



## Técnica da compactação dinâmica – conceitos, equipamentos e aplicações.

Tennison Freire de Souza Júnior  
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, tennisonufpr@outlook.com

Karla Salvagni Heineck  
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, karla.heineck@ufrgs.br

Eclesielter Batista Moreira  
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, eclesielter\_ebm@hotmail.com

Ricardo Daniel Caballero  
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, ricardocaballero23@gmail.com

**RESUMO:** Cada vez mais com a densificação dos centros urbanos, as construtoras e incorporadas adquirem terrenos com solos que apresentam baixa capacidade de suporte e parâmetros de deformabilidade incompatíveis com a infraestrutura que será implantada. Não apenas voltado para construções de empreendimentos altos e seguros, como também na concepção de obras com fundações vultuosas, no caso de obras portuárias, aeroportuárias, rodoviárias e outras, muitos engenheiros geotécnicos recorrem a opções onerosas para sua melhoria. Em termos de técnicas e alternativas de melhoramento de solos, atualmente existem várias possibilidades, tais como: técnicas de consolidação através de drenos verticais e vácuo; melhoramento químico com adição de cal ou cimento na massa de solos; *Jet Grouting*, vibrosubstituição, substituição dinâmica e colunas de módulo controlado; vibro compactação ou compactação dinâmica; e por fim também é possível recorrer a técnicas de reforço através uso de introdução de geogrelhas. Dentre as técnicas anunciadas, a compactação dinâmica permite que se modifiquem os parâmetros de resistência ( $c$ ,  $\phi$ ), deformabilidade ( $E$ ,  $\nu$ ) e de condutividade hidráulica ( $k$ ) através da aplicação de sucessivos golpes de martelo compactador com elevada energia potencial sobre o solo de forma rápida, econômica e eficiente. Tendo em vista o potencial desta técnica nos solos de formações residuais e a consagração em depósitos sedimentares característicos dos países da América do Norte, Europa, África e Oriente Médio, este artigo tem como proposta apresentar uma revisão literária da compactação dinâmica anunciando conceitos, equipamentos utilizados na técnica, aplicações e peculiaridades.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compactação dinâmica, Melhoramento de solos, rapidez, economia, eficiência.

### 1 INTRODUÇÃO

O contexto da geotecnia corriqueiramente se depara com vários tipos de solos, cujas peculiaridades direcionam a escolha da técnica que deve ser adotada para as necessidades da construção civil. Há uma significativa

quantidade de variáveis envolvidas, tais como: gênese, propriedades mecânicas, espessura, característica das estruturas, entre outras, que devem ser consideradas na análise técnica e econômica para definição do tipo de fundação. No passado, áreas cujos solos apresentavam baixa capacidade de suporte e/ou características



muito deformáveis eram enquadradas como áreas impróprias para a construção. Contudo, a necessidade de ocupação dessas áreas em centros urbanos e com o desenvolvimento do conhecimento da mecânica comportamental dos solos, consideravelmente influenciada pelos avanços dos ensaios laboratoriais e *in situ*, contribuíram para que houvesse avanços significativos no melhoramento dos solos de forma a permitir a execução de construções em solos com condições geológicas e/ou geotécnicas distintas.

Segundo Kézdi (1979), o melhoramento ou reforço de solos é compreendido como uma ação em que a utilização de processos físicos e/ou químicos visa modificar as propriedades mecânicas dos solos (resistência ao cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade) de forma a atender alguma necessidade específica da construção civil. Atualmente, existem diversas inovações no setor da geotecnia que consideram, para diferentes tipos de solo, possibilidades comerciais de melhoramento e reforço, envolvendo técnica de consolidação (drenos verticais e consolidação por vácuo), por reforço (colunas de módulos controlados, substituição dinâmica, *Jet grouting* e vibro substituição) ou de compactação (vibro compactação e compactação dinâmica) (NATÁRIO, 2017).

A compactação dinâmica é capaz de alcançar uma melhoria significativa a uma profundidade substancial, muitas vezes com considerável economia quando comparada a outras soluções geotécnicas. (SLOCOMBE, 2013). A mesma se tornou um método popular em todo o mundo para a melhoria profunda de solos soltos nos últimos anos. O método envolve a aplicação repetida de impactos de alta energia na superfície do solo usando martelos compactadores com peso de 20 toneladas, caindo de alturas de 20 m, compactando os estratos do solo até uma profundidade considerável. (SLOCOMBE, 2013; PAN e SELBY, 2001). Em solos arenosos, há casos de melhoria em profundidade de 8 a 10m em

relação ao nível do solo. A massa dos martelos (20tf – 170tf) e alturas de queda (alturas superiores a 10m) são variáveis e relativa ao nível de melhoramento que se deseja para um determinado tipo de solo tendo em vista o carregamento que se pretende aplicar no terreno. Existem alguns trabalhos na literatura que sugerem especificações de valores de massa do martelo de compactação e altura de queda como é o caso de Menard e Broise (1975), Gambin (1983), Mayne, Jones de Dumas (1984), Lukas (1995), Miao *et al.* (2006), etc.

O método é muitas vezes uma alternativa economicamente viável para a utilização de fundações superficiais e a preparação de bases para construção, quando comparadas com soluções convencionais (fundações de estacas, escavação e substituição, sobrecargas, etc.). Além disso a técnica da compactação dinâmica é abrangente pela sua aplicação em uma ampla variedade de tipos e condições de solo, principalmente materiais arenosos e preenchimentos granulares, embora um número limitado de solos coesivos também tenha sido tratado. (MAYNE, JONES e DUMAS, 1984). Segundo Mitchel (1081) quando aplicados a solos finos e argilas saturadas necessita uma devida atenção. Este tipos de solos possuem rigidezes menores, conseqüentemente a elevada flexibilidade e a compressibilidade do material impede que camadas mais profundas sejam melhoradas.

O método tem sido usado para diferentes tipos de projetos de engenharia civil, incluindo estruturas de edifícios, rodovias, aeroportos, instalações de carvão, estaleiros e redução do potencial de liquefação de solos soltos em regiões sismicamente ativas. MAYNE, JONES E DUMAS, 1984). Sabendo do potencial desta técnica, este artigo tem como proposta reunir informações referentes a conceitos, equipamentos utilizados, aplicações e peculiaridades da técnica da compactação dinâmica no contexto da geotecnia.



## COMPACTAÇÃO DINÂMICA

Mittal (2012) afirma que os primeiros relatos de densificação de solos remontam à antiga Índia, onde elefantes eram usados para a compactação de solos a partir da compactação por pisoteamento. Entretanto, o uso de animais como vacas, bois e bezerros para densificação do solo foi especificado no antigo conjunto hindu de regras construtivas escritas em *Manasara Shilpashastra*. Muito embora, o primeiro relato desta técnica ocorreu no império da Roma Antiga através das escritas do Arquiteto Marco Vitruvius Polião afirmando que o solo atingiria um nível de rigidez e resistência através da queda de um peso. Além desse, o método do melhoramento por compactação dinâmica foi descrito no código chinês na dinastia Dung em 1103 AD.

Anos mais tarde, no século XIX, Lundwall (1968 *apud* SLOCOMBE, 2013) relata que o antigo canhão de guerra foi usado para compactar terreno em 1871. Já no século XX, existiram aplicações de compactação dinâmica para melhoramento de solos no aeroporto da China e na zona portuária de Dublin (Irlanda) mais exatamente nos anos de 1940 e na fundação de um tanque de óleo na África em 1955 (SLOCOMBE, 2013).

Em 1970, a *Technique Louis Menard* introduziu a conhecida como compactação pesada (“Heavy Tamping”) como técnica de melhoramento de solos. Seu campo de aplicação cobria principalmente os depósitos de lastro ou os solos naturais de cascalho arenoso. Entretanto a aplicação desta técnica se estendeu para solos argilosos ou aluviais saturados. A partir de então, a técnica tomou o nome de “consolidação dinâmica” (MENARD E BROISE, 1975).

Louis Ménard inventou e promoveu a Compactação Dinâmica (DC) em 1969, mas foi somente em 29 de maio de 1970 que ele patenteou oficialmente sua invenção na França. Ménard obteve duas patentes, primeiro compactação dinâmica para preenchimentos

amortecidos e consolidação dinâmica para a mitigação da liquefação (Varaksin, 2014). Hamidi (2014) citou que essas técnicas foram posteriormente patenteadas em muitos outros países, incluindo Argentina, Austrália, Áustria, Bahrein, Bangladesh, Bélgica, Canadá, Egito, França, Alemanha, Grã-Bretanha, Grécia, Hong Kong, Itália, Japão, Líbano, Malásia, México, Holanda, Nova Zelândia, Noruega, Filipinas, Arábia Saudita, Cingapura, Espanha, Suécia e Estados Unidos.

Slocombe (2013) cita que com o advento de grandes guindastes de esteiras levou os níveis atuais de calcamento de alta energia a serem realizados regularmente na França em 1970 e subsequentemente na Grã-Bretanha em 1973 e na América do Norte em 1975. Uma extensão do conceito de pesos caiu sobre o solo, compactação de impacto rápido (RIC), foi desenvolvido na Inglaterra no final da década de 1970 para o reparo rápido de danos causados à explosão em pistas de pouso militares usando martelos hidráulicos modificados (BSP) atuando sobre um pé de aço que permanece em contato com o solo.

A experiência brasileira quanto a técnica da compactação dinâmica, de um modo geral, não foi efetiva e sucedida dada a singularidade das propriedades dos solos tropicais. Até então, sabe-se que existiram três tentativas de aplicação da técnica, com êxito em uma delas, sendo elas: a) Tentativa de melhoramento de solos moles, em 1975, em obras de ampliação da Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA-SP) e b) Tentativa de melhoramento de solos moles no estaleiro na enseada do Paraguaçu, em 2015, pela empresa Mecasolo®; c) Um caso restrito ao qual houve eficiência da aplicação da técnica na Base Naval de Itaguaí- RJ em solos moles pela empresa Mecasolo®, recentemente. O que se comenta é que a ineficiência desta técnica em solos tropicais nacionais dá-se pela ausência de auxílio de técnicas de consolidação complementares, como estacas de areia ou brita e drenos verticais. Atualmente, Rizzon (2016) realizou os primeiros estudos do efeito da



compactação dinâmica em solos residuais de Passo Fundo (RS) e identificou melhoramento nas propriedades mecânicas, hidráulicas (condutividade hidráulica) e de deformabilidade.

Hamidi (2014) relatou no seu trabalho vários casos de usos recentes da compactação como no caso de tanques, silos, edificações, indústrias rodovias alocadas em no Oriente Médio e Ásia (HAMIDI, 2014); Indratina, Chu e Rujikiatkamjorn (2015) e Hamidi (2014) descreveram o processo de compactação dinâmica da *Palm Jumeira* – Dubai (Emirados Árabes).

### 3 COMPACTAÇÃO E CONSOLIDAÇÃO DINÂMICA

Lukas (1995) citou que a compactação dinâmica consiste em uma técnica cujo peso de compactação com uma determinada massa é repetidamente levantado e solto por um único cabo, dependendo do equipamento, em diferentes alturas para impactar o solo e prover melhoramento das suas propriedades mecânica, deformáveis e hidráulicas. A Figura 1 ilustra o procedimento executivo da densificação dos solos pela técnica da compactação dinâmica.

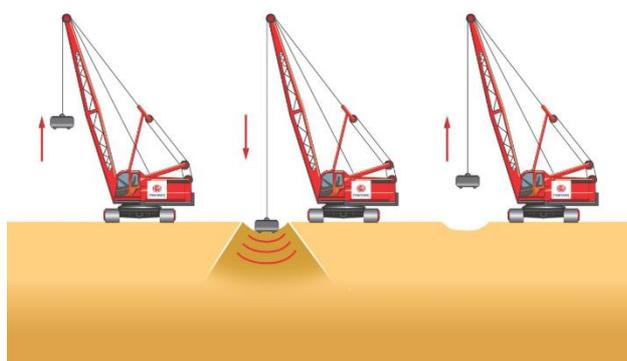


Figura 1. Sequência executiva do melhoramento de solos através da técnica da compactação dinâmica ( Fonte: Menard, 2019)

O mecanismo da densificação do solo funciona de tal maneira que as forças começam a partir da superfície, pressionando as partículas do sistema a se movimentarem em função das

ondas de choque transmitidas através do meio no momento da interceptação do peso na superfície do solo. Essas ondas de choque podem existir como ondas volumétricas ou ondas de contorno dependendo da direção que movimento ou a influência sobre o solo que eles têm. (TAN. 2007).

Bo *et al.* (2009) afirmaram que no momento do impacto do peso de compactação, a energia potencial é transformada em radiação sísmica, que por sua vez é transmitida em formas de ondas de compressão e cisalhamento no meio, além também da presença de ondas superficiais que representam ondas horizontais propagadas na superfície do meio, conforme. A influência destas ondas é variável segundo ao tipo de solo e grau de saturação.

Tan (2007) complementou informando que as ondas volumétricas se manifestam como onda de compressão ou onda de cisalhamento, ou seja, onda vertical ou onda horizontal, e que permitem que as partículas sejam rearranjadas de modo a atingir um estágio mais compactado. As ondas de compressão e as ondas de cisalhamento possibilitam a dissipação da poropressão através de fissuras ou fendas geradas na massa do solo. Conseqüentemente, o solo pode então adensar através do rearranjo. Slocombe (2013) citou que a compactação dinâmica representa um carregamento instantâneo e localizado que reduz o índice de vazios e transfere a energia de potencial para a água existente nos poros do solo. Isso cria zonas de gradiente de pressão de água positiva que induzem a água a drenar rapidamente da matriz do solo. Este efeito é ainda mais acelerado pela formação de caminhos de drenagem adicionais por cisalhamento e fratura hidráulica.

Menard e Broise (1975) afirmaram que a consolidação dinâmica representa a melhoria nas características mecânicas de um solo que é compressível a uma profundidade considerável (10-30 m) é obtida pela aplicação repetida de impactos de alta intensidade à superfície. O procedimento consiste em soltar pás pesando dezenas de toneladas de grandes alturas (15-40



m). Em termos de consolidação dinâmica, Segundo Menard e Broise (1975) e Kopft, Paulmichl e Adam (2010), o sucesso da compreensão do mecanismo de consolidação dinâmica se baseia em quatro pontos principais que são: a) compressibilidade de solos saturados devido à presença de microbolhas; b) liquefação gradual sob impactos repetidos; c) mudanças de permeabilidade de uma massa de solo devido à presença de fissuras e / ou o estado iminente a liquefação e do possível papel desempenhado pela água adsorvida; d) recuperação tixotrópica.

## 2.1 Fases da compactação dinâmica

A compactação dinâmica se divide em fases, que são:

- a) Fase inicial (“*Print*”);
- b) Fase intermediária (“*Intermediate*”);
- c) Fase de passagem (“*Ironing*”).

Hamidi (2014) caracterizou as três fases afirmando que a fase inicial ou de *Print* é realizada em uma grade ampla com a quantidade máxima de energia de impacto ou golpes por ponto de impacto, cujo fundamento é tratar as camadas mais profundas do solo. A segunda fase (*Intermediate*), que também é um tratamento profundo, e destina-se a tratar a camada intermediária do solo e pode ser realizada com menos energia ou golpes. Se necessário, a fase final, chamada *Ironing*, será composta de pontos de grade próximos, com um ou dois golpes de baixa energia para melhorar a camada de solo superficial e superficial acima da profundidade da cratera.

## 2.2 Classificação dos solos na compactação dinâmica

Lukas (1995) citou que para a densificação ocorrer de forma eficaz, é necessário que o depósito seja relativamente permeável, de forma que o excesso de poropressão, que se desenvolve durante a densificação, dissipe-se em um período de tempo, permitindo assim que

as partículas do solo se movam para um estado de empacotamento mais denso. Logo, os depósitos de solo mais favoráveis para a compactação dinâmica são aqueles em que a permeabilidade da massa do solo é alta, portanto drenante.

Com isso, o mesmo discriminou os solos para que se adequassem à aplicação da compactação dinâmica, e assim propôs a divisão em três zonas de classificação distintas, dependendo da granulometria, índice de plasticidade e condutividade hidráulica, ilustrada na Figura 2. Quanto a descrição destes solos, podem ser feitas as seguintes considerações:

Zona 1: denominada de zona de solos mais favoráveis, é representada pelos depósitos granulares permeáveis, que incluem desde areias e cascalhos naturais, como também entulho de construção, entulho de mina, determinados resíduos industriais (Ex: escória) e depósitos de lixo decompostos;

Zona 2: denominada de zona de solos intermediários, composta por sedimentos, lodos argilosos e os siltes arenosos, cujos solos possuem uma permeabilidade da ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-8}$  m/s. Devido a estes tipos de solos possuem uma condutividade hidráulica menor que a desejada, a energia deve ser aplicada usando múltiplas fases ou múltiplas passagens, considerando um tempo suficiente entre as fases ou passagens para permitir dissipação do excesso de poropressão;

Zona 3: denominada de zona de solos não favoráveis, composta por solos argilosos, naturais ou de preenchimento (aterros), em estado saturado. Em depósitos saturados, naturalmente não ocorrem a menos que o teor de umidade do depósito seja reduzido. Geralmente, os solos argilosos têm permeabilidades menores que  $10^{-9}$  m/s, portanto, a dissipação do excesso da poropressão gerada durante a compactação dinâmica não ocorre instantaneamente, mas ao longo do tempo.

Varaksin (1981 *apud* HAMIDI, 2014) estabeleceu como principais critérios de limites



de compactação dinâmica a baixa permeabilidade do solo, profundidade de solos de baixa permeabilidade, espessura de solos compressíveis, teor de matéria orgânica e estado inicial de solo muito mole. Salientou ainda que a compactação dinâmica se torna cada vez menos eficaz, pois a permeabilidade do solo diminui para menos de  $10^{-7}$  m/s quando a camada impermeável é muito espessa.

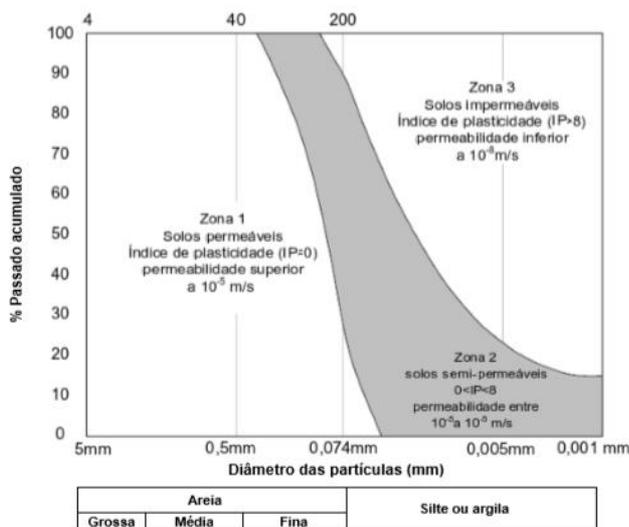


Figura 2. Zoneamento dos tipos de solos úteis na compactação dinâmica a partir da granulometria e dimensões das partículas de solo (Fonte: Lukas, 1995)

### 2.3 Profundidade influência da compactação dinâmica (D)

Mayne, Jones e Dumas (1984), através da equação (1), estabeleceu limites de profundidade de influência máxima ( $D_{m\acute{a}x}$ ) em seus estudos através de valores  $\eta$  entre 0,3 e 0,8, conforme Figura 3.

$$D_{m\acute{a}x} = \eta \sqrt{WH} \quad (1)$$

Onde:

- D: Profundidade de influência;
- W: Martelo de compactação;
- H: Altura de queda do martelo;
- $\eta$ : coeficiente empírico.

Lukas (1995) enfatizou que a variação do coeficiente empírico ( $\eta$ ) se deve aos seguintes

fatores: eficiência do mecanismo de queda do guindaste, quantidade total da energia aplicada, tipo de depósito de solo sendo que está sendo densificado, presença de camadas absorventes de energia, presença de uma camada resistente acima ou abaixo do depósito sendo compactado e pressão de contato do peso. A Tabela 1 fornece dados de coeficientes empíricos obtidos por vários pesquisadores no mundo em função do tipo de solo que fora melhorado.

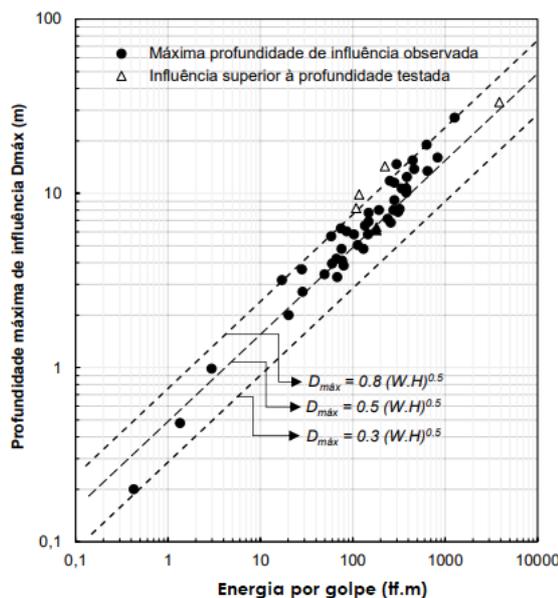


Figura 3. Relação entre a profundidade de influência máxima com a energia de impacto (Fonte: Mayne, Jones e Dumas, 1984)

Tabela 1. Valores de coeficientes empíricos  $\eta$  obtidos em variadas pesquisas

Autores	$\eta$	Solos
Leonards, Holtz e Cutter (1980)	0,5	Granulares
Smoltczyk (1983)	0,67	Areias e Siltes
Mayne, Jones e Dumas (1984)	0,3 - 0,8	variados
Qyian (1987)	0,65	Areias finas
Van Impe (1989)	0,65	Siltes arenosos
	0,5	Argilas Arenosas
Rollins e Rogers (1994)	0,4 - 0,5	Colapsíveis
		Areias siltosas secas
Lukas (1995)	0,5	Depósitos de solos permeáveis com elevado grau de



		saturação
	0,5 - 0,6	Solos granulares com baixo grau de saturação Depósitos
	0,35 - 0,40	semipermeáveis de solos siltosos com IP <8 e alto grau de saturação Depósitos
	0,40 - 0,50	semipermeáveis de solos siltosos com IP <8 e baixo grau de saturação Depósitos
	0,35 - 0,40	impermeáveis de argilas com IP >8 e baixo grau de saturação
	0,65 - 0,80	Depósitos de materiais soltos
Van Impe e Bouozza (1996)	0,35 - 0,65	Resíduos sólidos
Yasrobi e Asghari (2004)	0,35 - 0,40	Solos pedregulhosos (Irã)
Feng et al. (2011)	0,3	Depósitos granulares na China

#### 4 EQUIPAMENTOS – TIPOS E ESPECIFICAÇÃO

Hamidi (2014) descreveu a trajetória de toda a construção dos primeiros equipamentos de compactação dinâmica. O mesmo contextualizou as dificuldades práticas de realizar a técnica através da queda livre seja no desgaste de peças, desvio da lança do peso e ineficiência da mão de obras, com isso foram desenvolvidos os primeiros equipamentos com uso de cabos de baixa capacidade (limitados a 15 tf) atingindo assim profundidades de tratamento em torno de 8 a 10 m.

Em termos de equipamentos, especificações e procedimentos de ensaios, muitos pesquisadores descreveram esta técnica com variações de altura e peso em função do tipo de solo e condições melhoramento a serem atingidas. A técnica de compactação dinâmica é realizada pela queda de um peso de

compactação (“*pounders*”) com massa de 10 a 40 toneladas, de uma altura de 10 a 40 m no solo, cuja área tratada é configurada em *raster*, onde nos centros, o peso é descarregado. (JESSBURGUER E BEINE, 1981)

Mayne, Jones e Dumas (1984) afirmaram que a compactação dinâmica envolve o uso de blocos de aço pesado ou concreto pesando tipicamente 5 a 20 toneladas (4,5 a 18 toneladas) que são lançados em queda livre de alturas de até 30 m usando guindastes de esteiras pesadas. Esta ordem de energia de compactação permitirá a melhoria de solos compressíveis a profundidades de até 50 pés (15 m). Com equipamento especial é possível soltar pesos mais pesados e, assim, afetar os solos a profundidades de 30 m (100 pés). O total acumulado de níveis de energia tipicamente varia de 30 a 150 pés.ton (100 a 400 ton.m / m<sup>2</sup>). Hamidi (2011) citou que a energia de impacto é fornecida pela queda de um peso pesado de uma altura significativa. A massa do peso de compactação é na maioria das vezes na faixa de 8,0 a 25 tf, embora sejam usadas, ocasionalmente, pás mais leves ou mais pesadas. As alturas de queda estão geralmente na faixa de 10 a 20 m.

Abaixo serão citados os equipamentos de compactação dinâmica mais usuais no setor de Geotecnia no mundo, juntamente com suas descrições.

##### 4.1 Estruturas treliçadas

Hamidi (2014) informou que o tripé (Ver Figura 4) é uma estrutura extremamente leve que é capaz de fornecer 1.600 tm de energia por impacto, lançando um peso de 40 toneladas a uma altura de 40 m. Semelhante à máquina 700 tf.m, essa sonda também poderia ser remontada e foi usada com sucesso em vários países, incluindo Estados Unidos, Japão, República Dominicana, Bangladesh e México. O'Brien e Guptan (1984) mencionaram uma planta de fertilizante em Ashuganj, Bangladesh, que foi compactada a profundidades de até 20 metros através de um peso de 40 toneladas a uma altura



de 25 metros em queda livre por intermédio de um tripé especialmente projetado.



Figura 4. Tripé de Menard usado na compactação dinâmica (Fonte: Hamidi, 2014)

#### 4.2 Equipamentos em plataformas móveis com lanças treliçadas *Onshore*

Hamidi, Nikraz e Varaskin (2011a) afirmaram que para superar as limitações de levantamento do guindaste, Menard desenvolveu e fabricou suas próprias plataformas. O equipamento de 7 MN.m, mostrado na Figura 5, foi capaz de levantar pesos de 25 tf. A capacidade de montar e desmontar esta plataforma facilitou seu transporte e fez uma escolha atraente para o projetos no exterior.



Figura 5. Equipamento de compactação dinâmica com energia de 7 MNm (Fonte: Hamidi, 2014)

#### 4.3 Equipamentos dinâmicos *Onshore* – Rapid Impact Compaction (RIC)

Do ponto de vista histórico, o RIC derivou do compactador de pista rápida que foi originalmente desenvolvido no início dos anos 90 pela BSP *International Foundations Limited* em conjunto com o ministério da defesa britânico como um meio de reparar rapidamente as crateras de bombas nas pistas de aterrissagem. Com isso, uma pesquisa subsequente do *Building Research Establishment* levou ao desenvolvimento de equipamento de uso civil montada através de uma escavadeira ou guindaste sobre esteiras, uma versão modificada do Martelo Hidráulico BSP 35 (ADAM E BRANDL, 2009)

Lauzon *et al.* (2011) afirmaram que o equipamento possui um martelo hidráulico especialmente adaptado, que age sobre uma base ou um pé articulado especial, como pode ser visto na Figura 6.



Figura 6. Equipamento sobre esteiras de compactação – RIC (Fonte: Lauzon *et al.*, 2011)

O martelo é geralmente equipado com um peso de aço de 7 a 9 toneladas, a uma altura máxima de 1,2 metros. A tampa de condução ligada à base permite a articulação. A base de impacto de aço tem um diâmetro de 1,5 metros. Hamidi (2014) restringiu o peso a faixas de 5 a 9 toneladas, mas cita valores iguais da altura e do diâmetro do peso e complementa afirmando que a taxa de golpeamento é de 40 a 60



golpes/min. Mohammed, Hashim e Salman (2010) comentaram que em seus estudos foi adotado para tratar os solos granulares fofos no local, pesos com 7 toneladas, 35 golpes / min e altura de queda de 0,8 m. Serridge e Synac (2006) comentaram valores equivalentes a respeito da altura, peso de compactação e diâmetro.

Lauzon *et al.* (2011) afirmaram que a energia por golpe do RIC é da ordem de 25 a 40 vezes menor do que a típica energia por golpe usada na compactação dinâmica. Logo, para se obter melhoria significativa, o dispositivo deve aplicar um maior número de golpes obedecendo uma determinada frequência.

A técnica da compactação dinâmica *offshore* por navios (ver Figura 7a) também foi realizada pela Menard em projeto portuário no Kuwait. Foi usado um peso de 32 toneladas ( ver Figura 7b) para compactar uma camada de pedra de 2 m a 10 m sob a água, conforme Figura 7.



Figura 7. Equipamento de compactação dinâmica *offshore* em barcos de grandes dimensões (Fonte: Hamidi, 2014)

Antes da colocação das seções pré-fabricadas de uma doca seca em Lagos, Nigéria, a compactação dinâmica foi transportada em uma área de 13.800 m<sup>2</sup> em 1979. Inicialmente, o fundo do mar foi escavado a -15 m RL (nível reduzido) e aterrado com 1 m de preenchimento de rochas. O melhoramento do solo foi realizado com um tirante de 40tf com a intenção de tratar 15 m de solo, com até 5 passadas de compactação dinâmica foram aplicados em alguns locais. (HAMIDI, 2014)

Hamidi (2014) comentou do uso de plataformas marítimas para compactação dinâmica com pesos de dimensões de 2,3 m x 2,3 m. A Figura 8 exemplifica a compactação dinâmica realizada por uma barçaça de dimensões 15 x 50 m no projeto de terminal 3 e 4 de containers da *Pasir Panjang* (do Sudeste asiático) entre os anos 2007 e 2013.

Antes da colocação das seções pré-fabricadas de uma doca seca em Lagos, Nigéria, a compactação dinâmica foi transportada em uma área de 13.800 m<sup>2</sup> em 1979. Inicialmente, o fundo do mar foi escavado a -15 m RL (nível reduzido) e aterrado com 1 m de preenchimento de rochas. O melhoramento do solo foi realizado com um tirante de 40tf com a intenção de tratar 15 m de solo, com até 5 passadas de compactação dinâmica foram aplicados em alguns locais. (HAMIDI, 2014)

Hamidi (2014) comentou do uso de plataformas marítimas para compactação dinâmica com pesos de dimensões de 2,3 m x 2,3 m. A Figura 8 exemplifica a compactação dinâmica realizada por uma barçaça de dimensões 15 x 50 m no projeto de terminal 3 e 4 de containers da *Pasir Panjang* (do Sudeste asiático) entre os anos 2007 e 2013.



Figura 8. Equipamento de compactação dinâmica *offshore* em plataformas marítimas. (Fonte: Hamidi, 2014)



A natural presença do empuxo da água representa um meio resistente a penetração do peso. Sabendo disso, as alturas de queda durante o teste foram ajustadas para 5 m acima do nível do leito marinho. Registros da velocidade do guincho da grua durante as obras indicam que as velocidades máximas de queda foram da ordem de 430m/min. Esta velocidade é equivalente a uma queda livre do peso de compactação a uma altura de queda de 2,6 m (no ar), e verifica a suposição original de que uma grande parte das energias cinemáticas dos golpes teriam sido minimizadas pela presença da resistência da água. A resistência da água reduz a eficiência do impacto e consequentemente as equações desenvolvidas para estimar a profundidade da melhoria do solo (D) em compactações dinâmicas *Onshore* não se aplicam a compactação dinâmica offshore (HAMIDI, 2014).

## 5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DINÂMICA - PROJETO JABER AL AHMAD CITY (KWAIT BAY)

A área do projeto, *Jaber Al-Ahmad City*, está localizada na costa planície do *Kuwait Bay* cerca de 25 km a oeste da Cidade do Kuwait, conforme mostrado na Figura 9. O projeto fez parte do Novo Kuwait desenvolvimento de cidades. Envolve a construção de 4134 moradias, estradas, 58 edifícios de apartamentos, torres de água, oleodutos, escolas, supermercados, uma cidade olímpica e um centro de juventude. A área do projeto é de cerca de 11 milhões de m<sup>2</sup>. Além disso Figura 9 conjuntamente a Tabela 2 ilustra o perfil do solo e informa a quantidade de golpes, resistência ao cisalhamento e teor de fino das camadas em função da profundidade, respectivamente.

A Figura 10 apresenta um típico arranjo da área experimental mostrando as fases da compactação (Ver tópico 3.1) de melhoria de solo e locais de testes de campo (SPT, CPT e PMT). Na mesma figura ilustra a malha de compactação dinâmica, onde foi fixado que a altura de queda seria de 12 a 20 m para as fases

1 e 2 e na fase *Ironing* de 10 a 16 m. Além disso, peso do martelo de compactação dinâmica foi de 15 tf para todas as fases, cujo número médio de golpes foi 8 (faixa de 6 a 12) para fases 1 e 2 e na fase *Ironing* de 2 a 4 golpes.

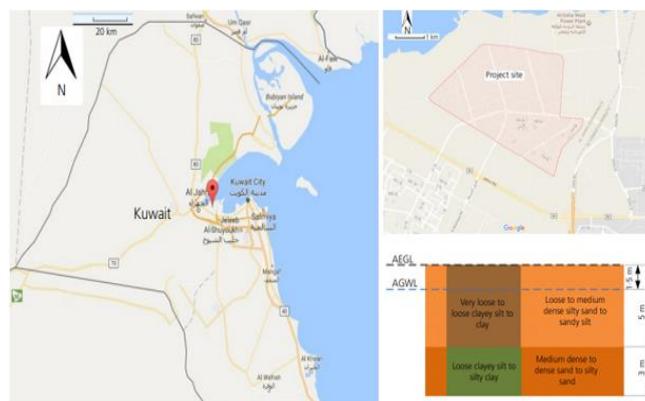


Figura 9. Localização do projeto *Jaber Al-Ahmad City* juntamente com o perfil do solo local (Fonte: Tarawneh *et al.*, 2017)

Tabela 2. Parâmetros e características do solo em função da profundidade (Fonte: Tarawneh *et al.*, 2017)

Tipo de Solo	Profundidade (m)	Golpes (unid.)	qc (MPa)	% finos
Silte Arenoso para Areia Siltosa (Fofa a Medianamente Compacta)	0,0 - 5,0m	10 - 19	5 - 13	< 30
Argila siltosa para Argila muito mole a mole		2 - 5	1 - 5	> 75
Areia para Silte Arenoso (Medianamente compacto para compacto)	5,0 - 8,0m	13 - 40	10 - 15	< 30
Argila siltosa para Silte Argiloso (Medianamente rijo para rijo)		7 - 10	5 - 10	> 30

Os testes foram realizados 72 h após o término trabalho de melhoria do solo para permitir a dissipação da poropressão. A Figura 13 apresenta os resultados do pré e pós-



tratamento Os resultados de CPT para DC (*Dynamic Compaction*) funcionam entre pontos de compactação (*Print*). Na região do topo (com profundidade de 1,5 m da superfície do solo) tem menor relação de resistência rigidez / ponta quando comparado com o perfil original do solo devido à aplicação da alta energia e à destruição da camada rígida encontrada próxima à superfície antes da melhoria do solo. No entanto, a notável melhoria foi alcançada entre os pontos de compactação abaixo do nível de aproximadamente + 7,5m e até a profundidade de correspondente à resistência ponta de 40 MPa através do ensaio CPT.

A Figura 12 compara os resultados do pré e pós-tratamento através da DC entre pontos de compactação (impressões). Devido à alta rigidez do solo, o teste SPT foi capaz de atingir até a profundidade de 10 m em relação ao nível de cota trabalho, embora tenha se atingido o critério de parada a uma profundidade de 4,0 m. Melhorias mais significativas são alcançadas a profundidades superiores a 3,0 m do nível do solo. No entanto, foi percebido um menor aumento na contagem de golpes de SPT na parte superior em função dos testes ocorrerem entre pontos, que é a região menos afetada pela compactação dinâmica.

A Figura 13 compara os resultados do pré e pós-tratamento através do ensaio PMT para DC entre pontos de compactação (*Print*). Foi constatado uma melhoria significativa dentro da espessura testada. No entanto, houve dificuldade de penetração do equipamento do PMT próximo a superfície devido a alta rigidez do solo melhorado, consequentemente foi testado apenas os dois metros superiores do perfil.

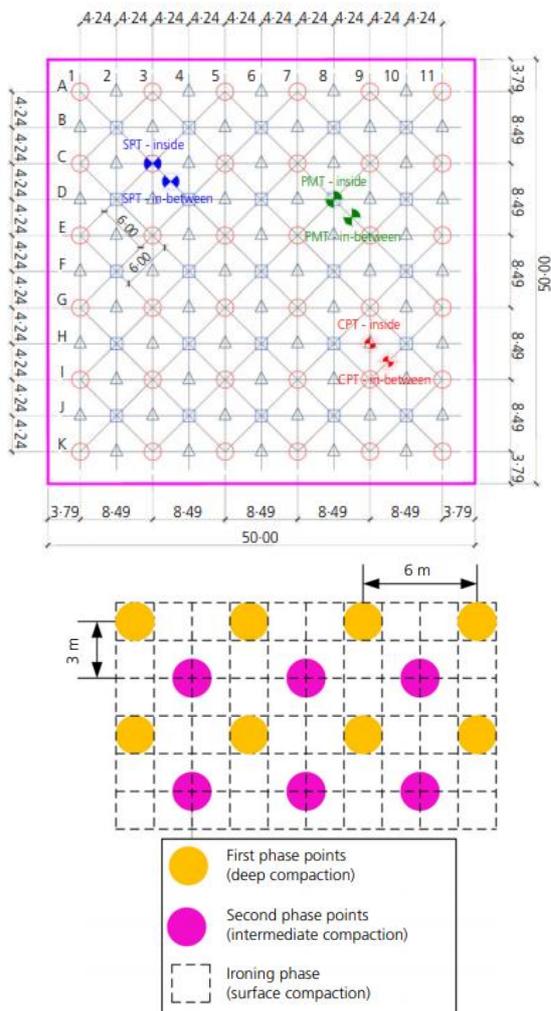


Figura 10. Localização do projeto *Jaber Al-Ahmad City* juntamente com o perfil do solo local (Fonte: Tarawneh et al., 2017)

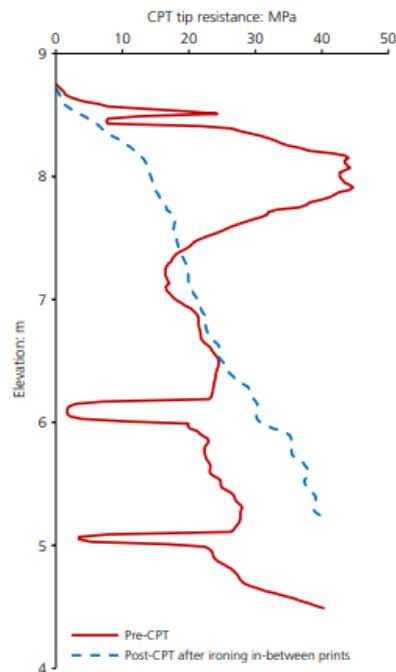


Figura 11. Avaliação da eficiência da compactação dinâmica no projeto *Jaber Al-Ahmad City* através do Ensaio CPT (Fonte: Tarawneh et al., 2017)

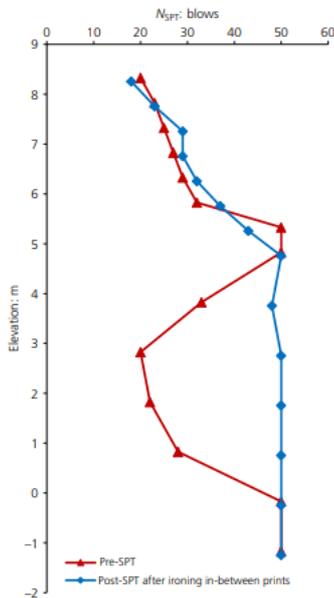


Figura 12. Avaliação da eficiência da compactação dinâmica no projeto *Jaber Al-Ahmad City* através do Ensaio SPT. (Fonte: Tarawneh *et al.*, 2017)

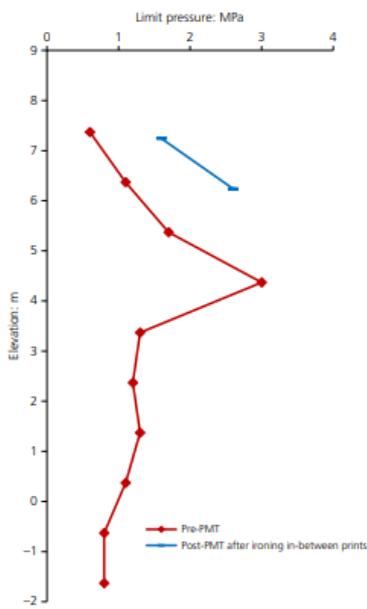


Figura 13. Avaliação da eficiência da compactação dinâmica no projeto *Jaber Al-Ahmad City* através do Ensaio PMT (Fonte: Tarawneh *et al.*, 2017)

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseado nas informações mencionadas no trabalho acima é possível estabelecer determinadas considerações:

- A técnica da compactação dinâmica constitui uma alternativa viável para melhoramento de solos quando são considerados fatores como magnitude de volume de solo melhorado e sustentabilidade, aja vista que não há introdução de materiais que contribuam para modificação dos parâmetros de resistência e durabilidade como, por exemplo, materiais cimentantes;
- Mesmo com essa técnica consagrada em países da América do Norte, Europa e Emirados Árabes, no Brasil e demais países do Sul, é inexistente a sua utilização, mesmo proporcionando economia e eficiência no melhoramento. De uma forma geral, o melhoramento de solos no Brasil se fundamenta na aplicação de geossintéticos, drenos verticais, técnica de cimentação (Cimento e Cales) de solos e outros, que quando se fala em termos de vulto de aplicação são inviáveis;
- A compactação dinâmica é dividida em fases e que por sua vez a energia é variável em função de cada fase, sendo necessário obedecer a um determinado nível de espaçamento para que se possa atingir um nível de eficiência aceitável;
- Lukas (1995) apresentou sistema de classificação de solos para permitir uma avaliação prévia sobre a eficiência da compactação dinâmica, entretanto essa classificação restringe-se a depósitos sedimentares (argilitos e arenitos), sendo inviável a sua utilização em solos coesivos friccionais conforme explicado por Rizzon (2016);
- O melhoramento de solos realizado pela técnica da compactação dinâmica depende da energia potencial da queda do peso e que é variável dependendo do tipo de equipamento e do local. Foi



- demonstrado que é possível realizar tanto *Onshore* quanto *Offshore*, sendo que na técnica *Offshore* se torna importante considerar o empuxo hidráulico durante o impactado do peso;
- f) O coeficiente empírico ( $\eta$ ) é variável dependendo do tipo de solo melhorado, conforme Tabela 2 e varia entre 0,3 a 0,8. Ainda não existem relatos de coeficientes empíricos em solos coesivos friccionais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo fomento à pesquisa científica e ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo fornecimento da infraestrutura física e suporte técnico.

## REFERÊNCIAS

- Feng, S. J., Shui, W. H., Tan, K., Gao, L. Y. e He, L. H. (2011) "Field Evaluation of Dynamic Compaction on granular deposits." ASCE, *Journal of performance of constructed facilities*, vol. 25, nº 3, p. 241-249.
- Gambin, M. P. (1983) "The Menard Dynamic Consolidation at Nice Airport", *Proceedings, 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, pp. 231-239.
- Hamidi, B.; Nikraz, H. e Varaskin, S. (2011). Advances in dynamic compaction. *International Conference on Advances in Geotechnical Engineering*, Perth, Australia, p. 433 – 436.
- Hamidi, B. (2015). *Distinguished Ground Improvement Projects by Dynamic Compaction or Dynamic Replacement*. PHD Thesis. Curtin University, Western Australia.
- Indratina, B.; Chu, J. e Rujikiatkamjorn, C. (2015) *Ground improvement case histories, compaction, grouting, and geosynthetics*. BH Elsevier: Oxford, 796p.
- Kédzi, A. (1979). "Stabilized earth roads". Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing.
- Kopft, F., Paulmichl, I. e Adam, D. (2010). "Modelling and simulation of heavy tamping dynamic response of the ground", *Design in European Practice, Bratislava, Slovak Republic*, p. 1 -10.
- Lauzon, M., Morel, J. F., Briet, S. e Beaton, N. F. (2011). "Ground vibrations induced by dynamic compaction and rapid impact compactations." *Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, s/vol., s/nº, p. 1-8.
- Leonards, G. A., Hotz, R. D. e Cutter, W. A. (1980) "Dynamic compaction of granular soils." *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 116, nº 3, pp. 514-527.
- Lukas, R. G. (1995). Geotechnical Engineering Circular No. 1: *Dynamic Compaction*. Springfield, Virginia: National Technical Information Service.
- Mayne, P. W.; Jones, J. S. e Dumas, J. Y. (1984) "Ground Response to Dynamic Consolidation," *Journal of the Geotechnical Engineering*, No. 110, p. 757-774.
- Menard, L. e Broise, Y. (1975) "Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation," *Geotechnique* 25, No. 1, Mar., pp. 3-17.
- Menard. Disponível em: <http://www.solhydro.sk/--27-1083-dynamic-compaction-dc>. Acesso em: 28 de Fevereiro de 2019.
- Miao, L., Chen, C. e Hong, Z. (2006) " Application of dynamic compaction in highway: a case study" *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, S/No., pp. 91-99.
- Mitchell, J. K. (1981). "Soil Improvement, State-of-the-Art Report," *Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics*, Vol. 4, Session 12, Stockholm, p. 509-565.
- Mohammed, M. M.; Hashim, R. e Salman, A. F. (2010). "Effective improvement depth for ground treated with rapid impact compaction." *Scientific Research and Essays*, vol. 5, nº 18, pp. 2686-2693.
- Natário, G. (2017) "Obras de melhoramento e reforço de solos". *Revista Geotecnia*, S/vol., No.139, pp. 77-98.
- Pan, J. L.; Selby, A. R. (2001). *Analysis of Dynamic Compaction of Loose Soils under impact loads*. 40<sup>th</sup> International Conference on recent advances in



Earthquake Engineering and Soil Dynamics, vol. 4,  
p. 1-7, Missouri.

Qian J. H.(1987) “Dynamic consolidation: from practice to theory.” *Proceedings 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Kyoto, nº 1.

Rizzon, M. (2016). *Efeitos da compactação em solos residuais*. Msc Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul 85p.

Serridge, C. J. e Synac, O. (2006). “Application of the Rapid Impact Compaction (RIC) technique for risk mitigation in problematic soils.” *10<sup>th</sup> Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*. S/Vol., Nottingham, pp.1 – 13.

Smolczyk, U. (1983) “Deep compaction: general report.” *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, nº 1, p. 1105–1116.

Slocombe, B. C. (2013) *Dynamic compaction*. Ground improvement. 3<sup>o</sup> edition, Chapman & Hall, Glasgow, German.

Tan, Y. (2007). “Deep Dynamic Compaction of Liquefaction-potential Granular Backfill.” *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Thessaloniki: Springer.

Tarawneh, B.; Sbitnev, A.; Hakam, Y. (2017) “Lessons learned from 11 million m<sup>2</sup> of dynamic compaction and replacement.” *Proc. of the institution of civil engineers, Ground improvement*, vol. 170, nº G14, p. 208 - 217.

Van impe, W. F. e Bouazza, A. (1996) Densification of domestic waste fills by dynamic compaction, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, s/nº, p. 879 - 887.

Yasrobi, S. S. e Asghari, E. (2004) “Dynamic compaction in Assalouyeh, Iran.” *Proceedings: Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Missouri University of Science and Technology, p. 13 - 17.