

6 Conclusões e recomendações

No presente estudo foram analisadas algumas grandezas de interesse obtidas dos ensaios de carregamento dinâmico como, a eficiência da energia transferida (ETR), tensões de cravação, resistência mobilizada e integridade das estacas, encontrando-se uma relação importante destas grandezas. Por outra parte foi avaliada a aplicabilidade de algumas fórmulas dinâmicas na previsão da resistência mobilizada para os diferentes casos de análises (adotando valores iniciais, revisão dos coeficientes, aplicação da ferramenta ‘solver’ para a fórmula de Hiley e, usando módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto) cujos resultados foram comparados com os valores do CAPWAP, para os diferentes tipos de estacas estudadas no presente trabalho. Os objetivos alcançados foram discutidos para cada caso de estudo, a qual será possível fazer as conclusões mais importantes deste trabalho.

6.1. Fórmulas dinâmicas

Em relação à seleção das melhores fórmulas dinâmicas, a partir da análise para valores iniciais e revisão de coeficientes, foram aquelas que apresentam uma proximidade com os valores do CAPWAP, resumida na tabela (5.12), e ao mesmo tempo apresentem uma média da relação ($u = \text{Fórmulas dinâmicas}/\text{CAPWAP}$) próxima à unidade, um coeficiente de variação menor possível, uma média da diferença percentual próximo a zero e, um coeficiente de correlação próximo à unidade. A análise foi realizada para cada tipo de estaca (escavadas e cravadas), encontraram-se algumas aproximações:

Comprovou-se que a aplicabilidade das fórmulas dinâmicas, para o caso de estacas escavadas, considerando as análises realizadas, não fornecem valores consistentes, sendo porem não aplicáveis e apresentando resultados com grande dispersão de dados, altos valores do coeficiente de variação em relação aos valores estimados em estacas cravadas de concreto e metálicas. Apesar desta

dispersão algumas fórmulas apresentaram um coeficiente de correlação alto, como o caso da aplicação da fórmula dos Dinamarqueses ($R = 0,78$) e Weisbach ($R = 0,77$).

Esta dispersão dos resultados em estacas escavadas poderia ser devido ao uso de parâmetros diferentes dos considerados em estacas cravadas. Por exemplo, foi observada neste estudo, a variabilidade do módulo de elasticidade dinâmico num mesmo grupo de estacas escavadas. No entanto, a fórmula de Weisbach para uma revisão de coeficientes considerando um valor de eficiência do martelo ' $e_f = 0,70$ ' apresenta resultados mais próximos aos valores do CAPWAP, menor valor da média da diferença percentual (-1,06%), melhor valor da média da relação ($\hat{u} = 0,99$) próximo à unidade, um coeficiente de correlação alto ($R = 0,77$) e um menor coeficiente de variação ($CV = 0,69$), seguido da proximidade da fórmula de Hiley, para uma revisão de coeficientes encontrados de ' $C_1 = 0,30\text{cm}$ ', ' $C_3 = 0,10\text{cm}$ ', ' $e_f = 0,90\text{cm}$ ', ' $n = 0,55\text{cm}$ '.

Para estacas cravadas de concreto, a fórmulas dos Dinamarqueses para uma revisão de coeficientes ' $e_f = 0,80$ ', apresenta uma proximidade com os valores do CAPWAP, com menor valor da média da diferença percentual (-14,96%), melhor média da relação ($\hat{u} = 0,85$) próximo à unidade e, menor coeficiente de variação ($CV = 0,39$), seguido da proximidade da fórmula de Weisbach com coeficiente (valor inicial) ' $e_f = 1$ ' e coeficiente de variação ($CV = 0,40$).

Para o caso de estacas metálicas, a fórmula dinâmica dos Dinamarqueses considerando uma revisão dos coeficientes, com ' $e_f = 0,80$ ', apresenta melhor correlação com os valores do CAPWAP, menor valor da média de diferença percentual (-12,60%), melhor média da relação ($\hat{u} = 0,87$) e um coeficiente de variação igual às outras fórmulas dinâmicas. Seguida da proximidade da fórmula de Hiley para valores encontrados pelo 'solver' ' $C_1 = 0,10\text{cm}$ ', ' $C_3 = 0,10\text{cm}$ ', ' $e_f = 0,90\text{cm}$ ', ' $n = 0,55\text{cm}$ '.

Com respeito à comparação dos resultados das fórmulas dinâmicas usando módulo de elasticidade estático em lugar do módulo de elasticidade dinâmico, foi visto que os resultados obtidos foram bastantes conservadores, comparados para todos os casos de estudo (para valores iniciais e revisão de coeficientes), em cada tipo de estaca (escavadas e cravadas).

Os resultados obtidos a partir das fórmulas dinâmicas sem o uso do fator de correção, mostram que a fórmula dinâmica de Janbu tem uma proximidade com os

valores do CAPWAP, provavelmente esta fórmula fornece a resistência mobilizada das estacas. Portanto pode ser comparadas diretamente com os valores do CAPWAP, sem o uso de um fator de correção.

O ajuste dos coeficientes da fórmula de Hiley, usando a ferramenta chamada ‘Solver’ do Microsoft Excel, minimiza a quantidade de erros e ao mesmo tempo permite melhorar a correlação entre a previsão da resistência mobilizada, pelas fórmulas dinâmicas, e os valores do CAPWAP, tal análise foi realizada de acordo com as estacas consideradas na classificação (escavadas e cravadas). Foram encontrados valores ótimos dos coeficientes pela ferramenta ‘solver’, para o caso de estacas metálicas de maneira satisfatória. ‘ $C1=0,10\text{cm}$ ’, ‘ $C3=0,10$ ’, ‘ $e_f=0,90$ ’ e ‘ $n=0,55$ ’.

Além disso, foi visto que o ‘solver’ encontrou geralmente valores ótimos de ‘ $n=0,55$ ’ para o coeficiente de restituição considerado na restrição, que variam de “ $0,25 \leq \eta \leq 0,55$ ” de acordo as tabelas (1.1 e 1.2) do anexo (1) da literatura técnica. Quanto maior o valor do coeficiente de restituição ($\eta=1$) poderiam encontrar-se equações das linhas de tendência de melhor ajuste com coeficientes de determinação próximos à unidade; que quanto menor, não poderiam conseguir um bom ajuste da linha de tendência.

Segundo as recomendações de Danzinger e Ferreira (2000), sobre a confiabilidade do uso da fórmula dinâmica dos Dinamarqueses para estacas metálicas. Foi comprovada a proximidade da fórmula dinâmica (dos Dinamarqueses) para estacas metálicas, encontrando-se uma correlação média de 0,90 com os valores do CAPWAP.

A fórmula de Janbu, da equação (2.3.12), para o presente trabalho não satisfaz o valor da previsão da resistência mobilizada para valores de nega “s” igual zero, devido a que o valor de “ λ ” torna-se infinito neste caso, fazendo com que a equação seja indeterminada. Porém na fórmula original, deduzida a partir da equação (2.3.5) de Weisbach, não aconteceu esse fenômeno na previsão da resistência mobilizada das estacas, sendo válida para um valor de nega igual a zero.

No presente trabalho observou-se que as fórmulas dinâmicas baseadas na medição da nega são extremamente sensíveis ao valor da nega “s”, como são as fórmulas de Brix, Holandeses e Gates.

Foi visto que a correlação encontrada em algumas fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP poderia ser afetada pelo número limitado de dados de ensaios das estacas disponíveis neste estudo, onde possivelmente aumentando o conjunto de dados aumentaria também a confiabilidade e precisão.

Observou-se também que os valores das perdas de energia devem ser modificados para refletir melhor as perdas das energias no martelo usadas durante o ensaio dinâmico.

Por outro lado foi visto que, a revisão dos coeficientes causou em algumas fórmulas dinâmicas que anteriormente subestimavam a previsão, superestimassem agora a previsão da resistência, ou vice-versa.

Não é aconselhável usar qualquer fórmula dinâmica em sua forma original, mas assim, com os novos coeficientes encontrados nos diferentes análises. Isto devido ao aumento da precisão que os novos coeficientes fornecem.

6.2. CAPWAP

Os valores da eficiência de energia transferida (ETH) indicam eficiências inferiores a 100% em todas as estacas ensaiadas, permitindo concluir que, para estes golpes, as alturas reais de queda do martelo são inferiores às alturas de quedas nominais usadas no ensaio. A eficiência da energia transferida (ETH) é dependente do valor do golpe do martelo, altura de queda e peso do martelo.

As tensões máximas de compressão geradas durante a recavação nas estacas foram inferiores aos limites estabelecidos pela norma NBR/6122. Portanto, uma possibilidade da ocorrência de concentração de tensões seria devido à excentricidade do golpe do martelo aplicado durante o ensaio e tipo do solo.

No caso das tensões de tração, as estacas B59, C53 e, E1 ultrapassaram os limites estabelecidos pela norma NBR.

Deve-se observar que a resistência mobilizada para um determinado golpe depende de sua energia e da magnitude dos deslocamentos resultantes. A partir da figura (4.7) observa-se no geral que todas as estacas, tanto de concreto e metálico, obtiveram-se valores superiores de resistência mobilizada igual ao dobro de suas respectivas cargas de trabalho. Já as estacas escavadas P24D-B, P26D-B, E1, E3 e, a estaca pré-fabricada de concreto armado E70, apresenta uma resistência

mobilizada de 1,38 vezes sua respectiva carga de trabalho, sendo este valor inferior ao mínimo exigido pela norma NBR/6122/2010.

Comparando a integridade das estacas metálicas com as estacas de concreto (pré-fabricadas e moldadas in loco), todas as estacas metálicas são classificadas sem dano. É claro que as estacas de concreto são mais sensíveis ao dano que as estacas metálicas. As estacas escavadas (ou moldadas in loco) P17D-G, P24D-B, P25D-A, P26D-B e, a estaca pré-fabricada de concreto E70 são classificadas com dano.

Conforme foi visto, a integridade da estaca é o ponto mais crítico a ser monitorado durante a cravação de estacas pré-fabricadas (de concreto, metálicas ou outros). Portanto o estudo da integridade deveria ser mais aplicado a este tipo de estacas que são mais sensíveis ao dano devido às tensões aplicadas na cravação, ou seja, o fator beta (β) deve ser de grande interesse. No caso de estacas escavadas (moldadas in loco) poderiam ser mais complexo a avaliação da integridade devido a que estas estacas apresentam uma irregularidade ao longo do fuste da estaca durante seu processo construtivo. Quando a onda descendente é refletida ao encontrar uma variação da impedância, pode ser devido a estas irregularidades encontradas no fuste das estacas. Consequentemente o valor de beta será calculado pelo PDA fornecendo um valor que aparentemente possa existir dano.

Existe uma grande relação destas grandezas entre a resistência mobilizada das estacas, a integridade das estacas, tensão de cravação e a eficiência da energia transferida (ETH).

	Resistência da estaca ↑	Energia transferida ↑	Tensões de cravação ↑	Integridade beta (β) ↑
Resistência da Estaca		↑	↑	↓
Energia transferida	↑		↑	↓
Tensões de cravação	↑	↑		↓
Integridade beta (β)	↓	↓	↓	

Relação entre a resistência mobilizada, eficiência da energia transferida, tensões de cravação e a integridade das estacas.

Observou-se, que aumentando a energia do martelo, pode-se conseguir uma grande resistência mobilizada das estacas. Portanto, devido ao incremento da energia, as tensões de cravação são atingidas, como resultado também aumenta o risco do dano das estacas. Em sentido oposto para prevenir o dano da estaca, diminui-se a tensão de cravação por meio da redução da energia transferida do martelo. Porém o risco de dano da estaca é reduzido, assim como poderia obter-se uma menor resistência mobilizada.

Em relação ao coeficiente de amortecimento ' J_c ' observou-se, quando menor o coeficiente de amortecimento, maior é a resistência mobilizada obtida pelo ensaio de carregamento dinâmico.

6.3. Sugestões para pesquisas futuras

A escolha de uma determinada fórmula dinâmica para a aplicação num determinado projeto de fundação em estacas não deve ser feita indiscriminadamente. Em primeiro lugar é necessário um conhecimento detalhado do tipo e das características do martelo, dos acessórios de cravação, da estaca e do solo, pois esses fatores afetam de maneira marcante nos resultados.

Em seguida, deve-se proceder a um estudo da aplicabilidade de diversas fórmulas dinâmicas, baseado nas hipóteses a partir das quais essas fórmulas foram estabelecidas e verificar, então, se essas hipóteses se aplicam ao caso em questão.

Diferentemente das outras fórmulas dinâmicas, a fórmula de Hiley é a mais complexa, porém depende de muitos parâmetros, como a compressão elástica do capacete, coxim, cepo (C_1) e da estaca (C_2), compressão elástica do solo (C_3), energia nominal do martelo, eficiência do martelo e a nega "s", que em sua maioria devem ser medidas no campo para ter resultados mais reais, para logo ser comparadas com os resultados obtidos do CAPWAP. A partir desta comparação deve ser feita uma calibração da fórmula de Hiley para melhorar a previsão da resistência mobilizada e obter valores próximos aos valores do CAPWAP.

É interessante fixar os valores do módulo de elasticidade dinâmico do concreto em função do tipo de estaca (concreto armado, moldadas in loco e protendidas) para obter resultados mais reais, devido à grande variabilidade dos fatores envolvidos na obtenção do módulo de elasticidade.

Criar um banco de dados mais amplo de resultados de ensaio de carregamento dinâmico de acordo com os tipos de estacas, tipos de solo e, tipo de equipamento de cravação, cuja previsão da resistência mobilizada pelas diferentes fórmulas dinâmicas permita realizar comparações para as mesmas estacas do banco de dados e obter as correlações correspondentes e, podendo-se assim comparar outros trabalhos de pesquisas.

Sugere-se ainda a realização de estudos comparativos entre os resultados da análise pelo CAPWAP e os valores fornecidos pelas fórmulas dinâmicas baseadas no repique elástico (Chellis e Uto).