500$ psi	Cravação média $p_3 = 1000$ psi	Cravação dura $p_3 = 1500$ psi	Cravação muito dura $p_3 = 2000$ psi
Para estacas de seção constante	0,10 0,05 -0,10	0,10 0,05 – 0,10	0,10 0,10-0,20	0,10 0,05-0,10

Segundo Açominas SIDERBRASIL recomenda que para calcular a deformação elástica do capacete, cepo e coxim ' C_1 ', ela é nula em caso de cravação direta sobre uma estaca metálica, no caso da deformação elástica do solo ' C_3 ', varia de zero (camadas duras, rochas, pedregulhos) e 0,5cm (solos moles homogêneos, resilientes), ou pode ser medida durante a cravação da estaca; pode-se adotar, de uma forma geral ' C_3 ' = 0,25cm.

2.3.3.6. Fórmula dos Dinamarqueses

A fórmula dos Dinamarqueses foi desenvolvida por Sorensen e Hansen (1957) propuseram uma fórmula obtida através de um análises dimensional, cuja única perda de energia considerada é devido à deformação elástica da estaca (S_0) e considera a eficiência do martelo (e_f). Recomenda-se um fator de correção de 2.

$$S_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot e_f \cdot W \cdot H \cdot L}{A \cdot E}} \quad (2.3.10)$$

Substituindo na equação de (2.3.2) e desprezando-se as demais perdas, obtém-se a expressão proposta por estes autores:

$$\begin{aligned} e_f \cdot W \cdot H &= R \cdot S + \frac{R}{2} \cdot S_0 \\ R &= \frac{e_f \cdot W \cdot H}{S + \frac{1}{2} \cdot S_0} \end{aligned} \quad (2.3.11)$$

Como eficiência do martelo, são recomendados ' $e_f = 0,7$ ', para martelos de queda livre e ' $e_f=0,9$ ', para martelos diesel, e fator de correção igual a 2.

Segundo Caputo (1987), esta expressão é geralmente usada em estacas metálicas, embora os próprios elaboradores da fórmula não façam restrição quanto à sua utilização.

2.3.3.7. Fórmula de Janbu

A fórmula de Janbu, proposta em 1953, leva em conta as perdas de energia no martelo, na compressão elástica da estaca (como na fórmula de Weisbach) e no impacto (como na fórmula Holandesa). Na fórmula de Janbu a resistência dinâmica do solo é levada em consideração assumindo um incremento de carga proporcional à resistência estática. Nesta fórmula de Janbu a resistência estática é multiplicada pelo fator ' K_u ' este fator pode ser considerado como o produto de dois fatores que representam a situação que ocorre durante o impacto.

O primeiro fator descreve o efeito dinâmico e esta relacionada às forças de inercia e amortecimento. O segundo fator é sobre o efeito do amolgamento e poro-pressões acumuladas que podem reduzir a resistência, no caso de solos colapsíveis ou aumentar para solos dilatantes. Para o caso do efeito de amolgamento e poro-

pressão geradas serem levadas em consideração na avaliação da resistência estática, o fator ‘ K_u ’ passa a representar apenas a parte dinâmica. A expressão proposta por Janbu é:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{e_f \cdot W \cdot H}{K_u \cdot S} \dots\dots (a) \\ K_u &= C_d \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}} \right) \dots\dots (b) \\ C_d &= 0,75 + 0,15 \frac{P}{W} \dots\dots (c) \\ \lambda &= \frac{e_f \cdot W \cdot H \cdot L}{E \cdot A \cdot S^2} \dots\dots (d) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.12)$$

Para esta fórmula recomende-se um fator de correção igual a 2. O fator de eficiência ‘ e_f ’ depende do tipo do equipamento de cravação, do procedimento adotado para a cravação, do tipo de estaca e das condições do solo. Sendo alguns valores recomendados pela Engineering News ‘ENR’:

$e_f = 0,40$ para uma condição difícil de cravação

$e_f = 0,55$ para condições intermedias

$e_f = 0,70$ para boas condições de cravabilidade

2.3.3.8. Fórmula de Gates

A fórmula de Gates é uma relação estritamente empírica entre a energia do martelo e a penetração final, e os resultados de ensaios de carga da estaca. Foi desenvolvido por um ajustamento estatístico (baseado em aproximadamente 100 ensaios de prova de carga). Estas fórmulas empíricas não apresentam fundamentos teóricos que as justifiquem e, geralmente apresentam em comum com as fórmulas derivadas da racional; o termo referente à energia aplicada pelo martelo, como a equação sugerida por Gates e 1957 apresentada a seguir:

$$R = 4.0 \sqrt{e_f \cdot W \cdot H} \cdot \log(25/S) \quad (2.3.13)$$

Onde “R” em (Tn) e H e S em (cm).

Tabela 2.4 - Resumo de fórmulas dinâmicas mais comuns usadas na cravação de estacas (Poulos & Davis, 1980 e Washington State Transportation Center USA, 1985).

Nome da fórmula	Equação de "R"	Observações	F.S
Eytelwein	$R = \frac{e_f \cdot W \cdot H}{S \left[1 + \frac{P}{W} \right]}$		6
Sanders	$R = \frac{W \cdot H}{S}$		8
Weisbach	$R = \frac{-SAE}{L} + \sqrt{\frac{2 \cdot W \cdot H \cdot A \cdot E}{L} + \left(\frac{S \cdot E \cdot A}{L} \right)^2}$		2,6
Redtenbacher	$R = \frac{AE}{L} \left[-S + \sqrt{S^2 + e_f \cdot W \cdot H \cdot \frac{W}{W+P} \cdot \frac{2L}{AE}} \right]$		6
Engineering News Record	$R = \frac{e_f \cdot W \cdot H}{S + K/2}$	k/2 = 2.54cm	6
Gates	$R = 4.0 \sqrt{e_f \cdot W \cdot H} \cdot \log \left(\frac{25}{S} \right)$	Unidades métricas em (Tn) e cm	3
Rankine	$R = \frac{2A \cdot E \cdot S}{L} \left[\frac{e_f \cdot W \cdot H \cdot L}{S^2 \cdot E \cdot A} \right]$		
Hiley	$R = \frac{e_f \cdot W \cdot H}{S + \frac{1}{2}(C_1 + C_2 + C_3)} \cdot \frac{W + \eta^2 \cdot P}{W + P}$	Tabela (2.3) valores de C ₁ , C ₂ , C ₃	2 a 6
Dinamarqueses	$S_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot e_f \cdot W \cdot H \cdot L}{E \cdot A}}$ $R = \frac{e_f \cdot W \cdot H}{S + \frac{1}{2} \cdot S_0}$	Ver valores de 'e _f ' na tabela (2.1)	2
Janbu	$R = \frac{e_f \cdot W \cdot H}{K_u \cdot S} \dots\dots(a)$ $K_u = C_d \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}} \right) \dots\dots(b)$ $C_d = 0,75 + 0,15 \frac{P}{W} \dots\dots(c)$ $\lambda = \frac{e_f \cdot W \cdot H \cdot L}{E \cdot A \cdot S^2} \dots\dots(d)$		2
Holandeses e Brix	$R = \frac{W^2 \cdot H}{S \cdot (W + P)}, R = \frac{W^2 \cdot H \cdot P}{S \cdot (W + P)^2}$	Para martelos de queda livre e vapor	10 5
Modificada pela ENR	$R = \frac{e_f \cdot W \cdot H}{S + K} \cdot \frac{W + \eta^2 \cdot P}{W + P}$	K = 2.54mm, S(mm) e H(mm)	6
Canadian National Building Code	$R = \frac{e_f \cdot W \cdot H \cdot \frac{W + \eta^2 \cdot (0.5P)}{W + P}}{S + \frac{R}{2 \cdot A} \left(\frac{L}{E} + 0.0001 \right)}$	Onde 'η' é 0.25 para estacas de aço e, outros 0.1	4

2.3.4. Controle de estaqueamentos com medições de nega e repique

a. Nega

Denomina-se nega ao valor do deslocamento médio obtido nos últimos 10 golpes do processo de cravação (Alves, 2004).

A nega é um dos controles mais simples de ser executados. Sua obtenção vem da fixação de uma folha de papel no próprio corpo da estaca e, com auxílio de um lápis movimentando horizontalmente durante os golpes na estaca, obtém-se um diagrama ver figura (2.4). A nega caracteriza-se, então pelo deslocamento vertical da linha traçada com relação à horizontal indicando, assim, o quanto a estaca penetrou no solo nos últimos golpes.

A nega é a principal ferramenta que dispõe o engenheiro de obras para realizar a cravação de estaca. O valor mínimo de nega para esta parada é estipulada pelo engenheiro projetista da fundação. Por este motivo, a nega é considerada um mecanismo de controle e homogeneização das estacas por ser correlacionada com a sua resistência de serviço. A “nega” corresponde à penetração permanente da estaca, quando sobre a mesma se aplica um golpe de martelo. Em geral é obtida como um decimo de penetração para dez golpes.

No caso de estacas Franki e outras estacas parecidos em seu processo de execução, a “nega” é obtida ao final da cravação do tubo. Por esta razão não é propriamente um controle da resistência mobilizada da estaca, visto que a mesma só ficará concluída após a execução da base alargada e da remoção do tubo, concomitante com a concretagem do fuste.

Para estacas escavadas, as estacas Strauss, etc. e os tubulões não existem um procedimento rotineiro de medida da resistência (analogamente a nega) que permita durante sua instalação, estimar a resistência mobilizada da estaca. Nesses casos, recorre-se à experiência da firma e da equipe envolvida no projeto e execução. A fixação da cota de apoio desses tipos de fundação é baseada, fundamentalmente, nas investigações geotécnicas disponíveis (sondagens a percussão e outros ensaios) e, portanto, estas devem ser de qualidade confiável e em número confiável para permitir adotar decisões durante sua execução.

Segundo Velloso & Lopes (2002) a cravação de uma estaca é um fenômeno dinâmico e, portanto, além da resistência estática do solo, há a mobilização da

resistência dinâmica. Desta forma a carga de trabalho obtida através das fórmulas dinâmicas (já mencionadas no item anterior), deve ser feita dividindo-se a resistência à cravação por um coeficiente de correção que fará o devido desconto da resistência dinâmica.

b. Repique

Quando se aplica um golpe de martelo ou pilão na cabeça de uma estaca, ela sofre um deslocamento. A parcela elástica desse deslocamento é chamada repique (ou parcela elástica do deslocamento máximo de uma reação da estaca); obtido pelo mesmo processo da nega no momento do apiloamento da estaca.

Segundo Aoki e Alonso (1991) o repique é uma marcação que indica a soma da deformação recuperada após o golpe pelas parcelas do solo mais a estaca que, devidamente interpretada, permite estimar a carga mobilizada da estaca no instante da cravação.

Devido algumas incertezas que ocorrem durante a fase de projeção na adoção de parâmetros e a necessidade ao atendimento das cargas das estruturas fez-se necessário desenvolver uma metodologia de controle de campo a fim de garantir as resistências em obras. Para isso foram desenvolvidos alguns métodos para estimar a resistência mobilizada da estaca, utilizando o repique elástico algumas das fórmulas consideradas como Chellis (1961).

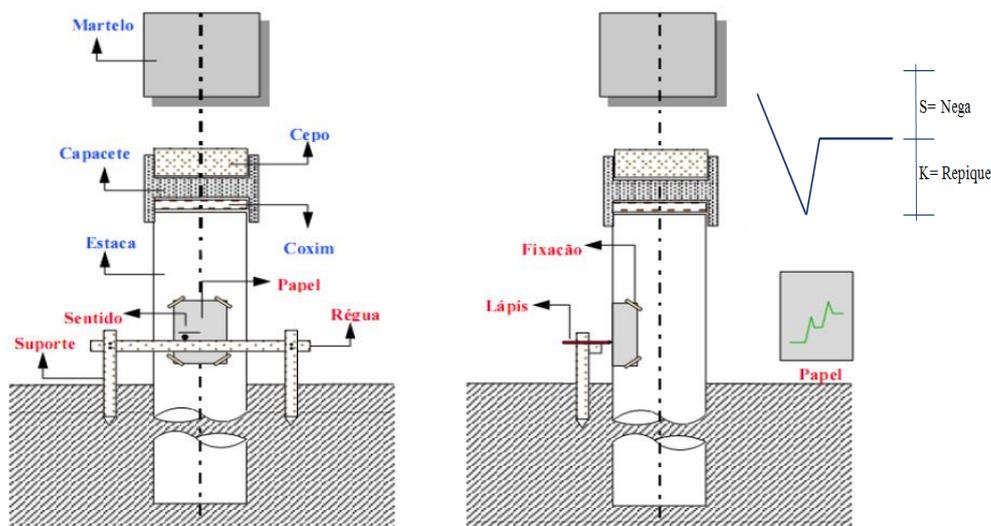


Figura 2.4 - Vista frontal e lateral do esquema para obter a nega e o repique elástico.

A figura (2.5) explica os deslocamentos que acontecem no sistema estaca-solo após a cabeça da estaca ter sido atingido pelo golpe de martelo onde: S = deslocamento permanente (nega); C_2 = deslocamento elástico do topo da estaca (repique); C_3 = deslocamento elástico do solo (Quake); e L = comprimento total da estaca. Na nomenclatura do CASE (tema que será estudado mais adiante), $DMX = S+K$, onde, K = deformação elástica da estaca e do solo (C_2+C_3) que vem a ser o deslocamento total da estaca.

Seguindo este conceito, Chellis (1961) propôs a aplicação da lei de Hooke no cálculo da deformação elástica da estaca (C_2), sugerindo que a mesma possa ser considerada como uma mola, deformando-se proporcionalmente à carga aplicada. Desta forma Chellis (1961) sugere que a deformação elástica do material da estaca (C_2) possa ser calculada pela seguinte expressão:

$$C_2 = \frac{Rl'}{E.A} \quad (2.3.14)$$

Onde “ l' ” é “comprimento virtual” da estaca. As demais variáveis já foram definidas anteriormente.

De acordo com Aoki (1989), para o caso geral em que uma estaca encontra-se acima do substrato rígido ver figura (2.5), o valor da deformação da estaca é dado pela seguinte expressão:

$$C_2 = \int_0^L \frac{R(z).dz}{E.A} \quad (2.3.15)$$

Onde $R(z)$ é o esforço normal estático transmitido ao segmento dz , “ C ” é a espessura do substrato deformável, “ L ” é o comprimento da estaca e ‘ Z ’ é a distância entre o nível do terreno e o “indeslocável”.

Segundo Aoki (1989), mostra a proporcionalidade entre resistência mobilizada (RMX) e C_2 para qualquer nível de energia aplicada, assim temos:

$$RMX = \frac{C_2.E.A}{l'} \quad (2.3.16)$$

Onde valor de ($l' = \alpha.L$) dependerá da forma da distribuição da carga ao longo do fuste (diagrama de transferência de carga) e da relação entre a carga de ponta e a carga total.

Velloso propôs adotar, para os casos usuais, $\alpha = 0.7$, ou seja:

$$R_{mob} = \frac{C_2.E.A}{0.7L} \quad (2.3.17)$$

Onde “Rmob” é a resistência mobilizada.

Seguindo-se o modelo elasto-plástico, tem-se inicialmente a deformação elástica do solo (C_3) até se atingir o valor máximo, denominado “quake”, seguido da ruptura. Assim, admite-se que a deformação da estaca atinge um valor máximo junto com o pico da deformação elástica do solo. Na ruptura os deslocamentos da estaca são predominantemente devido à deformação plástica do solo na ponta. Desta forma, cada valor de carga mobilizada corresponde a um conjunto de valores S , C_2 e C_3 obtidos para diferentes energias aplicadas (Aoki, 1993), o que permite considerar válido o traçado da curva carga mobilizada (RMX) versus deslocamento permanente e deslocamento total (DMX) sugerido por Niyama e Aoki (1991), ilustrado na figura (2.6) as denominações RMX, e DMX são utilizadas pelo método de CASE, que será estudada mais diante.

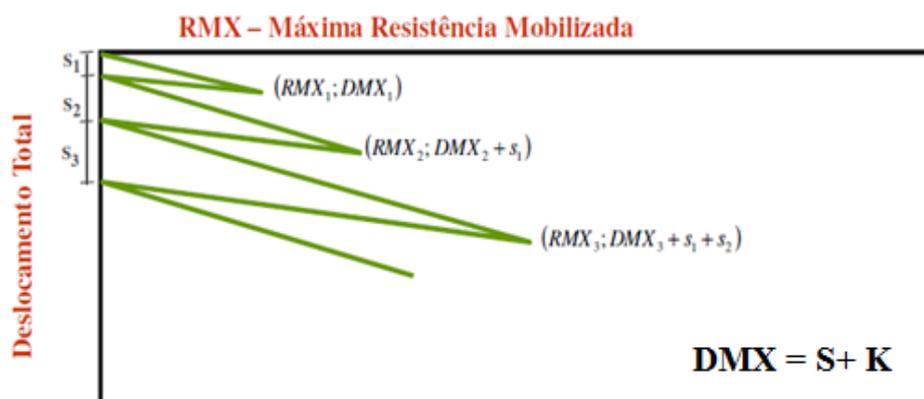


Figura 2.6 - Traçado da curva resistência x deslocamento (Niyama e Aoki 1991).

Onde:

$$DMX = S + K$$

K : Deformação elástica da estaca e do solo (C2+C3)

S : Deformação permanente (nega).

RMX_i , DMX_i e S_i são aos valores de resistência mobilizada, deslocamento total e deslocamento permanente referentes ao golpe “i”, respectivamente.

Pode-se ainda traçar a curva resistência mobilizada (RMX) versus deslocamento total (DMX) sugerida por Aoki (1997), partindo-se da mesma origem, desde que as condições iniciais do sistema solo-estaca não sofram mudanças substanciais de um golpe para outro.

2.3.5.

Uma revisão de avaliações anteriores do uso das fórmulas dinâmicas

As fórmulas dinâmicas utilizam as leis que governam o comportamento de corpos que se chocam; basicamente enfocam a conservação de energia e, algumas delas, incorporam as leis de choque de Newton para estimativa das perdas de energia (Velloso e Lopez, 2002), contudo, há de se considerar que a cravação de uma estaca não é tão simples assim. A estaca não é um corpo livre, estando ainda inserida no solo com o qual reage intimamente quando recebe um golpe do martelo (Araújo, 1998).

Segundo Flaate, (1964) realizou 169 provas de carga em estacas cravadas de madeira, estacas metálicas, estacas pré-fabricadas de concreto armado em solos arenoso, todos os valores da resistência á cravação foram obtidos no final da cravação (EOD). As fórmulas de Hiley, Janbu e a Engineering New Records seriam escolhidas para sua avaliação. Flaate reportou que a fórmulas de Janbu, Hiley e a Engineering New Records fornecem de muito bom, bom e uma previsão ruim das resistências das estacas respectivamente, Flaate sugeriu o uso de um fator de segurança de 12 para a fórmula da ENR.

Olson e Flaate (1967) fizeram comparações de sete fórmulas dinâmicas de cravação a Engineering News (ENR), Gow, Hiley, Pacific Coast Uniform Building Code, Janbu, Dinamarqueses e Gates. Onde obtiveram que a fórmula Janbu é a mais acurada na previsão da resistência para estacas de madeira e estacas metálicas. Porém concluíram que as fórmulas dos Dinamarqueses, Janbu e

Gates exibem um fator de correlação média grande, desde que a fórmula de Gates seria a mais simples que as outras fórmulas é a recomendável segundo Olson e Flaate.

GOBLE, em 1988 realizou medições dinâmicas usando o Pile Driving Analyzer (PDA) em sete estacas metálicas, divididos em 03 três estacas metálicas tubulares e 04 estacas metálicas tipo 'H'. Os resultados das resistências mobilizadas das sete estacas são apresentados na tabela (2.5). Por outra parte também se mostram na mesma tabela a previsão das resistências mobilizadas pela fórmula dinâmica modificada da Engineering News (ENR) as quais são comparadas coma as medições do PDA, mediante uma análise estatística. Na tabela (2.6) se apresentam os resultados estatísticos da média da relação (Fórmula Dinâmica/PDA), desvio padrão e, coeficiente de variação.

Tabela 2.5 - Previsão da resistência mobilizada pela fórmula dinâmica modificada da 'ENR' versus medições do PDA. (Vulcanhammer. net, 1997).

Tipo de estaca	Previsão da resistência mobilizada (Kips)	Resistência mobilizada pelo 'PDA' (Kips)
Estaca tipo 'H', 1-3A	164	313
Estaca tipo 'H', 1-6	192	428
Estaca tipo 'H', 1-9	156	337
Estaca tipo 'H', 2-5	133	225
Estacas tubulares, 3-1	78	232
Estacas tubulares, 3-4	151	130
Estacas tubulares, 3-7	124	183

Tabela 2.6 - Análises estatísticas das comparações.

Tipo de estacas	Média da relação (u)	Desvio padrão	Coeficiente de variação	Número de estacas
Estacas tipo 'H'	0,51	0,07	0,13	4
Estacas tubulares	0,81	0,31	0,38	3
Total de estacas	0,64	0,24	0,38	7

Segundo a tabela (2.6) observa-se que para estacas metálicas tubulares há maior dispersão dos dados, em relação às estacas metálicas tipo 'H'.

De acordo a Chellis (1961), a fórmula de Hiley subestima a resistência das estacas pesadas e longas, quando comparadas com resultados de provas de carga.

Estacas longas ou pesadas apresentam resultados bastante compatíveis, mas mesmo não acontece para a combinação longo-pesada. Segundo Chellis (1961) isto acontece provavelmente porque quando uma estaca pesada e longa recebe um golpe do martelo, a onda de impacto descendente colide com a onda refletida (ascendente) do golpe anterior. Chellis (1961) afirma ainda que isto pode ser verificado através de análises da equação da onda.

Segundo Whitaker (1970), em 1942 Terzaghi comparou resultados de provas de carga estáticas em estacas de madeira, concreto e aço com aqueles obtidos através de sete fórmulas dinâmicas. Ele encontrou um fator de ' μ ' que corresponde á relação entre os resultados das provas de carga e os valores calculados pelas fórmulas dinâmicas. Os valores de ' μ ' assim obtidos variavam entre 0,25 a 4,00 para diferentes fórmulas aplicadas aos mesmos dados, e que algumas fórmulas não eram necessariamente 'boas' simultaneamente para estacas de madeira, concreto e aço.

O Departamento de Transporte de Washington (WSDOT) utilizou vários métodos para a previsão da resistência mobilizada das estacas, entre elas são: A fórmula da Engineering News (ENR), Gates, a fórmula dinâmica da (WSDOT), fórmula corrigida de Gates e medições da resistência da estaca através do PDA, que foram comparadas a partir de 316 provas de carga, concluindo que a fórmula corrigida de Gates é a mais acurada na previsão da resistência mobilizada em estacas, com um valor da média da relação da previsão pela fórmula dinâmica entre as medições de ensaio no campo igual a 1,02 e, um coeficiente de variação pequeno em relação das outras fórmulas aplicadas.

O código inglês CODE OF PRACTICE FOR FOUNDATION (1972) diz que em solos granulares o valor aproximado da resistência mobilizada de uma estaca pode ser determinado através de uma fórmula dinâmica. As fórmulas dinâmicas não são diretamente aplicáveis á depósitos de solos moles; elas devem ser usadas com precaução em qualquer solo, principalmente naqueles onde há o fenômeno de relaxação a após a cravação das estacas. Então a fórmula mais segura deveria dar um resultado dentro da faixa de 40% a 130% da capacidade de carga última obtida através de uma prova de carga estática. Análises estatísticas mostram que não há nenhuma fórmula completamente segura. Com o resultado de uma prova de carga num determinado local, um fator de correlação pode ser

aplicado à fórmula escolhida, de tal forma que os resultados da fórmula deveriam ter então confiança razoável para este local.

O código inglês CODE OF PRACTICE FOR FOUNDATION (1972) diz ainda que a fórmula de Hiley é uma das mais seguras e provavelmente a mais utilizada em Inglaterra.

Danzinger e Ferreira (2000) apresentam uma comparação entre os resultados de capacidade de carga dinâmica obtida pela fórmula dos Dinamarqueses e a equação de onda para estacas de aço. Só foram incluídas as estas cujos comprimentos eram inferiores à profundidade da sondagem SPT e também uma distancia máxima de 5m da mesma. Foi encontrada a seguinte correlação entre a resistência dinâmica avaliada pela equação da onda e a fórmula Dinamarquesa:

$$SRD (Dinexp) = 1,03SRD (Dinamarqueses)$$

Onde SRD é a sigla de Soil Resistance during Driving (Resistencia do solo durante a cravação) e Dinexp é o programa utilizado para a determinação da capacidade de carga das estacas durante a cravação pela equação de onda. Os autores asseguram a confiança da fórmula dinâmica dos Dinamarqueses para estacas de aço com características similares àquelas do banco de dados da tabela (2.7) de resumo das análises estatísticas de Poulos e Davis (1980).

Poulos & Davis (1980) reuniram um sumario de resultados de análises estatísticos de diversos estudos comparativos entre resultados de prova de carga e valores calculados por meio de fórmulas dinâmicas, conforme apresentados na tabela (2.7).

Nesta tabela o fator de segurança (FS) aplicável em cada fórmula tem por objetivo garantir que, em 98% dos casos, o valor calculado seja inferior ao que se mediria em uma prova de carga. O limite superior do fator de segurança (FS_{max}) indica o número de vezes que pode estar sendo subestimada a carga calculada. Maiores detalhes sobre a elaboração da tabela (2.7) deve-se considerar o próprio critério adotado pelos autores. Observa-se ainda, nesta tabela que, para um fator de segurança de 7.1 atribuído à fórmula de Eytelwein para garantir a condição 98% de probabilidade de $\mu > 1.0$, o valor da resistência última calculada poderá estar sendo subestimada em até 17 vezes. Fazendo-se a mesma análise para a fórmula Gates, ou seja, adotando-se 'FS =2.3' poderá se estar subestimando a

carga em até 5.1 vezes. Da tabela (2.7) se concluem que as fórmulas dinâmicas com maior confiabilidade são as fórmulas de Hiley, Janbu e Dinamarqueses.

Interessante observar ainda que, tanto Agerschou quanto Flaate obtiveram os valores do limite superior do fator de segurança e do desvio padrão (μ) da fórmula ENR bastante elevados, o que reflete a pouca confiabilidade desta expressão. Fazendo-se a mesma análise em relação às fórmulas de Janbu e, Dinamarqueses, observa-se que os resultados são significativamente melhores.

Tabela 2.7 - Sumário das análises estatísticas (Poulos & Davis, 1980).

Fórmula	Autor	Desvio padrão (μ)	Limite superior do fator de segurança (FS_{\max})	Fator de segurança (FS)	Numero de provas de carga
Engineering News Record (ENR)	A	0.78	26.0	0.86	171
	F	0.70	17.5	5.8	116
Hiley	S e H	0.27	3.8	1.4	50
	F	0.37	10.1	2.4	116
Janbu	S e H	0.25	3.6	2.3	78
	F	0.22	3.2	2.0	116
Danish	S e H	0.26	3.8	2.0	78
	O e F	0.28	4.1	3.0	55
	A	0.30	4.2	2.3	123
Eytelwein	S e H	0.57	17.0	7.1	78
Weisbach	A	0.36	6.0	2.6	123
Gates	O e F	0.35	5.1	2.3	55

Legenda:

S e H : Sorensen e Hansen (1957)

A : Agerschou (1962)

F : Flaate (1964)

O e F : Olsen & Flaate (1967) (estacas metálicas em areia)

μ = Fórmula dinâmica/CAPWAP

2.4. Ensaio dinâmico através da teoria de propagação de onda

2.4.1. Introdução

Tradicionalmente a resistência mobilizada das estacas é verificada através do ensaio de carga estática, mas devido a questões econômicas e aos prazos de execução das obras, em alguns países tem vindo a ser complementado pelo ensaio de carregamento dinâmico. Este ensaio encontra-se normalizado em diversos países, possivelmente o código mais divulgado que rege este ensaio é a norma ASTM 4945-00.

No Brasil atualmente já se encontra devidamente normalizada, através da NBR-13208 (Estacas - Ensaio de Carregamento Dinâmico), porém a NBR - 6122 (Projeto de Execução de Fundações), atualmente revisada e aprovada, estabelece sua necessidade de execução de ensaios de carregamento dinâmico em conformidade com a NBR – 13208, em um determinado número de estacas da obra, para que possa ser caracterizado como verificada a capacidade de carga a ser adotada em uma estaca.

O princípio de execução do ensaio é relativamente simples, uma vez que consiste apenas na aplicação de um impacto na cabeça da estaca, gerando uma onda que se propaga até à ponta onde se reflete voltando à cabeça. A forma mais simples de provocar este impacto é através da utilização do equipamento de cravação de estacas.

A onda gerada propaga-se na estaca sob a forma de uma onda longitudinal e unidimensional segundo o eixo da estaca. No processo de propagação onda é afetada pela interação solo-estaca. A análise através da equação de onda apresentados por Smith (1960) consiste na quantificação desta interação, através do estudo da onda que se propaga na estaca, inicialmente no sentido descendente e em uma fase posterior no sentido ascendente.

Devido às limitações tecnológicas, embora se conhecessem os princípios de execução e de interpretação de ensaio, este não era muito utilizado. Esta situação alterou-se com o desenvolvimento dos meios informáticos e com o trabalho pioneiro de Smith (1960).

Numa primeira etapa de aplicação de este ensaio, a energia transferida para a estaca era determinada a partir da velocidade de impacto do martelo e do coeficiente de restituição do amortecedor. Cada uma destas grandezas era determinada teoricamente recorrendo às leis básicas da física. A interpretação do ensaio baseava-se na energia transferida para a estaca e no trabalho realizado correspondente à penetração da estaca.

As dúvidas surgidas na interpretação do ensaio podiam ser devido às incertezas no conhecimento dos parâmetros do solo, mas também às aproximações efetuadas no cálculo da energia. Para ultrapassar estas incertezas foi implementada a realização de medições na própria estaca, efetuadas por extensômetros e acelerômetros. Desta forma, são obtidas as curvas da força e da velocidade em função do tempo numa determinada posição da estaca. Atualmente, esta técnica é conhecida como “Ensaio de Carregamento Dinâmico”. Este ensaio foi desenvolvido em uma tentativa de aperfeiçoamento das fórmulas de cravação.

O ensaio de carregamento dinâmico tem como principal objetivo a determinação da resistência mobilizada do conjunto solo-estaca, tensões máximas de compressão e tração no material da estaca durante aos golpes; informações sobre a integridade da estaca como localização do dano e sua estimativa de sua intensidade, energia efetiva transferida para estaca, permitindo estimar a eficiência do sistema de cravação; deslocamento máximo da estaca durante o golpe, velocidade de aplicação de golpe e, a estimativa da altura de queda para martelos e na quantificação de algumas propriedades do solo.

O ensaio de carregamento dinâmico, é mais apropriado para as estacas cravadas, mas pode ser executada também em estacas escavadas, ou moldadas in loco, embora seja necessária toda a mobilização de equipamentos de grande porte, como bate estacas, para que se possa provocar deslocamentos suficientes para mobilizar as resistências de ponta e lateral e, assegurar que as tensões dinâmicas não danifiquem a integridade estrutural do elemento (Aoki,1997).

O nome do equipamento mais utilizado atualmente para realização deste ensaio é o PDA (Pile Driving Analyzer) desenvolvido pelo Pile Driving Institute, especializado em estacas cravadas, este equipamento PDA são utilizados para o registro e processamento dos sinais de Força e Velocidade no topo da estaca, logo para uma melhor avaliação da resistência da estaca, devem ser submetidos a

análises CAPWAP. A aplicação das medições dinâmicas serão tratadas no item 2.5 com mais detalhe.

2.4.2. Equação unidimensional da Onda

A necessidade crescente da utilização de estacas com capacidade de cargas cada vez maiores, propiciou o desenvolvimento de novos métodos de controle e análise da cravação, principalmente com o advento dos computadores digitais que tornaram possível a solução discreta da equação de onda. Ressalta-se o avanço qualitativo da equação de onda em relação às fórmulas dinâmicas, que tratavam à cravação como um impacto Newtoniano considerando dois corpos rígidos, enquanto que a equação de onda “propaga” este efeito ao longo as estaca.

Na realidade a “equação de onda” foi originalmente utilizada para estimativa de resistência mobilizada e previsão das tensões na estaca. Basicamente, a cravação de uma estaca pode ser avaliada através de dois tipos de modelos: o primeiro modelo simplificado, representado pelo impacto de duas barras; e o segundo, mais elaborado, do tipo proposto por Smith (1960), isto é, onde a estaca é discretizada em elementos de massas e molas.

Este modelo simplificado, sobre o qual se estuda a superposição de ondas de tensão, permite uma melhor visualização dos seus movimentos e, portanto, uma maior facilidade na compressão de fenômeno. Desta forma a partir deste modelo são apresentadas as ideias básicas sobre as quais se fundamentam a instrumentação dinâmica de estacas a sua cravação. O modelo de Smith é um algoritmo de solução por diferenças finitas onde a estaca é representada por uma serie de massas e molas.

A equação de onda foi desenvolvida por Saint-Venant por volta de 1866, para o estudo do impacto sobre a extremidade de uma barra, sua aplicação na cravação de estacas constitui-se em grande avanço qualitativo em relação ao uso das fórmulas dinâmicas, pois, fisicamente a cravação de uma estaca esta muito mais relacionada ao fenômeno da transmissão de ondas de tensão através da estaca do que ao impacto puro e simples entre dois corpos.

De esta forma o fenômeno de propagação de onda é um tanto complexo, bem como sua formulação. O desenvolvimento de este capítulo é ressaltar os

aspectos mais práticos de sua aplicação, os tratamentos matemáticos são abordados de forma simplificada, para mais complexas condições de contorno.

A formação da onda que se propaga na esta estaca durante a sua cravação é devida ao impacto do martelo como se observa na figura (2.7).

A parte superior da estaca é comprimida e as partículas do material da estaca são aceleradas. A onda de tensão propaga-se através da estaca com uma velocidade “ c ”, que depende do meio, portanto das características do material da estaca. Em um curto intervalo de tempo “ Δt ” depois do impacto do martelo no topo da estaca, seu primeiro elemento “ Δx ” é comprimido, originando sua deformação, ver figura (2.7).

Essa deformação provoca num tempo posterior, uma força de compressão que atua no elemento seguinte, que é comprimido e se deforma, deformando também os elementos subsequentes.

Esse efeito em cadeia dos elementos da estaca que se deforma pela ação da força “ F ”, causa uma onda de compressão que se propaga com velocidade “ c ”.

Esta velocidade de “ v ” das partículas não deve ser confundida com a velocidade de propagação da onda “ c ”, que representa a velocidade de transmissão das tensões de uma zona para outra, e que depende fundamentalmente do nível de tensão imposto.

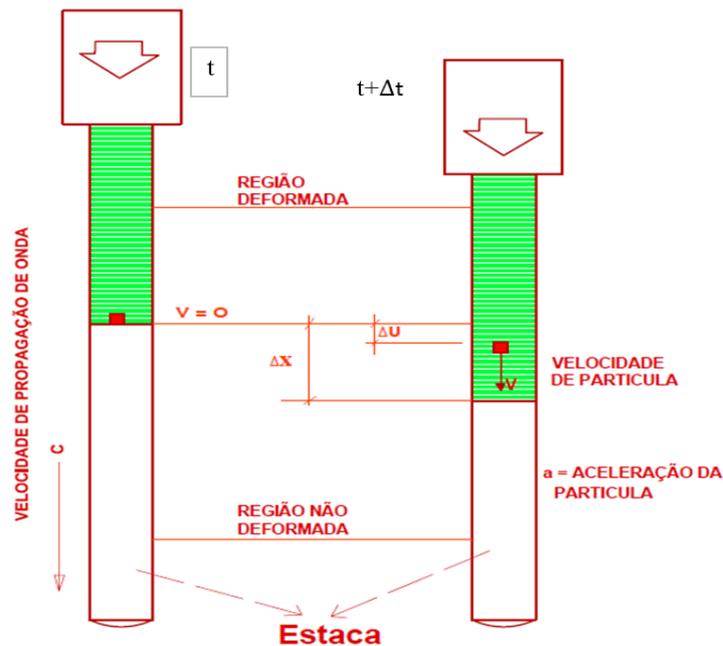


Figura 2.7 - Determinação da proporcionalidade entre a velocidade de partícula ‘ v ’ e a propagação de onda ‘ c ’ (Goble et al., 1986).

2.4.2.1. Proporcionalidade

Na figura (2.7) se mostra um procedimento simples da proporcionalidade entre a velocidade de partícula ‘v’ e a velocidade de propagação da onda ‘c’.

$$C = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.4.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (2.4.2)$$

$$v = \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (2.4.3)$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2.4.4)$$

Combinando as equações (2.4.1), (2.4.2) e (2.4.3), temos:

$$\varepsilon = \frac{v}{c} \quad (2.4.5)$$

Considerando-se um elemento da estaca com comprimento (Δx), área da seção transversal (A), massa específica (ρ), módulo de elasticidade do material da estaca, tem-se pela lei de Hooke, a relação:

$$\sigma = \varepsilon.E \rightarrow F = \varepsilon.E.A \quad (2.4.6)$$

Das equações (2.4.5) e (2.4.6), obtém-se:

$$F = \frac{E.A.V}{C} \quad (2.4.7)$$

O fator de proporcionalidade entre a força e a velocidade da equação (2.4.7) é comumente denominado impedância “Z” da estaca, a impedância também é chamada rigidez dinâmica, porque define a força de reação na estaca, para uma mudança da velocidade das partículas, que pode ser representada das seguintes formas:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{E.A}{c} \dots\dots\dots a \\ Z &= A.\rho.c \dots\dots\dots b \\ Z &= \frac{m.c}{L} \dots\dots\dots c \end{aligned} \quad (2.4.8)$$

Onde: “L” comprimento da estaca, “m” massa da estaca “ ρ ” peso específica da estaca.

Das equações (2.4.8a) e (2.4.7) temos:

$$F = ZV \quad (2.4.9)$$

2.4.2.2.

Velocidade de propagação de onda “c” e velocidade de partícula “v”

Aplicando a segunda lei de Newton, $F = m.a$, no trecho de comprimento Δx , na figura (2.7), obtém-se:

$$F = m.a = \rho.A.\Delta x. \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2.4.10)$$

Comparando as equações (2.4.10) e (2.4.7) e considerando-se o elemento em repouso (ou seja, “ $v_{\text{inicial}} = 0$ ”), tem-se que $\Delta v = v$, obtém-se:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.4.11)$$

Concluí-se que a velocidade de propagação de onda “c” é uma constante que depende apenas das propriedades do material da estaca.

Por outra parte combinado as equações (2.4.5), (2.4.6) e (2.4.11), temos:

$$v = \frac{\sigma}{\sqrt{E.\rho}} \quad (2.4.12)$$

Observa-se que, quando a velocidade de propagação da onda “c” é independente do valor da tensão aplicada (depende apenas das propriedades do meio), a velocidade de partícula é proporcional à tensão “ σ ”.

2.4.2.3.

Equação geral da onda

Considerando-se um segmento de estaca conforme à figura (2.8) e segundo às leis de Newton e de Hooke, pelo equilíbrio dinâmico de um segmento da estaca

em qualquer instante, a propagação de onda pode ser expressa através de equação diferencial, tem-se.

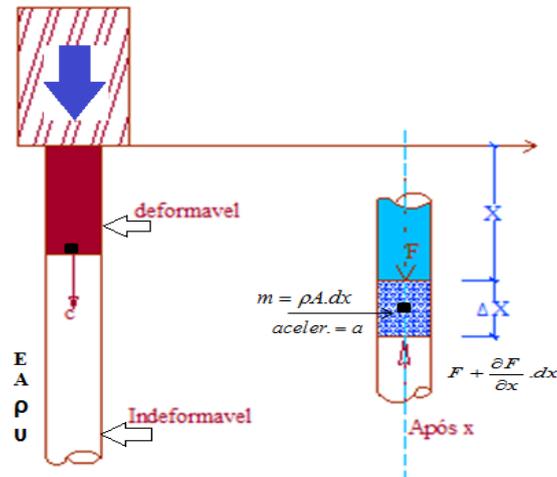


Figura 2.8 - Deformações de um elemento de estaca devido à propagação de onda (Niyama, 1983).

Considerando o equilíbrio na direção vertical da figura (2.8) temos:

$$F - \left(F + \frac{\partial F}{\partial x} \cdot dx \right) = m \cdot a$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} \cdot dx = -\rho \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.4.13)$$

Para um material linear elástico a força "F", sai da lei de Hooke que é uma força compressiva.

$$F = -\varepsilon \cdot A \cdot E = -A \cdot E \cdot \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = -A \cdot E \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.4.14)$$

Combinando estas equações (2.4.13) e (2.4.14), temos:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.4.15)$$

A equação acima é a equação geral do movimento da onda unidimensional, conhecida como equação de onda:

A derivação da equação unidimensional (2.4.15) pode ser feita tomando algumas condições de validade desta teoria:

- A estaca pode ser considerada como uma haste esbelta, de seção transversal constante e o material isotrópico;
- A força axial é uniformemente distribuída sobre a seção transversal;
- Os efeitos laterais de inercia do solo são desprezíveis.

A solução da equação de onda, foi resolvida por D’alembert (1747), quem mostrou que o deslocamento “u” desde o ponto “x” numa barra, para um tempo “t” pode ser expressado como a soma de qualquer das funções f(x,t) e g(x,t) dado por :

$$u_{(x,t)} = f_{(x-ct)} + g_{(x+ct)} \quad (2.4.16)$$

Onde as funções “f” e “g” representam duas ondas de deslocamento propagando-se em sentidos opostos, com velocidade de propagação “c” ao longo do eixo da estaca, onde permanecem válidos os efeitos de superposição. A forma de onda depende das condições iniciais ver figura (2.9a e 2.9b).

Por tanto si há dois ondas que passam através de cada outra, a resultante destas ondas é uma simples soma aritmética.

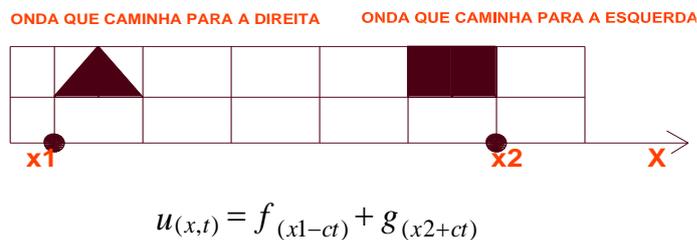


Figura 2.9a - Comportamento das ondas no instante “t” (Timoshenko & Goodier, 1970).

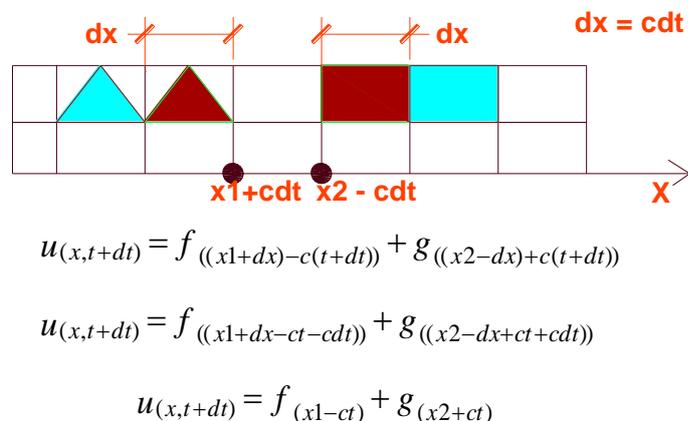


Figura 2.9b - Comportamento das ondas no instante “t+dt” (Timoshenko & Goodier, 1970).

Assim, observe-se que as ondas “f” e “g” apenas se deslocam em sentidos opostos no tempo, sem mudar de forma. Para facilitar a compressão o estudo de propagação destas ondas ao longo de uma barra, autores como Beringen et al. (1980) Skov,(1982), sugeriram a utilização de flechas indicativas do sentido de propagação das mesmas (ascendente ou descendente) em obediência a um determinado referencial. De esta forma a equação (2.4.16), pode ser representada:

$$u_{(x,t)} = f_{(x-ct)} + g_{(x+ct)} = u \downarrow + u \uparrow \quad (2.4.17)$$

A equação (2.4.17) representa o deslocamento total.

A partir da solução da equação (2.4.16) da equação diferencial chega-se, também, às funções força e velocidade de partícula ‘V’, assim:

$$\sigma_{(x,t)} = -E \cdot \frac{\partial u_{(x,t)}}{\partial x} \rightarrow F = -E.A \cdot \frac{\partial u_{(x,t)}}{\partial x} \quad (2.4.18)$$

$$F(x,t) = -E.A \left[\frac{\partial f(x-ct)}{\partial x} + \frac{\partial g(x+ct)}{\partial x} \right];$$

$$F = -E.A \left[\frac{\partial f(x-ct)}{\partial x} \cdot \frac{\partial(x-ct)}{\partial(x-ct)} + \frac{\partial g(x+ct)}{\partial x} \cdot \frac{\partial(x+ct)}{\partial(x+ct)} \right] = -E.A [f'(x-ct) + g'(x+ct)]$$

$$F(x,t) = -E.A [f'(x-ct) + g'(x+ct)] \quad (2.4.19)$$

$$V(x,t) = \frac{\partial u_{(x,t)}}{\partial t} = \frac{\partial f_{(x-ct)}}{\partial t} + \frac{\partial g_{(x+ct)}}{\partial t}$$

$$V(x,t) = \frac{\partial u_{(x,t)}}{\partial t} = \frac{\partial f_{(x-ct)}}{\partial t} \cdot \frac{\partial(x-ct)}{\partial(x-ct)} + \frac{\partial g_{(x+ct)}}{\partial t} \cdot \frac{\partial(x+ct)}{\partial(x+ct)} = -cf'(x-ct) + cg'(x+ct)$$

$$V(x,t) = -cf'(x-ct) + cg'(x+ct) \quad (2.4.20)$$

Considerando uma onda em movimento para baixo na estaca (descendente) temos:

$$F(x,t) = -E.A [f'(x-ct)] \quad (2.4.21)$$

$$V(x,t) = -cf'(x-ct) \quad (2.4.22)$$

Combinando as equações de acima (2.4.21) e (2.4.22), teremos:

$$F(x,t) = \frac{A.E}{C} V(x,t) = Z.V(x,t) \quad (2.4.21A)$$

Para uma onda de compressão a velocidade de partícula $V(x,t)$ trafega na mesma direção com a velocidade de propagação de onda “c”. Em todo caso uma onda de tração a velocidade de partícula viaja na direção oposta, onde:

A força “F” e velocidade “V” de uma onda de compressão ambas são positivas; entanto em uma onda de tração a força “F” e velocidade “V” são negativas.

A relação entre força e velocidade de partícula de uma onda ascendente, seguiu o mesmo procedimento que as ondas ascendentes:

$$F(x,t) = -E.A[g'(x+ct)] \quad (2.4.23)$$

$$V(x,t) = cg'(x+ct) \quad (2.4.24)$$

Combinando estas equações obtemos:

$$F(x,t) = \frac{-E.A}{C}.V(x,t) = -Z.V(x,t) \quad (2.4.25)$$

Estas equações indicadas para esse movimento de ondas ascendentes (ondas refletidas) a força “F” e velocidade de partícula “V” em uma onda de tração (refletida) são negativas e positivas respectivamente, e numa compressão “F” é positiva e “V” é negativa.

Para a simplificação durante as análises, a notação das flechas iniciado por Janz (1976) será usado para distinguir entre uma onda descendente e uma onda ascendente por meio de flechas, assim:

Força total:

$$\left. \begin{array}{l} F = F \downarrow + F \uparrow \dots\dots\dots a \\ F \downarrow = Z.V \downarrow \dots\dots\dots b \\ F \uparrow = -Z.V \uparrow \dots\dots\dots c \\ V = V \downarrow + V \uparrow \dots\dots\dots d \end{array} \right\} \quad (2.4.26)$$

Portanto, a força e a velocidade resultantes podem ser dadas por:

$$F = F \downarrow + F \uparrow = Z(V \downarrow - V \uparrow) \quad (2.4.27)$$

$$V = V \downarrow + V \uparrow = \frac{1}{Z}(F \downarrow - F \uparrow) \quad (2.4.28)$$

Quando uma estaca é instrumentada, obviamente os instrumentos só medem os valores totais de força ou de velocidade. Por outro lado, as ondas ascendentes (originada da reflexão) é que conduzem informações dos efeitos externos (e internos se houver) que provocam justamente estas reflexões. Desta forma, novos arranjos entre as expressões (2.4.26 ‘b’ y ‘c’), permitem identificar isoladamente

as amplitudes das ondas descendentes e ascendentes, através das equações que seguem:

$$\left. \begin{aligned} F \downarrow &= \frac{F + ZV}{2} \dots\dots\dots a \\ F \uparrow &= \frac{F - ZV}{2} \dots\dots\dots b \end{aligned} \right\} \quad (2.4.29)$$

As ondas ascendentes originadas da reflexão podem ser vistas como sendo formadas para possibilitar o comprimento das condições de contorno, tais como: resistência de ponta, atrito lateral e mudança da impedância da estaca.

2.4.2.4. Influencia das condições de contorno

Para a interpretação das ondas ascendentes, ou refletidas são vistos a seguir, os efeitos das condições de contorno da estaca, tais como resistência de ponta, atrito lateral e mudança na impedância da estaca (variação da área de sua seção transversal, por exemplo).

a. Estaca com ponta livre ver figura (2.10a)

Neste caso a resistência de ponta é nula $R_p = 0$;

$$F = F \downarrow + F \uparrow = 0$$

$$V = V \downarrow + V \uparrow \rightarrow V = \frac{F \downarrow}{Z} + \frac{-F \uparrow}{Z} = \frac{1}{Z} (F \downarrow - F \uparrow) = \frac{2F \downarrow}{Z}$$

$$F \downarrow = -F \uparrow$$

Resolvendo as equações temos:

$$V = 2V \downarrow$$

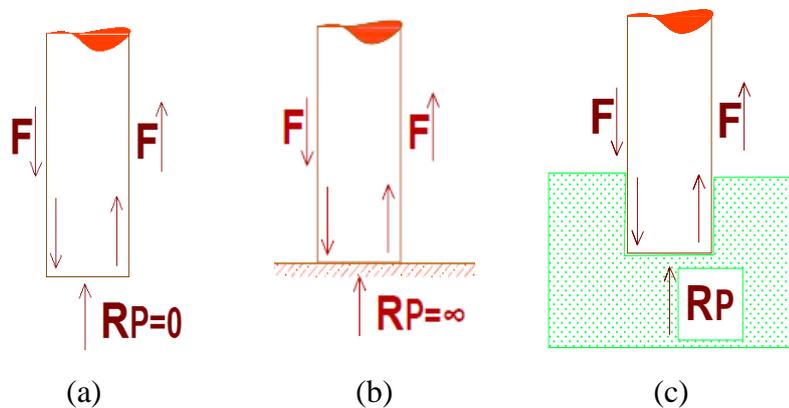


Figura 2.10 - Estaca (a) com ponta livre, (b) com ponta fixa, (c) com resistência de ponta.

Conclui-se, desta forma, já visto anteriormente que a onda de compressão chegando na extremidade inferior da estaca, reflete-se como onda de tração e, para manter o equilíbrio a extremidade da estaca acelera-se de novo e a velocidade reflete-se com o mesmo sinal, duplicando a amplitude da onda incidente (Niyama, 1983). Convém ressaltar que a superposição ocorre apenas durante um intervalo de tempo correspondente à duração do pulso.

b. Estaca com ponta Fixa (ou engastada), ver figura (2.10b)

Neste caso o deslocamento da ponta e, conseqüentemente, a velocidade são sempre nulos, tem-se, portanto, que:

$$\left. \begin{aligned} V &= V \downarrow + V \uparrow = 0 \rightarrow V \downarrow = -V \uparrow \\ F &= F \downarrow + F \uparrow = Z \cdot V \downarrow + (-Z \cdot V \uparrow) \end{aligned} \right\}$$

$$F = 2F \downarrow$$

Desta forma, a onda descendente, que é de compressão, chega à ponta refletindo-se também como onda de compressão. A velocidade reflete-se com sinal oposto, anulando-se nesta extremidade, a estaca “repica”.

Esta condição é satisfeita, desde que o apoio da ponta apresente um comportamento rígido plástico com uma resistência pelo menos igual a duas vezes a força incidente, de outra forma a estaca move-se, violando a condição de fixação (Janz, 1976; Nakao, 1981).

c. Estaca com resistência finita ver figura (2.10c)

Tem-se neste caso:

$$R_p = F \downarrow + F \uparrow \rightarrow F \uparrow = R_p - F \downarrow$$

$$V = V \downarrow + V \uparrow \rightarrow V = \frac{F \downarrow}{Z} + \frac{1}{Z} \cdot -(R_p - F \downarrow) = \frac{2F \downarrow}{Z} - \frac{R_p}{Z}$$

$$V_p = \frac{2F \downarrow - R_p}{Z} \quad (2.4.30)$$

Desta forma a velocidade na ponta pode ser calculada ou explicitada em função da amplitude da força incidente, da resistência de ponta e da impedância da estaca.

d. Estaca com atrito lateral, ver figura (2.11)

Considerando a condição de equilíbrio numa seção em que esteja atuando uma resistência de atrito lateral “ R_A ”, tem-se:

Por condição de equilíbrio:

$$F1 \downarrow + F1 \uparrow = F2 \downarrow + F2 \uparrow + RA,$$

E, por condição de continuidade:

$$V1 = V2 \rightarrow V1 \downarrow + V1 \uparrow = V2 \downarrow + V2 \uparrow$$

Resolvendo a equação de continuidade, temos:

$$\frac{F1 \downarrow}{Z1} + \left(\frac{-F1 \uparrow}{Z1} \right) = \frac{F2 \downarrow}{Z2} + \left(\frac{-F2 \uparrow}{Z2} \right)$$

Mas, como $Z_1 = Z_2$, então combinando as equações de equilíbrio e continuidade tem-se:

$$F1 \downarrow - F2 \downarrow = F2 \uparrow - F1 \uparrow + RA$$

$$F1 \downarrow - F2 \downarrow = -F1 \downarrow + F2 \downarrow + RA$$

$$2F1 \downarrow = 2F2 \downarrow + RA$$

Logo, temos:

$$\left. \begin{aligned} F2 \downarrow &= F1 \downarrow - \frac{RA}{2} \dots\dots\dots a \\ F1 \uparrow &= F2 \uparrow + \frac{RA}{2} \dots\dots\dots b \end{aligned} \right\} \quad (2.4.31)$$

Por tanto, a amplitude da força descendente é reduzida pela metade do valor da resistência de atrito lateral. Por outro lado, a amplitude da força refletida é aumentada do mesmo valor. Isto evidentemente aplica-se no caso da estaca estar com velocidade positiva, ou seja, num movimento para baixo. Caso contrário, o sinal da resistência “ R_A ” inverte-se.

Através de um registro continuo no tempo, das grandezas de força e velocidade num ponto da estaca junto à cabeça, o resultado seria um par de curvas como é apresentado na figura (2.12). Nesta figura pode-se observar que é mantida a proporcionalidade entre a força e velocidade através da impedância “ Z ”, até que comecem a chegar as ondas refletidas de cada uma das singularidades, no caso representada por atrito lateral unitário ‘ RA_i ’. É fácil entender que as duas curvas começam a afastar-se e a distância entre elas, medidas na vertical, será o somatório dos atritos laterais até uma posição qualquer.

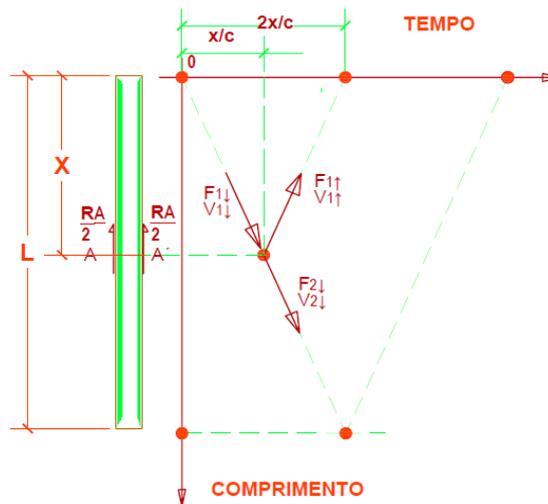


Figura 2.11 - Estaca com atrito lateral e diagrama de trajetórias de onda descendentes e ascendentes.

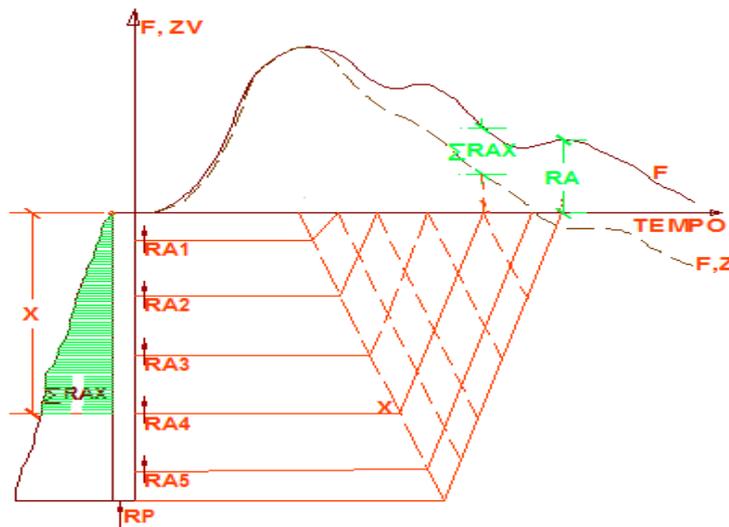


Figura 2.12 - Registro típico de curvas de Força e Velocidade x Impedância (Gonçalves, 1996).

2.4.2.5. Influência da variação de impedância da estaca

Suponha uma estaca com certa discontinuidade a uma profundidade “x” de seu comprimento “L” figura (2.13) e que abaixo da seção “a-a” suas características estejam alteradas, de tal modo que os segmentos de acima e baixo podem ter uma impedância de “ Z_1 ” e “ Z_2 ” respectivamente.

Quando a onda de tensão inicial ($F1 \downarrow, V1 \downarrow$) chega à seção “a-a”, ela será parcialmente transmitida ($F2 \downarrow, V2 \downarrow$) e parcialmente refletida ($F1 \uparrow, V1 \uparrow$). As forças e velocidades estão em equilíbrio acima e abaixo da descontinuidade, logo:

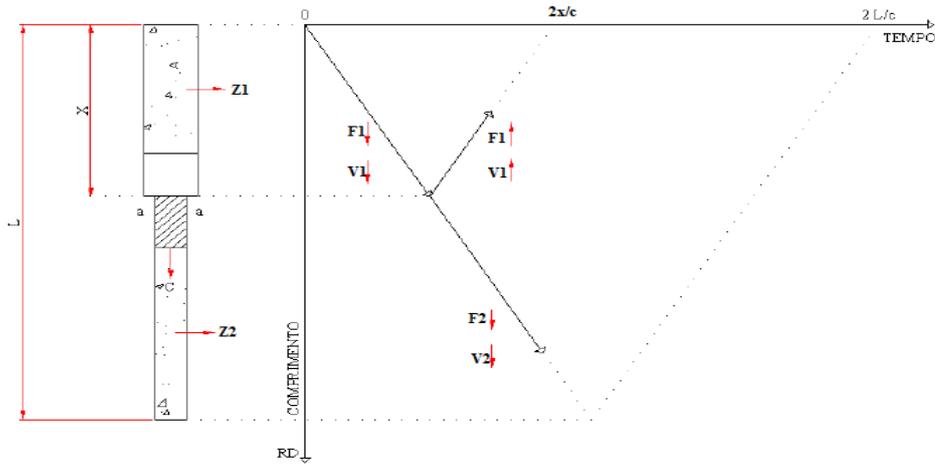


Figura 2.13 - Diagrama de trajetória de ondas (Niyama, 1983).

Equação de continuidade: ($V_1 = V_2$)

$$V = V1 \downarrow + V1 \uparrow = V2 \downarrow \quad (2.4.32)$$

Equação de equilíbrio

$$F = F1 \downarrow + F1 \uparrow = F2 \downarrow \quad (2.4.33)$$

$$Z1.V1 \downarrow - Z1.V1 \uparrow = Z2.V2 \downarrow$$

$$Z1.(V1 \downarrow - (V2 \downarrow - V1 \downarrow)) = Z2.V2 \downarrow$$

Resolvendo simultaneamente as equações (2.4.32) e (2.4.33), obtém-se a força e a velocidade transmitida, representada pelas equações:

$$\left. \begin{aligned} F2 \downarrow &= \frac{2.Z2}{Z1 + Z2} . F1 \downarrow \dots \dots \dots a \\ V2 \downarrow &= \frac{2.Z1}{Z1 + Z2} . V1 \downarrow \dots \dots \dots b \end{aligned} \right\} \quad (2.4.34)$$

Substituindo a equação (2.4.34a) na equação (2.4.33), e a equação (2.4.34b) na equação (2.4.32) a força e a velocidade refletida são respectivamente:

$$\left. \begin{aligned} F1 \uparrow &= \frac{Z2 - Z1}{Z1 + Z2} . F1 \downarrow \dots \dots \dots a \\ V1 \uparrow &= \frac{Z1 - Z2}{Z1 + Z2} . V1 \downarrow \dots \dots \dots b \end{aligned} \right\} \quad (2.4.35)$$

Há três condições extremas de variação de impedância “ $Z_1 = Z_2$ ”, “ $Z_1 > Z_2$ ” e “ $Z_1 < Z_2$ ”.

- Para “ $Z_1 = Z_2$ ”, não há qualquer mudança na onda transmitida
- Para “ $Z_1 > Z_2$ ”, a onda de tração refletida será sobreposta à onda inicial, fazendo com que haja uma redução da força e um aumento da velocidade no topo da haste, depois do tempo ‘ $t = 2x/c$ ’, estas variações de impedância que geram ondas de tração refletidas são geralmente associadas à falha e emendas de luvas de hastes de sondagem, se a falha for grande, a onda de compressão será totalmente refletida, caracterizando uma ruptura estrutural da seção.
- Para o caso “ $Z_1 < Z_2$ ”, a onda refletida será de compressão, ocasionando uma redução na velocidade e um aumento da força medida no topo da estaca, conforme ilustra a figura (2.13). Uma mudança súbita na espessura da parede da estaca ou um efeito de ‘bucha’(plug) podem ser responsáveis pelo surgimento de ondas refletidas de compressão.

Na tabela (2.8) são apresentados os resultados das ondas refletidas e podem ocorrer devido à descontinuidade, dependendo da relação “ Z_1 ” e “ Z_2 ”.

Tabela 2.8 - Ondas refletidas pela descontinuidade da haste (G. Bernardes, et al. 1989).

	$Z_1 = Z_2$	$Z_1 \gg Z_2$	$Z_1 \ll Z_2$
Onda Inicial →	$F_1 \downarrow$  $V_1 \downarrow$	$F_1 \downarrow$  $V_1 \downarrow$	$F_1 \downarrow$  $V_1 \downarrow$
Onda Refletida →	0  0	$F_1 \uparrow$  $V_1 \uparrow$	$F_1 \uparrow$  $V_1 \uparrow$
Onda Transmiltida →	$F_1 \downarrow$  $V_1 \downarrow$	$F_2 \downarrow$  $V_2 \downarrow$	$F_2 \downarrow$  $V_2 \downarrow$
$V_2 \downarrow = \frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot V_1 \downarrow$	$V_1 \downarrow$	$2 V_1 \downarrow$	0
$F_2 \downarrow = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot F_1 \downarrow$	$F_1 \downarrow$	0	$2 F_1 \downarrow$
$V_1 \uparrow = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot V_1 \downarrow$	0	$V_1 \downarrow$	$-V_1 \downarrow$
$F_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot F_1 \downarrow$	0	$-F_1 \downarrow$	$F_1 \downarrow$
Onda Refletida →	0	Tracao	Compressao

2.4.3. Modelo de Smith

Uma solução da equação de onda, através do método de diferenças finitas, foi apresentada por Smith em 1960, que permite avaliar a resistência última, as tensões, a velocidade da onda, as acelerações e os deslocamentos nas diversas seções da estaca, em cada intervalo de tempo considerado.

Utilizou-se um dispositivo na qual a estaca e o sistema de cravação são representados por um conjunto de massas e molas, capaz de simular o deslocamento de uma onda de tensão longitudinal causada pelo impacto do martelo. A reação imposta pelo solo é composta por um conjunto de molas e amortecedores, como mostra na figura (2.14a). No modelo de Smith (1960), o martelo e o capacete, por serem objetos curtos, pesados e rígidos, são para efeito de análise simulado por pesos individuais sem elasticidade. O cepo e o coxim são representados por molas sem peso, podendo ter ou não um comportamento elástico.

A resistência oferecida pelo solo à penetração da estaca, tanto pela ponta como pelo atrito lateral, possui uma componente estática e uma dinâmica. Smith (1960) propôs um modelo simples para a representação da resistência ‘ R_t ’ no processo de cravação de uma estaca, conforme à figura (2.14b).

Este modelo proposto por Smith (1960) “modelo interação solo-estaca” quantifica os mecanismos de reação do solo mobilizados a partir de um modelo “elasto-visco-plástico” de reação. Neste modelo as deformações oriundas da força de reação são apresentadas por um bloco de atrito em serie com uma mola, ambos em paralelo com um amortecedor viscoso. O bloco de atrito representa as deformações plásticas que ocorrem na massa de solo, a mola às deformações elásticas e o amortecedor, o comportamento viscoso do mesmo.

Segundo Smith (1960) durante uma cravação de elemento, o solo produzira uma reação “ R_t ” proveniente da soma de sua resistência estática “ R_E ” e resistência dinâmica “ R_d ”.

$$R_t = R_E + R_d \quad (2.4.36)$$

A parcela estática ‘ R_E ’ é caracterizada pelo comportamento “elasto-plástico” do solo, ou seja, o solo sofre deformações elásticas até atingir sua carga

de ruptura “ R_{us} ”. Neste nível de carregamento, o solo tem uma deformação denominada “Quake-Q”. Para níveis de maior carregamento o solo deforma-se plasticamente. Este comportamento é caracterizado pela declividade da reta que apresenta a rigidez do sistema estaca-solo (K) ver figura (2.15).

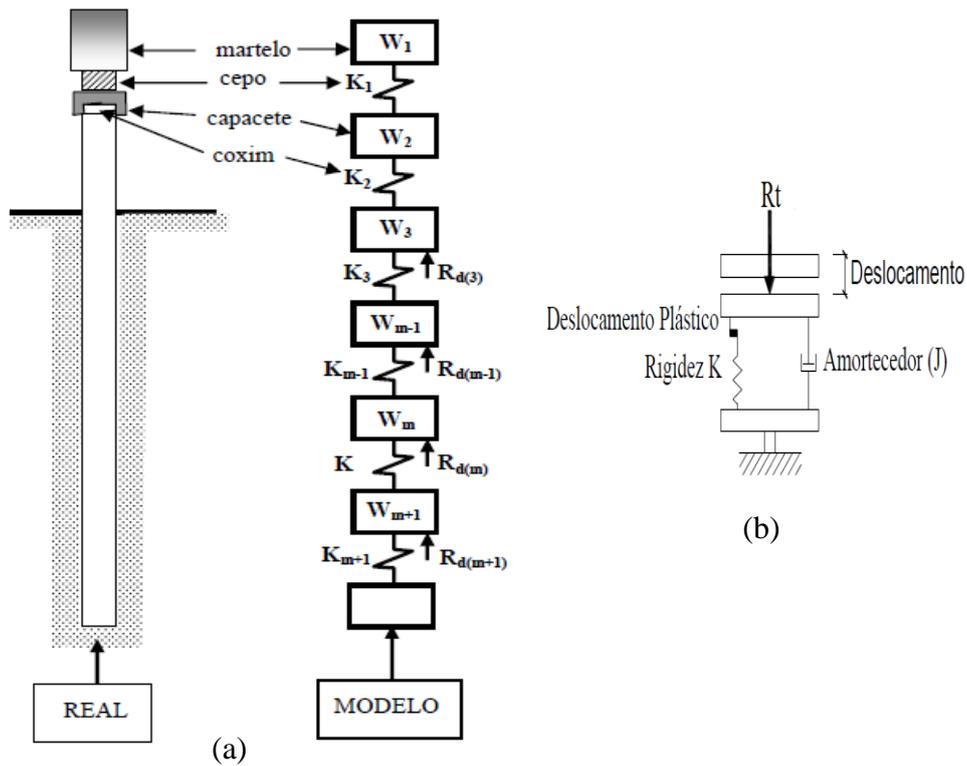


Figura 2.14 - (a) Representação do modelo da estaca e do sistema de cravação, (b) modelo para representação da resistência do solo (Smith, 1960).

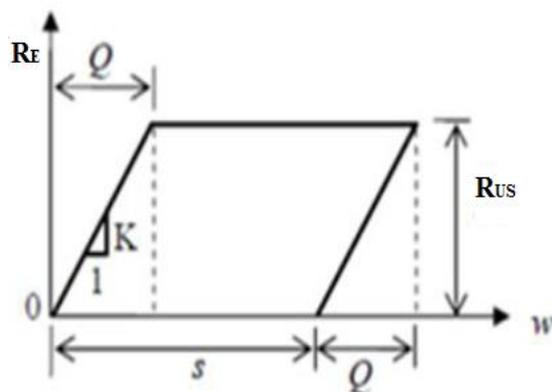


Figura 2.15 - Parcela estática da reação do solo (Smith, 1960).

$$K = \frac{R_E}{w} = \frac{R_{us}}{Q} \quad (2.4.37)$$

Segundo Smith (1960), a parcela dinâmica “Rd” de natureza viscosa, é admitida como proporcional à velocidade do elemento da estaca e à resistência estática “R_E”, conforme mostra a figura (2.16), onde “J_{smith}” é o coeficiente de amortecimento proposto por Smith (1960).

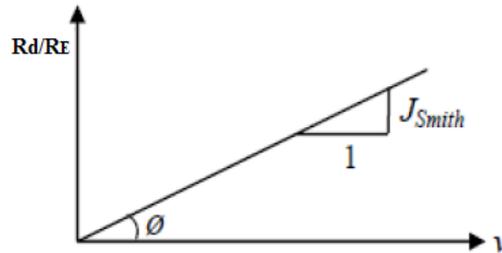


Figura 2.16 - Parcela dinâmica de reação (Smith, 1960).

Da figura (2.16), tem-se:

$$\text{tag} \phi = J_{Smith} = \frac{Rd}{R_E \cdot v} \rightarrow Rd = R_E \cdot J_{Smith} \cdot v \quad (2.4.38)$$

Devido à natureza dinâmica do carregamento ao qual o solo é submetido, a sua reação terá uma componente viscosa e inercial. Smith (1960) considera que a reação viscosa idealizada por Smith, é linearmente dependente da força de reação estática mobilizada e da velocidade de penetração da estaca no solo. A parcela viscosa de reação é quantificada pela resistência estática mobilizada “R_E” multiplicado pelo coeficiente “J_{Smith}” denominado “damping de Smith” e pela velocidade de penetração da estaca “v”.

$$Rd = R_E \cdot J_{Smith} \cdot v \quad (2.4.39)$$

Inserindo as equações (2.4.37) e (2.4.39) na equação (2.4.36), temos:

$$R_t = R_E + R_d = K \cdot w + K \cdot w \cdot J_{Smith} \cdot v$$

$$R_t = \frac{R_{us}}{Q} \cdot w \cdot (1 + J_{Smith} \cdot v), \text{ para } : w < Q \quad (2.4.40)$$

$$R_t = R_{us} \cdot (1 + J_{Smith} \cdot v), \text{ para } : w \geq Q \quad (2.4.41)$$

As equações de acima representam a reação dinâmica mobilizada durante a cravação dinâmica de elementos no solo (i.e. amostradores, estaca, etc.). A reação carga-deslocamento durante o passagem da onda de tensão é representada pelo diagrama OABCDEF da figura (2.17) para o atrito lateral e pelo diagrama OABC para a reação da ponta.

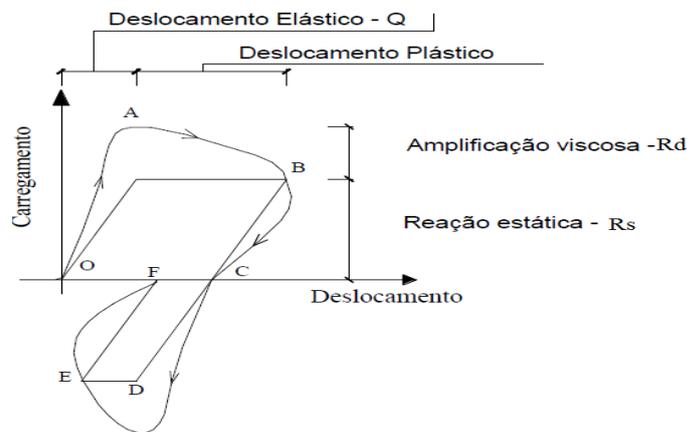


Figura 2.17 - Relação carga-deslocamento idealizado por Smith (1960)-Apud Poulos & Davis (1980).

Segundo Smith (1960) o fator de amortecimento “ J_{Smith} ” é definido como o parâmetro que relaciona a resistência dinâmica com a resistência estática do solo. O valor para o fator de amortecimento do solo de ponta (J_p) é estabelecido por Smith igual a 0.5seg/m, para qualquer tipo de solo. E propôs que o fator de amortecimento para o solo lateral (J_m) é calculado pela seguinte expressão:

$$J_m = \frac{J_p}{3} \quad (2.4.42)$$

2.5. Aplicações das medições dinâmicas

2.5.1. Introdução

Vários pesquisadores a partir de 1938 iniciaram medições dinâmicas utilizando-se das ferramentas e técnicas disponíveis em cada época, até os dias atuais em diversos países do mundo. Entretanto, o programa mais extenso e conhecido foi desenvolvido no atual “Case Western Research University, Ohio, USA”, iniciado em 1964 (Goble et al., 1980). Deste programa resultou a técnica de instrumentação mais utilizada em todo o mundo na atualidade, sobre a qual esta baseada o conceito de prova de carga dinâmica, no sentido mais amplo (Niyama, 1988).

Assim, neste trabalho se falará sobre ao conjunto de técnicas de instrumentação desenvolvidas pela equipe de “Case Western”. Ademais serão avaliados os resultados desta instrumentação. Este fato, no entanto, não significa que esta instrumentação seja a única em uso, pelo contrario, varias entidades e pesquisadores tem desenvolvidos equipamentos próprios ou implementando esta técnica desenvolvida.

2.5.2. Medições dinâmicas dos sinais obtidas pelo PDA

Glambille et al., (1938) apud VULCANHAMMER.NET (2007) começou com a instrumentação da cabeça da estaca no momento da cravação, o qual constitui a primeira utilização dos sinais capturados em campo para a determinação da resistência mobilizada das estacas, trabalho pelo qual pode ser considerado como “Pai” das medições dinâmicas.

A partir dos anos 1960, Goble fundou a Pile Dynamic, Inc. (PDI), a companhia que fabrica, entre outras coisas, o PDA (Pile Driver Analyzer) e por outro lado ele com outros sócios também fundou a “Goble Rausche Likins & Associados” GRL. A PDI gradualmente melhorou a tecnologia do PDA, sempre utilizando os últimos avanços na tecnologia eletrônica e de computadores. Além disso, novos equipamentos foram desenvolvidos e introduzidos no mercado.

A “GRL” por outro lado, desenvolveu métodos e “softwares” para a análise dos sinais obtidos. Concebido inicialmente como um método para estacas cravadas, o PDA foi gradualmente sendo introduzido também para a medição da resistência mobilizada em estacas moldadas “in loco” (CAPWAP, manual, 2006)

Para Hanningan et al. (1998), as análises dinâmicas baseadas em sinais de cravação com ajuda do PDA, objetivam a obtenção:

- a. Resistência mobilizada da estaca na ocasião do ensaio. Para levar em consideração os efeitos de variação da resistência com o tempo, as medições são feitas durante uma recravação da estaca.
- b. Das tensões dinâmicas durante a cravação (ou recravação) da estaca. Para diminuir a possibilidade do dano durante sua instalação ou recravação, é importante que as tensões na estaca sejam mantidas dentro de limites aceitáveis. Em estacas de concreto, as tensões de tração são também importantes.
- c. Da integridade da estaca, que frequentemente deve ser verificada durante e após a instalação ou execução da mesma.
- d. Do desempenho do martelo utilizado na cravação, dado importante para avaliar a produtividade e controle do estaqueamento.

Um equipamento tipo PDA, visa apresentar os sinais de força e velocidade no topo da estaca. A força é obtida por meio de sensores de deformação (ou transdutores de deformação) cujo sinal é multiplicado pelo módulo de elasticidade do material da estaca e, pela área da seção na região dos sensores. A velocidade é obtida a partir da integração do sinal de acelerômetro. São utilizados dois transdutores de cada tipo diametralmente opostos cujos sinais são enviados por cabos até PDA ver figura (2.18).

Ambos transdutores são fixados à estrutura por parafusos, colocados em uma seção situada pelo menos um diâmetro e meio como mínimo abaixo do topo da estaca (1.5D) para atingir a “equalização dos sinais” ou sair dos efeitos do impacto do martelo e para melhorar os sinais (manual do PDA, 2009), ver figura (2.19).

O PDA processa os sinais dos sensores e os envia a um conversor analógico-digital. O equipamento é dotado de um microcomputador. Os dados referentes aos parâmetros da estaca, sensibilidade dos sensores, solo, etc, são previamente inseridos pelo operador.

O programa interno lê os dados digitalizados dos sensores e obtém a média dos sinais de força e a média dos sinais de velocidade. É a partir de destes dois sinais que o PDA efetua os cálculos, utilizando o método CASE descrito posteriormente. Após cada golpe do martelo o PDA exibe os valores de interesse, e armazena os sinais obtidos.

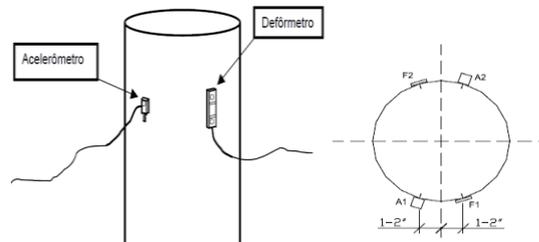


Figura 2.18 - Instrumentação com acelerômetros e transdutores de deformação.



Figura 2.19 - Posição dos sensores com respeito ao topo da estaca e analisador de sinal tipo PDA (Pile Driving Analyzer).

O PDA recomenda sobre o uso dos transdutores de deformação e acelerômetros. Os transdutores de deformação estão formados por “Strain Gauges” em uma configuração de ponte de “Wheastone” o Strain Gauges é um dispositivo semiconductor cuja resistência depende da deformação, mede a deformação colocada nessa ponte de Wheastone. Esse dispositivo (ver figura 2.19) gera uma tensão elétrica no cabo proporcional à deformação dessa região da estaca, então se esse ponto (ver em transdutores de deformação os pontos amarelos) afaste-se do outro ponto, tenho uma tração de sinal (-), no caso que se aproxima tem-se uma compressão de sinal (+).

No caso dos acelerômetros geram um sinal proporcional à aceleração que é desse ponto (nível de instrumentação). Os sinais de aceleração, por integração no tempo, fornecem a velocidade calculada na seção dos sensores, ao longo do tempo.

2.5.2.1. Método de CASE

O método de CASE objetiva a determinação da resistência estática mobilizada pelo golpe de um martelo sobre o topo de uma estaca. Trata-se de uma solução fechada da equação de onda, na qual são utilizados os sinais de força e velocidade registrados em uma determinada seção da estaca, nos instantes de tempo “ t_1 ” (instante em que o golpe atinge maior intensidade na seção dos sensores) e “ t_2 ” (instante em que a onda refletida na ponta da estaca retorna à seção instrumentada). O método utiliza, ainda, fator de amortecimento dinâmico do solo “ J_v ” e dos parâmetros da estaca, como o módulo de elasticidade (E), a área de seção transversal (A) e a velocidade de propagação de onda (c).

Segundo Goble et al., (1992) são assumidas as seguintes hipóteses simplificadoras: A estaca é considerada idealmente elástica, não oferecendo resistência à propagação da onda de tensão; o solo é admitido idealmente plástico e são desprezados os movimentos desse em relação à estaca. Dentro dessas hipóteses, é suposto que todas as reflexões de ondas são devidas unicamente à resistência do solo à penetração. O fundamento teórico do método envolve tanto o aspecto matemático relacionado com o desenvolvimento das fórmulas empregadas, como o processo de propagação de ondas, mais especificamente sobre o mecanismo de reflexão e superposição das ondas de tensão.

De acordo a NBR 13208, os sinais processados pelo método de CASE, devido ao golpe de martelo aplicado no topo da estaca, o método fornece as seguintes informações (Niyama, 1988):

- a. Resistência mobilizada na interface solo-estaca (parâmetro principal)
- b. Força máxima de impacto do martelo
- c. Energia máxima do golpe do martelo
- d. Eficiência do sistema de cravação
- e. Integridade estrutural e posição do dano

Analogamente para a trajetória P'Q' (considerando P' um ponto imediatamente acima da ponta da estaca), para a primeira onda descendente, tem-se:

$$F_{Q'} \uparrow = \frac{1}{2} \sum R_A \quad (2.5.3)$$

Onde:

$$\sum R_A = \int_0^D R_A(x).dx \quad (2.5.4)$$

Para o caso de uma estaca com resistência de ponta finita (ver item 2.4.2.4c), temos que a resistência de ponta será igual à onda de força descendente acrescida da onda de força ascendente, ou seja, $R_P = F_P \downarrow + F_P \uparrow \rightarrow F_P \uparrow = R_P - F_P \downarrow$.

Como:

$$F_P \downarrow = F_A \downarrow - \frac{1}{2} \sum R_A \quad (2.5.5)$$

Então combinando os valores de “R_p” e a expressão (2.5.5), tem-se:

$$F_P \uparrow = R_P - F_A \downarrow + \frac{1}{2} \sum R_A \quad (2.5.6)$$

Como a trajetória PQ há um acréscimo de $\frac{1}{2} \sum R_A$, tem-se:

$$F_Q \uparrow = F_P \uparrow + \frac{1}{2} \sum R_A = \underbrace{R_P - F_A \downarrow + \frac{1}{2} \sum R_A}_{F_P \uparrow} + \frac{1}{2} \sum R_A \quad (2.5.7)$$

$$F_A \downarrow + F_Q \uparrow = R_P + \sum R_A$$

A expressão (2.5.7) pode ser escrita em forma geral, lembrando as expressões $F \downarrow = \frac{F + ZV}{2}$ da equação (2.4.29a) e $F \uparrow = \frac{F - ZV}{2}$ (2.4.29b) em que o trem de ondas incidentes atinge o ponto “A”, nível da instrumentação, no instante “t₁”, em quanto a onda refletida em “Q”, é registrada no nível da instrumentação em “t₂ = t₁ + 2L/c”.

$$\frac{F_{t1} + Z.V_{t1}}{2} + \frac{F_{t2} - Z.V_{t2}}{2} = R_P + \sum R_A \quad (2.5.8)$$

$$R = R_P + \sum R_A = \frac{1}{2} \cdot \{(F_{t1} + F_{t2}) + Z(V_{t1} - V_{t2})\} \quad (2.5.9)$$

A equação de acima é a expressão básica do método de CASE, mostrando que a resistência total da estaca, “R”, pode ser determinada através dos registros

de força e velocidade medidos na cabeça da estaca, durante a passagem da onda de tensão.

Podemos determinar ainda a parcela dinâmica e estática da resistência. A parcela dinâmica é considerada, de forma simplificada proporcional à velocidade da ponta da estaca, “ v_p ”. Usa-se um parâmetro da resistência viscosa (J_v).

$$R_d = J_v \cdot v_p \quad (2.5.10)$$

Considerando-se que a força descendente (medida em “ t_1 ”) chega à ponta da estaca reduzida na sua magnitude de metade do atrito lateral, e lembrando-se da equação (2.4.30) e $v_p = \frac{1}{Z} \cdot (2 \cdot F \downarrow - R_p)$, obtemos:

$$v_p = \frac{1}{Z} \cdot \left\{ 2 \cdot \left[\frac{F_{t1} + Z V_{t1}}{2} - \frac{1}{2} \cdot \Sigma R_A \right] - R_p \right\}$$

$$v_p = \{ [F_{t1} + Z V_{t1}] - \Sigma R_A - R_p \} \cdot \frac{1}{Z}$$

$$v_p = \{ [F_{t1} + Z V_{t1}] - R \} \cdot \frac{1}{Z}$$

Para um instante “ t_1 ” não há ondas ascendentes provenientes de reflexões, havendo então uma proporcionalidade entre força e velocidade de partícula ($F = ZV$), podendo-se escrever:

$$v_p = 2 \cdot v_{t1} - \frac{R}{Z} = 2v_{t1} - \frac{c \cdot R}{E \cdot A} \quad (2.5.11)$$

O PDA, não utiliza o damping viscoso (J_v), prefere o uso do damping do CASE (J_c) que é o damping viscoso (amortecimento dinâmico), dividido pela impedância da estaca, assim se terá um parâmetro adimensional:

$$J_{Case} = J_c = \frac{J_v}{Z} \quad (2.5.12)$$

Então combinando a equação (2.5.10) com (2.5.12) temos:

$$R_d = J_c \cdot Z \cdot v_p \quad (2.5.13)$$

Substituindo a expressão (2.5.11) na equação (2.5.13), obtém-se:

$$R_d = J_c \cdot \frac{E \cdot A}{c} \cdot \left(2v_{t1} - \frac{c \cdot R}{E \cdot A} \right)$$

$$R_d = J_c \cdot (2F_{t1} - R) \quad (2.5.14)$$

A resistência estática é então obtida, pela diferença entre a resistência total (equação 2.5.9) e a dinâmica:

$$R_s = R - R_d = R - J_c \cdot (2 \cdot F_{t1} - R) \quad (2.5.15)$$

Reescrevendo a equação da acima, temos:

$$R_s = (1 - J_c) \left[F_{t1} + Z \cdot v_{t1} \right] \frac{1}{2} + (1 + J_c) \left[F_{t2} - Z \cdot v_{t2} \right] \frac{1}{2} \quad (2.5.16)$$

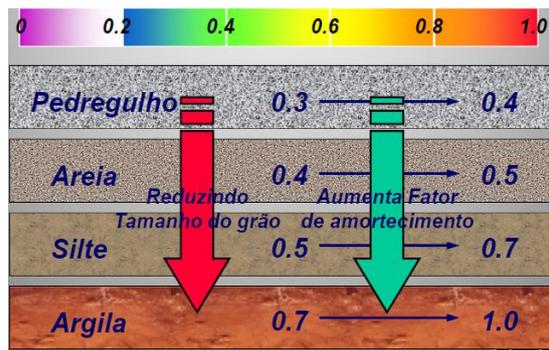
Os valores de $F_{t1}, F_{t2}, V_{t1}, V_{t2}$ utilizados nesta equação são obtidos através dos sensores de deformação específica e de velocidade (figura 2.21). No entanto, o “fator de amortecimento case” do solo é um parâmetro fornecido pelo operador, normalmente através de análises da sondagem, podendo-se, posteriormente, corrigi-lo pelo resultado da análise CAPWAP, como parâmetro Goble et al.(1996) sugere os valores de “damping ” apresentados na seguinte tabela (2.9).

Tabela 2.9 - Coeficiente de amortecimento dinâmico do método CASE (J_c) (Goble et al., 1996).

Classificação	J_c
Areia pura	0.10 a 0.15
Areia siltosa ou silte arenoso	0.15 a 0.25
Silte	0.25 a 0.40
Argila siltosa ou silte argiloso	0.40 a 0.70
Argila	0.70 a 1.00

Um maior valor do fator de amortecimento produz uma resistência mobilizada menor pelo método de CASE (mais conservador). Usando o método “RMX”, o fator de amortecimento “ J_c ” varia tipicamente entre 0.4 e 1.0 para solos coesivos e não coesivos respectivamente; quando a cravação é difícil, as velocidades são baixas, portanto há pouca resistência dinâmica. Nestes casos o método de CASE é menos sensível a variações do “ J_c ”.

O valor de fator de amortecimento CASE – valores para RMX, sugeridos pela PDI são apresentados na tabela (2.9a), fonte manual do PDA.

Tabela 2.9a - Valores de J_c , sugeridos pela PDI, fonte manual do PDA.

A componente dinâmica surge devido ao movimento da estaca em um meio viscoso. Segundo o método, ' R_d ' depende da velocidade de ponta, do valor do "damping" e da impedância, conforme se pode observar na equação (2.5.13). No entanto, se o deslocamento da ponta da estaca tende a zero, obviamente ' R_d ' também tenderá a zero. Neste caso, a resistência estática, obtida pela diferença entre as resistências total e a dinâmica, torna-se praticamente insensível ao valor de " J_c " (Rausche, 1985).

O método CASE apresenta duas variações, a primeira denominada "Standar CASE Method", onde o valor da resistência estática encontrada conhecida com o símbolo "RSP", considera o tempo " t_1 " no primeiro pico de velocidade ver figura (2.21), para um determinado valor de fator de amortecimento dinâmico "CASE". Este método é aplicável quando não se considera deformação elástica do solo, quer dizer para estacas de pouco deslocamento do solo e estacas com grandes resistências de fuste (Paikowsky et al., 1994; Hanningan et al., 1998; PDI, 2006).

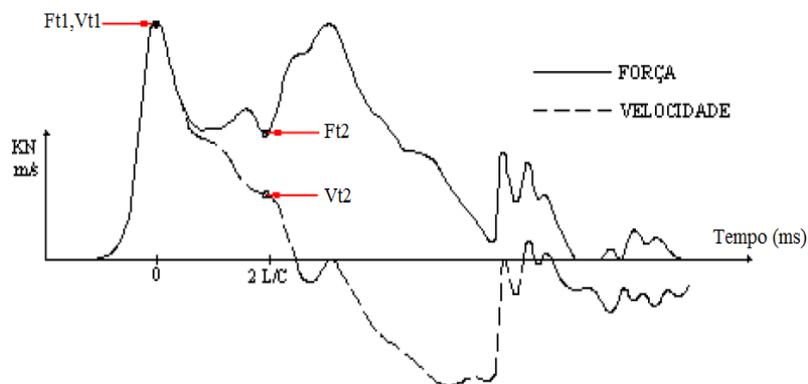


Figura 2.21 - Método de CASE, padrão (Hanningan et al., 1998).

A segunda variação do método original é denominada “Maximum CASE Method”, os valores das resistências estáticas encontradas, conhecida com o símbolo “RMX”, consideram o tempo “ t_1 ” deslocado do pico de velocidade, ver figura (2.22) condição identificada pelo programa a partir dos sinais de força e velocidade. Este método considera a máxima deformação elástica do solo, normalmente para resistências de ponta elevadas e em estacas de deslocamento com “Quakes” na ponta altos. Devido à demora da mobilização da resistência de ponta, esse método é válido para estacas maciças ou embuchado (Paikowsky et al., 1994; Hanningan et al., 1998; PDI, 2006).

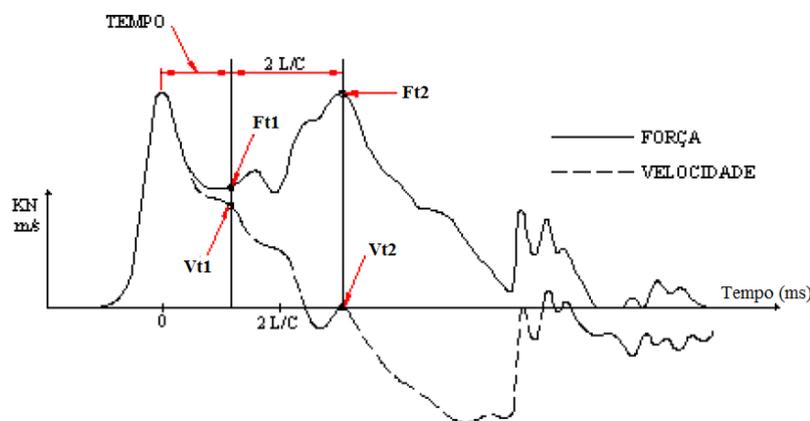


Figura 2.22 - Método CASE máximo (Hanningan et al., 1998).

Para Valverde et al. (2006) os valores de fator de amortecimento do solo usados para o método de CASE, não dependem unicamente do tipo do solo mas também dependeriam do sistema de cravação, e da própria inercia da estaca. Portanto, tal incerteza dos resultados, produto da utilização do método de CASE em obra podem ser confirmados utilizando algum procedimento de comparação de sinais que utiliza os sinais de força e velocidade medidas no PDA, p.e CAPWAP.

2.5.2.2. Método CAPWAP

Simultaneamente com o desenvolvimento de métodos simplificados para estimativa de resistência mobilizada das estacas, programas computacionais baseados no modelo original de Smith (1960), também foram intensamente desenvolvidos, principalmente aqueles referentes a estudos de cravabilidade. Para tal estudo atualmente existem inúmeros programas disponíveis (Goble et al.; 1980).

Goble et al (1970), Rausche (1970), apresentaram um método analítico semelhante ao desenvolvido para análise de equação de onda, chamado “CAPWAP” (CASE Pile Wave Analysis Program) que substitui o modelo da energia liberada pela queda do martelo na teoria da equação de onda (p.e. método GRLWEAP), pela utilização das medições feitas dos sinais de força e velocidade coletadas no topo da estaca (Hanningan et al., 1998; Rausch et al., 2000).

No CAPWAP uma estaca é simulada matematicamente pelo modelo mecânico de Smith (1960), o qual representa a interação solo-estaca, o modelo admitido para o solo possui para cada ponto três incógnitas agindo em um só trecho da discretização da estaca (Niyama, 1983):

- a. Resistência Mobilizada última (Rult.);
- b. Deformação elásticas máxima (Quake:Q) e,
- c. Constante de amortecimento (Damping : J);

O CAPWAP utiliza os registros da variação com o tempo de duas grandezas independentes, a força e velocidade na região de sensores, obtidos pela PDA os dados da estaca são conhecidos, e os parâmetros do solo inicialmente assumidos.

O programa resolve a equação de onda, utilizando como condição de contorno uma das variáveis (p.e. a velocidade) para obtenção da outra variável da qual se possui um registro (no mesmo exemplo a força). Os sinais medidos e calculados são comparados e o modelo de solo é iterativamente modificado, até que a mais perfeita coincidência possível dos dois seja alcançada. Para a solução da equação de onda é utilizado o algoritmo inicialmente proposto por Smith (1960).

Atualmente o CAPWAP, foi melhorado a partir do modelo mecânico de Smith (1960), com recursos adicionais da representação do conjunto iterativo

solo-estaca, tais como: a descontinuidade entre a ponta da estaca e o solo subjacente (Gap da ponta), considerações de amortecimento radial e análise de tensões residuais na estaca (Gonçalves, et al., 1999).

Todo o processo computacional do programa CAPWAP, pode ser visto no fluxograma seguinte.

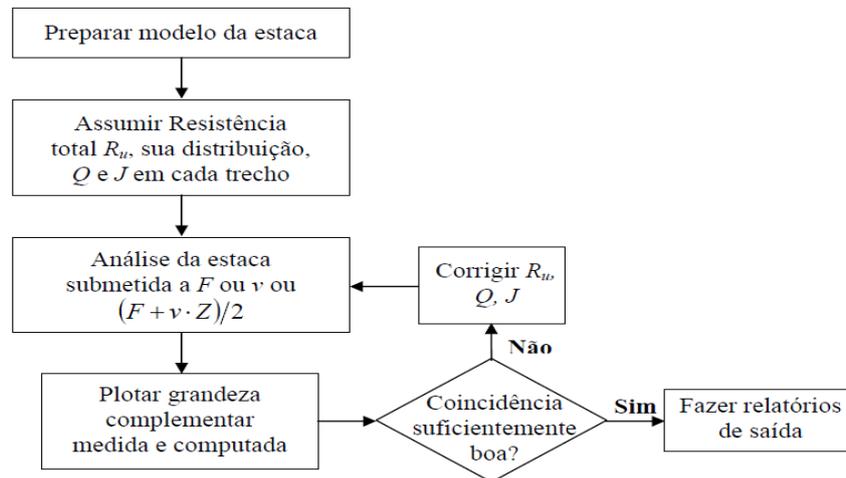


Figura 2.23 - Fluxograma do programa CAPWAP (Alves, 2004).

O procedimento do CAPWAP trabalha com um modelo conjunto estaca-solo (figura 2.25), onde assume valores de $R(\text{lateral})$ e $R(\text{ponta})$; aplica uma curva de medição $V(\text{medida})$ e calcula a força complementar $F(\text{calculada})$, depois faz o ajuste da $R(\text{lateral})$ e $R(\text{ponta})$ repetir o processo até ter um bom ajuste (processo iterativo), ver figura (2.24).

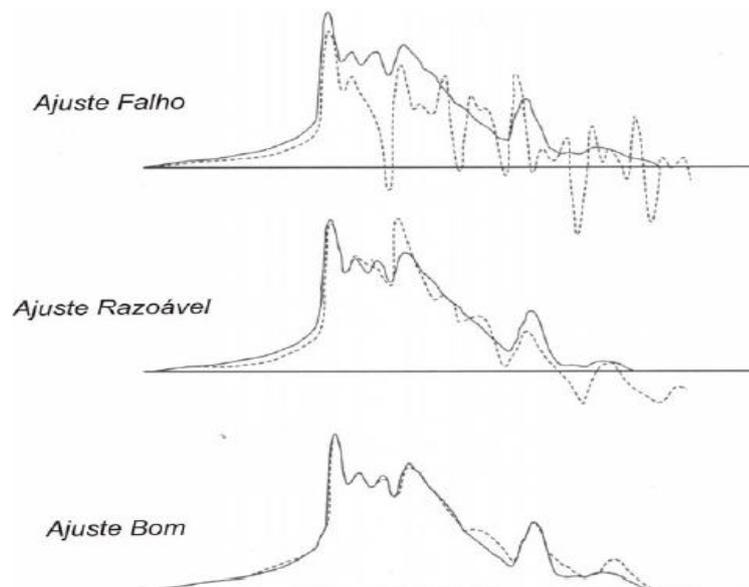


Figura 2.24 - Processo de interação de um ajuste falho, razoável e bom entre a força medida (linha cheia) e a força calculada linha tracejada no topo da estaca (Goble, 1986).

O modelo da combinação estaca-solo idealizado pelo programa é apresentada na figura (2.25).

A estaca é considerada como sendo uniforme, linearmente elástica e composta por uma série de segmentos interligados capazes de transmitir esforços de compressão e tração gerados durante a propagação da onda. Os comprimentos destes segmentos são calculados pelo programa de forma que o tempo de deslocamento da onda de tensão em cada segmento seja o mesmo. Desta forma, estacas com seção transversal constante, cujo material constituinte não apresenta variações de qualidade, possuem comprimentos dos segmentos iguais.

O solo é supostamente constituído por um conjunto de molas elasto-plásticas, cuja função é representar a parcela estática, e por um conjunto de amortecedores, os quais representam a resistência dinâmica. Cada conjunto de mola e amortecedor é idealmente apoiado sobre uma massa de solo a qual é suportada por um amortecedor fixo em solo rígido, conforme mostrado na figura (2.26).

E por padrão segundo o CAPWAP, coloca “um elemento do solo” por cada “dois elementos” de estaca, um exemplo se a estaca tem 10m de embutimento ele vai colocar “5” elementos de solo + 1 elemento na ponta, então vai colocar 6 elementos de solo em total, mas o operador poder mudar isso (só que é o padrão recomendado pela CAPWAP).

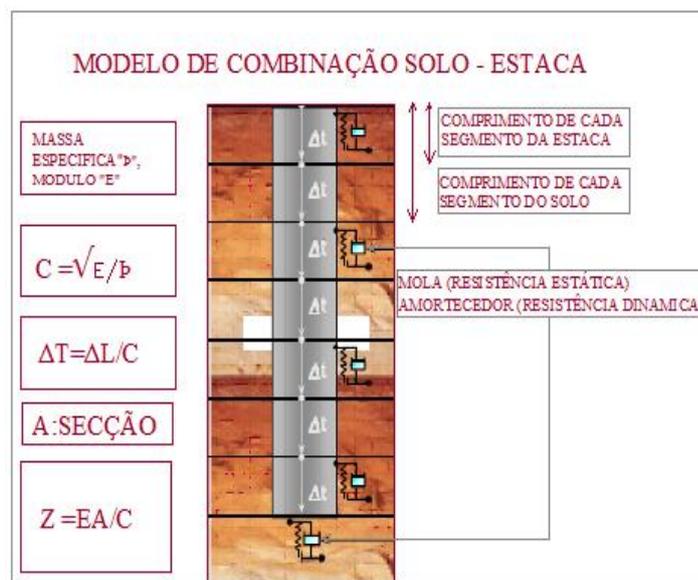


Figura 2.25 - Modelo de combinação solo-estaca pelo CAPWAP (manual do CAPWAP, 2006).

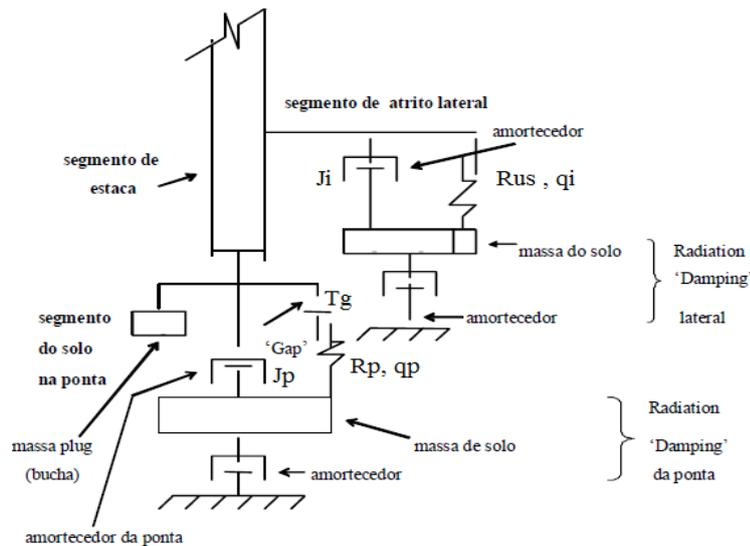


Figura 2.26 - Modelo estendido do CAPWAP de resistência de ponta e lateral do solo (Goble et al., 1996).

O deslocamento (u) e a velocidade (v) de um segmento “ i ” de estaca em relação a um elemento “ s ” de solo lateral, “ t ” se for da ponta, são as bases para o cálculo das reações opostas por este. A resistência total (R_t) é modelada por três parâmetros do solo: A resistência estática última ($R_{u,s}$), o quake (q) e o fator de amortecimento viscoso (J_v), conforme ilustrado nas figuras (2.27) a (2.30).

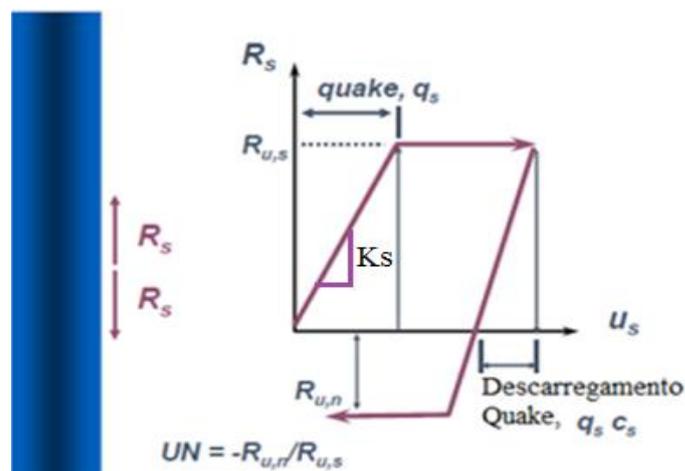


Figura 2.27 - Diagrama de resistência estática lateral x deslocamento (Manual do CAPWAP, 2006).

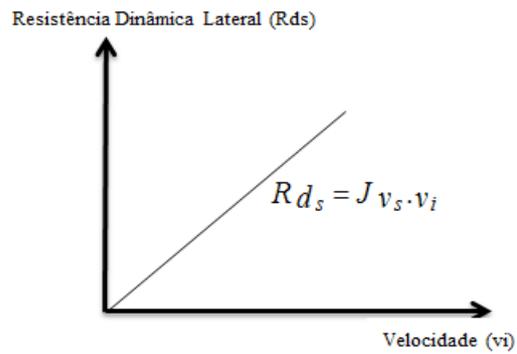


Figura 2.28 - Diagrama de resistência dinâmica lateral x velocidade de deslocamento (De Rosa, 2000).

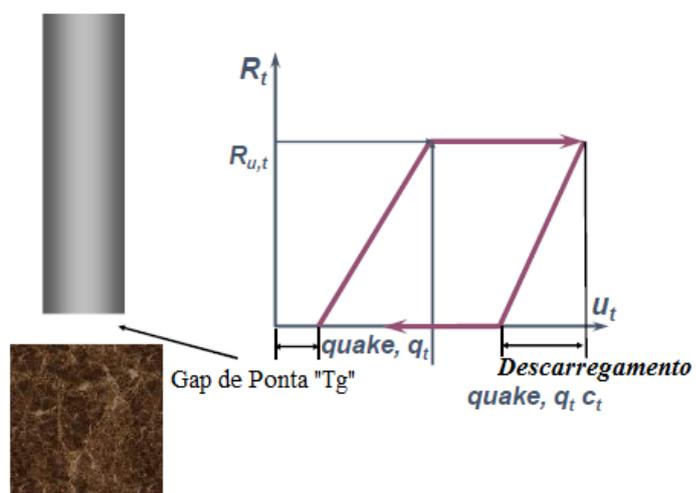


Figura 2.29 - Diagrama de resistência estática na ponta x deslocamento (Manual do CAPWAP, 2006).

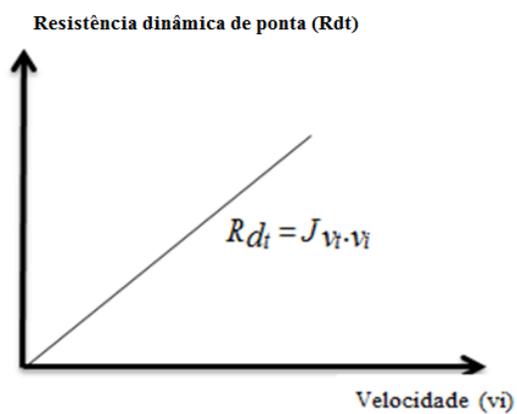


Figura 2.30 - Diagrama de resistência dinâmica do solo na ponta da estaca x velocidade de deslocamento (De Rosa, 2000).

Para o elemento “s” ou “t” de solo e o segmento “i” de estaca, tem-se que a resistência total é dada pela seguinte equação:

$$R_{t_s} = R_{u_s} + J_{v_s} \cdot (v_i) \quad (2.5.17)$$

Onde:

R_{t_s} : Resistência total mobilizada;

R_{u_s} : Resistência estática mobilizada;

J_{v_s} : Coeficiente de amortecimento dinâmico viscoso;

v_i : Velocidade de deslocamento do segmento de estaca “i” considerado.

O referido fator de amortecimento dinâmico (J_v), utilizado pelo CAPWAP, difere do fator adotado pelo método CASE (J_c), sendo que o método de CAPWAP pode trabalhar com o fator de damping Smith (J_{Smith}) ou damping do CASE (J_c), assim:

$$\begin{aligned} R_d &= J_v \cdot v \\ J_{Smith} &= \frac{J_v}{R_{u,s}} \\ J_c &= \frac{J_v}{Z} \\ J_{Smith} &= \frac{J_c \cdot Z}{R_{u,s}} \end{aligned} \quad (2.5.18)$$

Sendo “ $R_{u,s}$ ” resistência estática última “ R_d ” resistência dinâmica.

O primeiro termo da equação (2.5.17), refere-se à resistência total mobilizada, o segundo termo é a parcela de resistência estática e o terceiro é a parcela de resistência dinâmica.

Ao contrario do modelo de Smith (1960), o CAPWAP possibilita admitir a o valor de resistência última, o “quake” e o módulo de rigidez durante a fase de descarregamento diferente dos valores considerados no carregamento.

O modelo considera que a resistência estática de carregamento ($R_{u,s}$) está compreendida entre o valor máximo da resistência de descarregamento ($R_{u,n}$) e a resistência estática última do solo (R_s), conforme mostrado na figura (2.27), ou seja:

$$R_{u,n} \leq R_{u,s} \leq R_s \quad (2.5.19)$$

Onde:

$$UN = \frac{-R_{u,n}}{R_{u,s}} \quad (2.5.20)$$

O fator multiplicativo “UN” relaciona a resistência última de descarregamento com a resistência última de carregamento. De esta maneira “UN” é sempre zero para a resistência de ponta e no máximo para o atrito lateral, ou seja:

$$0 \leq UN \leq 1$$

A resistência de descarregamento pode ser menor o igual que a resistência de carregamento. Entanto que no modelo tradicional de Smith a resistência lateral na fase de descarregamento é admitida igual à resistência na fase de carregamento (UN = 1).

O módulo de rigidez (K_s) do solo de um elemento ‘i’ durante o carregamento é dado por:

$$K_s = \frac{R_{u,s}}{q_s} \quad (2.5.21)$$

Onde “ q_s ” é o “quake” lateral de carregamento.

Nos casos em que a resistência mobilizada for inferior à resistência última, o valor de “ q_s ” utilizado é, obviamente, proporcional.

Normalmente adota-se um único valor de “quake” lateral ‘ q_s ’, independente do tipo do solo ao longo da profundidade. No entanto, é possível utilizar valores individuais para cada elemento.

O “quake” na fase de descarregamento ‘ q_s ’ é relacionado com o “quake” de carregamento pelo fator C_s (C_T se for ‘quake’ de ponta), logo:

$$\text{‘quake’ de descarregamento} = q_s \cdot C_s \quad (2.5.22)$$

Onde: ‘ $0 \leq C_s \leq 1$ ’ conforme recomendado pelos próprios elaboradores do programa ‘CAPWAP’, o valor mínimo de ‘ C_s ’ é 0.3, sendo 1.0 uma boa aproximação para muitos casos. No modelo original de Smith não é feita diferenciação entre ‘quakes’ de carregamento e descarregamento. Analogamente tem-se que no descarregamento o módulo de rigidez “ K_s ” do solo tem a mesma formulação que a equação (2.5.21).

O CAPWAP permite considerar a existência de uma abertura (fenda), denominada ‘Gap’ é uma distancia física entre a ponta da estaca e o solo, causada pelo golpe anterior. Tal fato pode ocorrer em situações em que a ponta da estaca encontra solo muito resistente ou rocha. Desta forma, a resistência da ponta só começa a ser mobilizada a partir do instante em que o deslocamento da ponta da estaca for maior que abertura existente (Gap).

O CAPWAP possui ainda outros recursos como o de simular a presença de tensão residual em estacas trabalhando por atrito ou presença de uma massa de solo (bucha) aderida à ponta da estaca, cujo objetivo é o de simular o ‘embuchamento’ do solo em estacas vazadas ou qualquer outro aumento da área ou peso da ponta do elemento estrutural.

Ao contrario do modelo Smith (1960), o programa substitui o rígido suporte do solo por uma massa e um amortecedor, denominado ‘Radiation Damping’, conforme ilustrado na figura (2.26). Isto se deve ao fato que parte da energia do golpe aplicada é absorvida ou radiada em vibrações no solo. Ao invés de ser consumida no cisalhamento. As primeiras versões do CAPWAP não tinham para modelar ‘Radiation Damping’, atualmente as novas versões do CAPWAP já está incluída a aplicabilidade do ‘Radiation Damping’.

O programa fornece uma simulação de um ensaio estático (curva carga-recalque) a partir de um único golpe, conforme exemplo ilustrativo no anexo (6.4)

As figuras do anexo (6.4) apresentam um exemplo ilustrativo de resultados fornecido pelo CAPWAP a partir dos dados do PDA.

2.5.2.3.

Energia transferida, tensões de cravação e integridade da estaca durante o monitoramento do Ensaio de Carregamento Dinâmico

A energia transferida para a cabeça da estaca pode ser medida desde os transdutores de deformação específica e acelerômetros no nível de instrumentação como descrito na seção anterior, onde a velocidade na seção de instrumentação pode-se obter desde a integral do sinal da aceleração; e os sinais de deformação multiplicada com a área da seção transversal e módulo de elasticidade da estaca fornecem a força na seção instrumentada ao longo do tempo. A máxima energia transferida ao topo da estaca ao longo do tempo pode ser calculada a partir dos sinais de força e velocidade medidas em cada golpe assim:

$$E(t) = \int_0^t F(t).V(t)dt$$

Algumas relações de energia são importantes:

Eficiência do martelo: Pode-ser definida como sendo a razão entre a energia cinética, no momento do impacto e a energia potencial, em posição inicial.

$$E_f = \frac{V_i^2}{2 \cdot g \cdot H} \quad (2.5.23)$$

Eficiência de energia transferida (ETH): é a razão da energia líquida transferida à estaca (EMX) e a energia potencial disponível.

$$ETH = \frac{EMX}{W \cdot H} \quad (2.5.24)$$

O rango de variação da eficiência típica de diferentes tipos de martelos é dado na seguinte tabela (2.10).

Tabela 2.10 - Relação típica da energia transferida para diferentes tipos de martelo.

Tipo de martelo	Estacas metálicas	Estacas de concreto
Diesel	25% - 50%	17% - 40%
Simple ação	40 % - 65%	30% - 55%
Hidráulicos	>75%	>50%
De queda livre	35% - 60%	25% - 50%

Fonte: Teses de Mr. Yu Wah YU, 2009.

O Pile Driving Analyzer (PDA) calcula as tensões de compressão na seção de instrumentação usando a medida da deformação específica e módulo de elasticidade da estaca. Porém a máxima tensão de compressão na estaca pode ser maior que a tensão de compressão calculada na seção de instrumentação, tal como no caso de uma cravação da estaca através de solos que variam de menor a maior resistência. Neste caso o CAPWAP ou análises da equação de onda pode ser usado para a avaliação da compressão máxima na estaca. As medições das tensões são baseadas sobre a superposição de ondas que trafegam descendentemente ou ascendentemente calculadas pelo PDA. Na tabela (2.11) são descritas o limite das tensões de cravação sobre estacas de concreto e metálico.

Tabela 2.11 - Recomendações dos limites de tensões de cravação (fonte: PDI, 2000).

Tipo de estaca	Máxima tensão de compressão (MPa)	Máxima tensão de tração (MPa)
Estacas metálicas	0,9fy	0,9fy
Estacas de concreto	0,85fck	0,1fck
Notas	Fy = Tensão de escoamento do aço (MPa) Fck = Resistência á compressão do concreto aos 28 dias (MPa)	

A verificação da integridade da estaca durante sua cravação é possível pela análise dos registros de força e velocidade, mesmo que em estacas “in loco” (Van Koten e Middenpord, 1980). Os dois registros são proporcionais valendo a igualdade ‘ $F=Z.V$ ’, até que a onda se refletida, atingindo ao topo da estaca, devido ao efeito da resistência do solo ou alguma singularidade, tal como mudança na seção transversal da estaca.

A resistência do solo causa um incremento no valor da força em relação á velocidade, enquanto uma redução de seção transversal causa o oposto; normalmente um dano da estaca representa de alguma forma uma redução na área da seção. No caso de um dano com a quebra de uma seção da estaca, teríamos uma redução da sua impedância de Z_1 (original) para Z_2 gerando uma onda refletida, o grau de intensidade do dano é dado pelo valor de beta ($\beta=Z_2/Z_1$).

Tabela 2.12 - Grau de intensidade do dano da estaca (Rausche and Goble, 1979).

Beta (β)	Grau de avaliação
1,0	Sem dano
0,8 – 1,0	Dano leve
0,6 – 0,8	Com dano
<0,6	Quebrada

Fonte: Manual do PDI, 2000.