

PAVIMENTO de CONCRETO



ADENSAMENTO DO CONCRETO POR VIBRAÇÃO

Gestão de Equipamentos e Obras

Dezembro 2005



Associação
Brasileira de
Cimento Portland

Apresentação

A falta de literatura especializada em nosso idioma e o comportamento das pessoas envolvidas no trabalho de adensamento do concreto - em obras diversas, mas principalmente no que se refere a pavimentos, pátios de aeroportos e afins - motivaram a realização deste trabalho.

A pesquisa demandou a coleta de dados e informações em diversas fontes na literatura estrangeira. E a ordem de apresentação, neste trabalho, pretendeu tornar os assuntos compreensíveis na medida em que forem se desenvolvendo.

Em benefício da didática, alguns exemplos práticos foram inseridos no final do texto.

A aplicação da vibração do concreto em outras atividades também foi abordada, mas de forma mais resumida.

Engº José Ricardo R. Goulart
Gestor de Equipamentos da ABCP

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	5
a) Resistência	
b) Impermeabilidade	
c) Aderência	
d) Aparência superficial	
e) Densidade	
f) Economia	
g) Qualidade	
h) Otimização do Traço	
i) Redução nas Variações de Volume	
2. FUNDAMENTOS DA VIBRAÇÃO	7
3. MECANISMO DA VIBRAÇÃO NO CONCRETO	9
4. COMPACIDADE DO CONCRETO FRESCO	9
5. VANTAGENS	11
6. VIBRADORES	11
6.1. Vibradores internos	12
6.1.1. Raio de ação	
6.1.2. Comprimento da agulha	
6.1.3. Recomendações para o uso de vibradores internos	
6.1.4. Ações positivas durante a vibração	
6.1.5. Ações que devem ser evitadas	
6.1.6. Outras considerações	
6.1.7. Bateria de vibradores internos	
6.2. Planejamento no emprego de vibradores internos	19
6.2.1 – Intensidade de vibração	
6.2.2 – Capacidade volumétrica do vibrador	
6.2.3 – Quantificação da vibração	
6.2.4 – Aplicação	
6.3. Vibradores de superfície – réguas vibratórias	25
6.3.1 – Mecanismo da vibração superficial	
6.3.2 – Amortização das vibrações	
6.3.3 – Recomendações para a utilização de vibradores superficiais	
6.3.4 – Considerações finais sobre vibração com régua	

7. VIBRADORES EXTERNOS	29
7.1. Considerações finais sobre vibradores externos	31
8. MESAS VIBRATÓRIAS	31
9. EQUIPAMENTOS PARA PAVIMENTAÇÃO	32
9.1. Sistemas de vibração	33
9.2. Características dos vibradores	33
9.2.1 Vibrador hidráulico	
9.2.2 Vibrador elétrico	
9.3. Espaçamento entre vibradores	35
9.4. Velocidade de translação do equipamento	36
9.5. Profundidade e ângulo do vibrador	36
9.6. Tempo de vibração	36
10. OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES	37
10.1. Excesso de vibração no concreto	37
10.2. Intervalo de tempo entre o lançamento e vibração do concreto	38
10.3. Revibração do concreto	38
ANEXO 1 – Recomendações para a utilização de vibradores de imersão	39
ANEXO 2 –Exemplo de planejamento de plano de inserção	40
ANEXO 3 – Medição da frequência de vibradores internos	43
ANEXO 4 – Movimento harmônico simples	44
1) Equações do movimento harmônico simples	
2) Força centrífuga – aplicações	
3) Aceleração vibratória	
4) Torque	
ANEXO 5 – Cálculo da velocidade de translação de uma vibroacabadora de fôrmas deslizantes	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

O concreto pode ser considerado uma pedra artificial composta de uma mistura de cimento, agregados e água - e em alguns casos também de aditivos - que se forma pelo endurecimento da mistura água – cimento (pasta).

Sabe-se que para um mesmo traço, a resistência e outras qualidades do concreto, convenientemente adensado, melhoram à medida que diminui a quantidade de água na mistura. Assim, de dois concretos de mesmo traço, o que for preparado com menor quantidade de água – o que for mais seco – será o mais resistente. A finalidade do adensamento do concreto é alcançar a maior compactidade possível entre os agregados graúdos e miúdos.

O concreto fresco, ao ser lançado, apresenta no interior de sua massa ar aprisionado em forma de bolhas, formadas durante o processo de mistura, transporte e descarga, cujo volume chega a ser de 5% a 20% do volume total. De acordo com o grau de consistência do concreto fresco haverá maior ou menor quantidade de poros.

A vibração do concreto como um processo de adensamento elimina o ar aprisionado no interior da massa do concreto fresco. Quando o ar aprisionado é eliminado, algumas características do concreto tendem a melhorar, entre elas:

a) Resistência

Foi demonstrado que para cada 1% de ar aprisionado não removido a resistência do concreto diminui entre 5% e 6%, conforme indica o gráfico da Figura.

Pode-se observar que para 2,5% de vazios a redução na resistência será em torno de 20%.

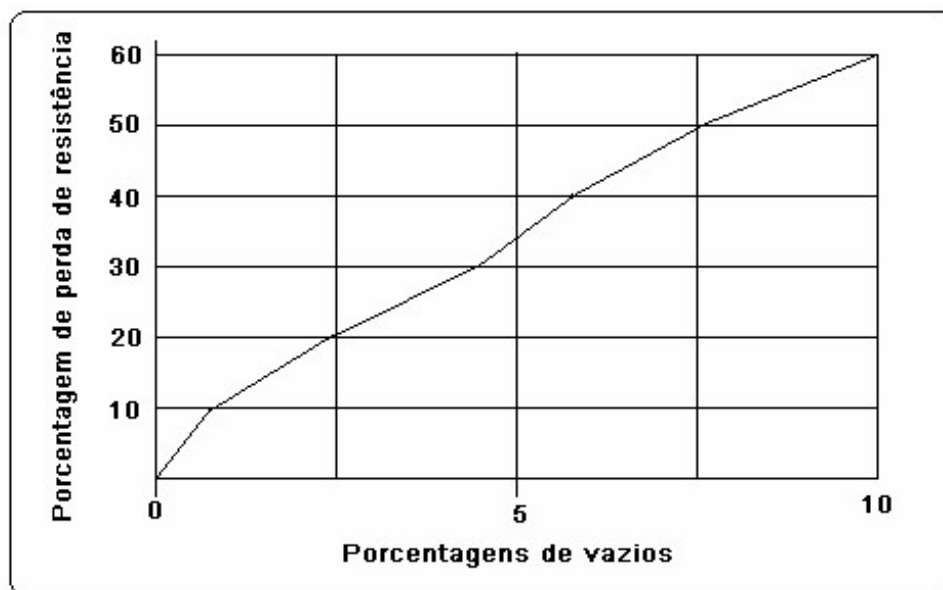


Figura 1 – Redução da resistência em função dos vazios

b) Impermeabilidade

Removido o ar, o concreto se torna mais denso, conseqüentemente mais impermeável. Esta característica faz com que o concreto suporte melhor a ação de líquidos agressivos e mantenha por muito tempo sua integridade superficial.

Mesmo não sendo imune ao ataque químico de algumas substâncias - como os ácidos, por exemplo -, o concreto vibrado apresenta melhor comportamento que o concreto sem vibração.

c) Aderência

A presença de vazios reduz a aderência entre o concreto e as barras de aço de reforço do pavimento – barras de transferência, de ligação. A eliminação dos vazios aumenta a aderência do concreto aos materiais metálicos.

d) Aparência superficial

O ar aprisionado gera irregularidades na superfície do concreto; a sua eliminação melhora a sua aparência.

e) Densidade

A densidade de um concreto colocado sem nenhum sistema de adensamento é da ordem de 2.200 kg/m³; de 2.300 kg/m³ se o adensamento for manual e de 2.400 kg/m³ quando se vibra adequadamente.

Quanto mais denso for o concreto, melhores serão suas características de resistência, durabilidade e impermeabilidade.

f) Economia

Considerando uma dada resistência, o emprego de vibradores permite diminuir o teor de cimento em torno de 20% em relação à quantidade que seria utilizada em um concreto aplicado sem a utilização deste recurso.

O emprego de vibradores possibilita utilização de concreto com a relação água/cimento (a/c) perto de 0,3, o que permite diminuir até 80 litros de água evaporável por m³ de concreto aplicado.

Quanto ao custo da mão-de-obra, duas pessoas utilizando vibradores obtêm o mesmo rendimento que seis pessoas adensando manualmente o concreto.

g) Qualidade

A vibração do concreto permite ajustar os traços de forma que melhorem os níveis de qualidade e homogeneidade do produto final.

h) **Otimização do traço**

O abatimento de um concreto para ser aplicado com vibradores poderá ser reduzido pela metade ou até menos do que o exigido para um concreto sem vibração.

A quantidade de agregado fino também poderá ser reduzida em 5%, o que permite diminuir o teor de água obtendo-se maiores resistências e melhor qualidade do concreto.

Em um ensaio realizado, onde um concreto com consumo de cimento de 350 kg/m³, cujo teor de agregados finos era de 36% e um abatimento alto aplicado sem vibração, se obteve uma resistência de 26 MPa aos 28 dias. Quando houve redução do teor de água para produzir um concreto com abatimento baixo, que exigia o uso de vibradores para sua aplicação, a resistência subiu para 35 MPa. Finalmente se estabeleceu um novo traço, diminuindo o agregado fino e a água, ainda mais, conseguindo-se uma resistência de 45 MPa, o que representa um acréscimo de 59% em relação ao primeiro traço.

i) **Redução nas variações de volume**

As variações de volume e as fissuras que surgem posteriormente são mais reduzidas nos concretos projetados para serem vibrados, consequência imediata de uma acomodação mais justa das partículas constituintes do concreto e do menor conteúdo de água evaporável. Para obter níveis desejáveis de resistência à compressão e impermeabilidade é necessário eliminar as bolhas de ar do interior do concreto, tornando-o mais denso e sua massa, mais compacta.

A ação dos capilares e as forças de atrito entre as partículas individuais do concreto só poderão ser vencidas mediante uma ação mecânica.

Ainda hoje, em pequenas obras, o concreto é socado manualmente, pisoteado e adensado de forma bastante primitiva. Entretanto, a aplicação de vibradores de alta frequência representa um avanço tecnológico, pois facilita o trabalho de adensamento nos mais diversos tipos de obras, de barragens e pavimentos a estruturas bastante delgadas.

2. FUNDAMENTOS DA VIBRAÇÃO

A vibração é definida em função da frequência e da amplitude do movimento.

a) **Frequência** - é o número de impulsos ocorridos em um determinado período.

b) **Amplitude** - é o deslocamento máximo do elemento vibrador entre dois impulsos.

Ambos os parâmetros – Frequência e Amplitude – estão correlacionados mecânica e inversamente, de maneira que para um mesmo vibrador, quando se aumentar a frequência, a amplitude diminui e vice-versa.

As observações e estudos matemáticos têm demonstrado que cada tamanho de partícula responde a uma frequência específica com uma amplitude máxima. Em altas frequências e pequenas amplitudes vibram as partículas finas, enquanto que as vibrações caracterizadas por baixas frequências e grandes amplitudes atuam sobre os agregados mais graúdos.

A alta frequência faz com que os agregados finos se movimentem rapidamente e com liberdade entre si, o que diminui a viscosidade da pasta de cimento e aumenta a fluidez do concreto.

Como as pequenas amplitudes associadas com altas frequências não atuam sobre os agregados graúdos, estes não se movem, possibilitando que a pasta de cimento flua ao seu redor, recobrando-os e diminuindo o risco de segregação.

O uso de baixas frequências e altas amplitudes é recomendado para concreto seco, com baixa relação água/cimento; mas se deve ter cuidado para que não ocorra segregação em consequência do movimento dos agregados graúdos afetados pelas altas amplitudes.

A maior parte do ar aprisionado se fixa nos agregados finos, consequência de sua maior área específica. Por esta razão, deve-se selecionar o vibrador tendo em conta que os aparelhos de frequência mais alta agitam as partículas mais finas, facilitando a expulsão de ar.

A Tabela 1 apresenta relações entre o tamanho dos agregados e as frequências de vibração que os afetam.

A frequência máxima utilizada é da ordem de 12.000 rpm a 14.000 rpm (200 a 230 Hz), porque, para esta faixa de frequência, a amplitude é tão pequena que a vibração se amortece.

Durante a vibração o concreto aparentemente se mostra fluido e é bastante evidente a sua mobilidade. Entretanto, deve-se lembrar que o motivo da vibração é a eliminação do ar, não dar mobilidade ao concreto.

Tabela 1

Frequência Hz.	Descrição e tamanho da partícula (mm)				
	Areia fina 0,08	Areia grossa 0,5	Agregado fino 2,0	Agregado médio 7,0	Agregado grosso 25,0
200 - 150					
150 - 100					
100 - 50					

Obs.: 1 Hz = 60 rpm

3. MECANISMO DA VIBRAÇÃO NO CONCRETO

A multiplicidade das superfícies de contato entre os agregados desenvolve esforços de atrito entre eles, impedindo sua mobilidade. As oscilações de alta frequência geradas por equipamentos vibradores e introduzidas na massa do concreto são transmitidas aos seus componentes. Cada tamanho de partícula responde a uma frequência específica com uma amplitude máxima.

Os grãos entram em vibração e se chocam uns com os outros. Simultaneamente, as forças de atrito entre os componentes da mistura se reduzem substancialmente.

É gerado um movimento relativo entre as partículas. As forças de adesão e de atrito se reduzem ao mínimo. Passam de 20 kPa, para o concreto fresco em repouso, para 1 kPa, durante a operação. É criado um processo de fluidificação.

Ao mesmo tempo, a água em excesso e as bolhas de ar retidas na massa do concreto devido à capilaridade e à tensão superficial são liberadas e escapam até a superfície.

Com a eliminação de parte da água, diminui a viscosidade da argamassa, que passa a atuar como lubrificante, reduzindo as forças de atrito internas. O concreto fresco passa a ter as características de um líquido viscoso. Os agregados se movimentam buscando uma posição estável, devido ao seu peso próprio. A argamassa também ascende até a superfície, preenchendo espaços vazios enquanto os agregados se mantêm bem posicionados. O concreto se compacta preenchendo completamente a forma do produto que se queria executar.

Pode-se considerar adensado um concreto quando, ainda fresco, ele não mais se abate, quando a superfície apresenta uma capa fina de argamassa e somente são algumas poucas bolhas de ar que se soltam. Um concreto fresco bem adensado deverá conter, em geral, um teor de ar incorporado em torno de 1,5%.

4. COMPACIDADE DO CONCRETO FRESCO

A compacidade do concreto fresco é obtida graças ao efeito de adensamento. O maior ou menor esforço de adensamento tem relação direta com a composição do concreto fresco. Portanto, cada concreto terá uma certa compacidade, podendo depender dos seguintes fatores:

- a) Relação água / cimento
- b) Composição granulométrica
- c) Forma e rugosidade dos agregados

Para recobrir as superfícies dos grãos, preencher os espaços vazios entre eles e permitir uma boa trabalhabilidade do concreto, é necessário uma quantidade mínima de argamassa. Se a quantidade de argamassa for alta, resultará em um concreto muito plástico. Nestas condições, será baixo o esforço de adensamento, já que terá havido um deslocamento entre agregados sem auxílio de vibração. Para o caso de concretos mais espessos e pobres em água, torna-se necessária uma alta intensidade de adensamento para que se obtenha fluidez do concreto.

Para avaliar a compacidade de um concreto fresco, adota-se procedimento prescrito pela norma DIN 1048 que utiliza a “caixa de Walz”. O concreto fresco é colocado em uma fôrma prismática, com dimensões padronizadas, até completar seu volume. Em seguida, o concreto é vibrado com um vibrador de imersão até ser devidamente adensado.

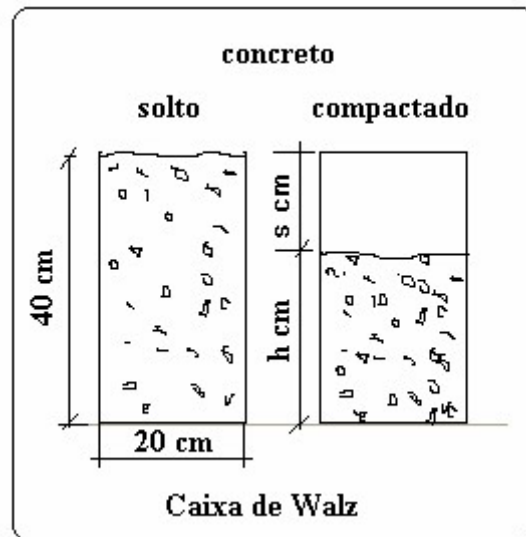


Figura 2 – Teste de compacidade

Mede-se a altura do concreto adensado na fôrma e, por meio de uma fórmula, determina-se o valor do fator de adensamento.

$$\text{Fator de compactação - } V = \frac{400}{h} = \frac{400}{400-s}$$

Quanto maior for o valor de V, tanto menor será a densidade alcançada pelo concreto fresco durante o lançamento e tanto maior será o trabalho necessário para se conseguir um adensamento completo.

- Misturas muito ricas em água têm um fator de adensamento muito baixo
- Um concreto fresco plástico apresenta fator de adensamento de aproximadamente $V = 1,10$
- Um concreto fresco espesso apresenta fator de adensamento de aproximadamente $V = 1,35$, e somente poderá ser adensado com vibradores internos muito potentes

5. VANTAGENS

O que caracteriza a vibração é permitir, em tempo muito curto, o adensamento perfeito de concretos de consistência mais seca do que seria praticável empregar, nas mesmas condições, usando-se outro processo de adensamento.

Como, por exemplo, em peças armadas de dimensões reduzidas, que exigiriam um concreto com abatimento de 12 a 15 cm; a aplicação de vibração nas mesmas circunstâncias possibilita o emprego de concreto com abatimento de 5 cm, com menor relação água/cimento.

São inúmeras as vantagens de compactar o concreto fresco por vibração:

- a) Redução da quantidade de cimento, utilizando-se misturas mais secas.
- b) Melhor aderência entre juntas de construção.
- c) Melhor aderência com as ferragens e armaduras, principalmente quando os espaços forem reduzidos.
- d) Melhor densidade, homogeneidade e impermeabilidade.
- e) Maior resistência à compressão.
- f) Qualidade superior nas superfícies de concreto aparente.
- g) Maior durabilidade.

6. VIBRADORES

Basicamente, existem cinco tipos de vibradores: internos, externos, de superfície (régua vibratória), de rolos vibratórios e mesas vibratórias.

Cada tipo de vibrador tem seu campo adequado de trabalho, suas vantagens e desvantagens, alcances e limitações. Neste trabalho, daremos mais atenção aos vibradores internos e de superfície, utilizados em pavimentos de concreto.

6.1. Vibradores internos

Estes vibradores são chamados normalmente de imersão ou de agulhas. São os mais comuns, utilizados em pavimentos, vigas e colunas. Inseridos no concreto fresco, induzem a plastificação e adensamento por meio de oscilações.

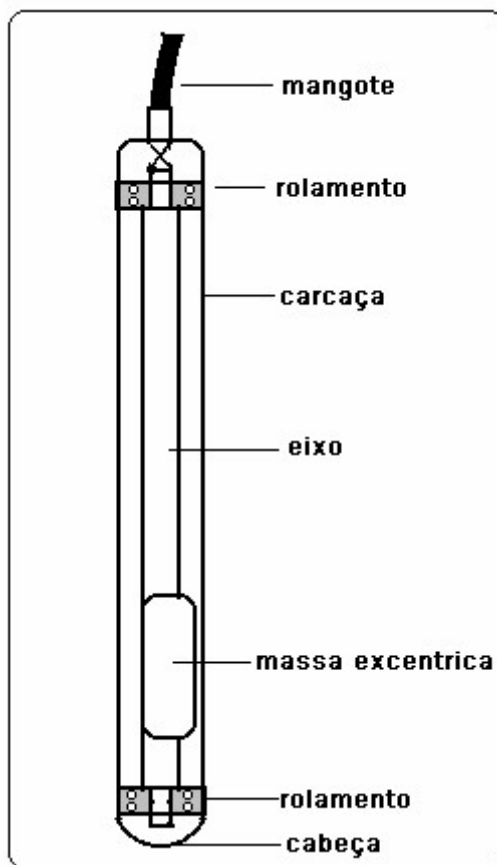


Figura 3 – Esquema básico de um vibrador de imersão

Basicamente, os vibradores de imersão têm a configuração semelhante à apresentada na figura 3. Uma massa excêntrica localizada no eixo principal gira, gerando forças centrífugas com a conseqüente vibração do equipamento.

O acionamento dos vibradores poderá ser efetuado por:

- Eixos flexíveis acoplados a motores elétricos ou a gasolina
- Motores elétricos de alta frequência incorporados no interior do vibrador
- Sistema de ar comprimido
- Sistema hidráulico, com motor hidráulico interno, vibroacabadoras de concreto (GOMACO e CMI)

A vibração que se consegue com os vibradores internos é a mais eficiente, porque a agulha atua diretamente no concreto e seu manuseio é mais fácil.

A frequência de vibração de um vibrador imerso em concreto varia até 12.000 ciclos por minuto. É sugerido um mínimo entre 3.500 e 5.000, e recentemente tem-se considerado preferíveis valores entre 4.000 e 7.000 ciclos, com uma aceleração vibratória não menor que 3g (anexo 4 item 3).

Os vibradores de imersão se classificam de acordo com as características mecânicas da vibração e com base nos diâmetros do elemento que transmite a vibração ao concreto, denominado simplesmente de agulha ou “cabeça do vibrador”.

Na maioria dos trabalhos, utilizam-se vibradores com diâmetros que variam de 25 a 75 mm. Em grandes obras, tais como barragens, podem ser utilizados vibradores especiais com diâmetros até 180 mm.

Durante a vibração, a maior eficiência se alcança utilizando-se agulhas com diâmetros compatíveis com as dimensões das fôrmas. A agulha deverá ser movimentada com facilidade de um ponto para outro, e é aplicada a distâncias entre 0,50 m e 1,0 m, durante 5 a 30 segundos, dependendo da consistência do concreto.

O item 6.2 apresenta um roteiro para determinar um plano de inserção de vibradores internos estabelecendo relações entre distâncias e tempos de inserções.

O final da operação de adensamento poderá ser avaliada pela aparência da superfície do concreto. Esta não deverá apresentar falhas nem excesso de argamassa, assim como deve estar livre de bolhas de ar.

O vibrador deverá ser retirado lentamente do concreto, de modo que a cavidade deixada por ele se feche completamente sem aprisionamento de ar. Se o concreto for depositado em camadas, o vibrador deverá ser inserido em toda a camada recém-depositada, penetrando na camada inferior se ela ainda estiver plástica, evitando-se a formação de um plano de menor resistência na junção das duas camadas. Assim, se obterá um concreto monolítico.

A Tabela 2 apresenta características dos vibradores internos e suas aplicações em função do concreto aplicado.

Por se tratar de condições genéricas, será necessário realizar testes de adequação no início dos trabalhos no canteiro de obras.

Tabela 2 – Vibradores internos – Aplicações

DIÂMETRO mm	FREQÜÊNCIA rpm	COMPRIMENTO mm	RAIO DE AÇÃO mm	CAPACIDADE DE COMPACTAÇÃO m ³ /h ✱	APLICAÇÃO
25	10000	295	180	1,80	Concreto plástico ou fluido V = 1,06 Em secções delgadas. Como complemento de vibradores de maior diâmetro
35	10000	310	280	3,60	Concreto plástico V = 1,10. Em muros, colunas, vigas e lajes delgadas. Abatimento >100 mm.
45	10000	385	380	6,60	Concreto plástico ou seco, com V = 1,15. Em muros, colunas, vigas, lajes e pavimentos. Abatimento em torno de 80 mm
55	10000	410	510	8,50	Concretos densos e estruturais com V > 1,20
65	10000	385	600	10,00	Abatimento < 50 mm

✱ Tabela 5.1.5 do ACI Guide 309R

Obs.: Foram realizados testes no Laboratório de Concreto da ABCP, comparando-se valores de abatimento e adensamento (Waltz) de amostras de concreto, que ofereceram os seguintes resultados:

- Concreto seco: abatimento = 30 mm; fator de adensamento = 1,20
- Concreto plástico: abatimento = 70 mm; fator de adensamento = 1,10
- Concreto fluído: abatimento = 110 mm; fator de adensamento = 1,05

Estes valores são meros resultados de um teste, não devendo ser considerados como padrões definitivos.

6.1.1. Raio de ação

A distância até a qual o vibrador consegue compactar o concreto é denominada raio de ação. A Tabela 2 apresenta um valor básico de raio de ação para os diferentes diâmetros das agulhas, porém a eficiência do vibrador dependerá das características do concreto e do modo e condições de operação.

Em princípio, um diâmetro maior associado a uma alta freqüência gera um raio de ação maior. Apesar de a Tabela 2 apresentar alguns valores, na prática, são necessários alguns testes com concretos e situações específicas para se estabelecer um raio de ação adequado.

A determinação do raio de ação é importante porque, com base neste valor, se define tanto o espaçamento como o padrão adequado de inserção que garanta a vibração de todo o concreto.

Experimentalmente, pode-se determinar o raio de ação de um vibrador procedendo-se da seguinte maneira:

- Colocar o concreto fresco em uma fôrma de determinadas dimensões e com o mínimo de 40 cm de altura
- Mergulhar o vibrador no centro da forma

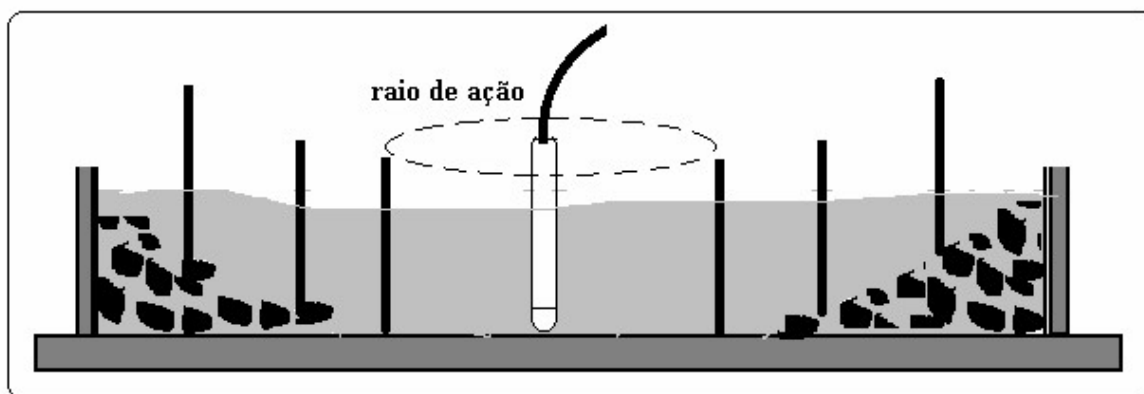


Figura 4 – Determinação prática do raio de ação

- Colocar – sem pressionar – uma barra de aço de 20 mm de diâmetro e 1,0 m de comprimento, verticalmente, em vários pontos no concreto, a diferentes distâncias do vibrador, onde ela irá penetrar completamente ou não
- O raio de ação do vibrador será determinado pela distância do seu centro até a barra que penetrar totalmente no concreto fresco em um minuto

Nas Figuras 5 e 5a são apresentadas algumas configurações mostrando posicionamentos corretos e incorretos de vibradores. O padrão de espaçamento mais utilizado é 1,5 vez o raio de ação, o que garante uma boa interferência entre as regiões vibradas.

Se, experimentalmente, for determinado que o raio de ação de um vibrador é 20 cm, o espaçamento recomendado será de 30 cm.

Constitui-se em uma boa prática de trabalho estabelecer um plano de inserção dos vibradores em função do dimensionamento das fôrmas a serem concretadas. Neste caso, o espaçamento entre inserções poderá ser diferente do recomendado acima, porém mais eficiente.

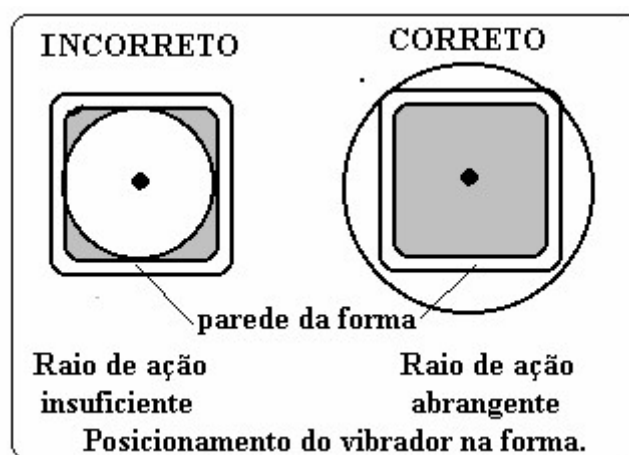


Figura 5 – Posicionamento do vibrador em uma fôrma quadrada

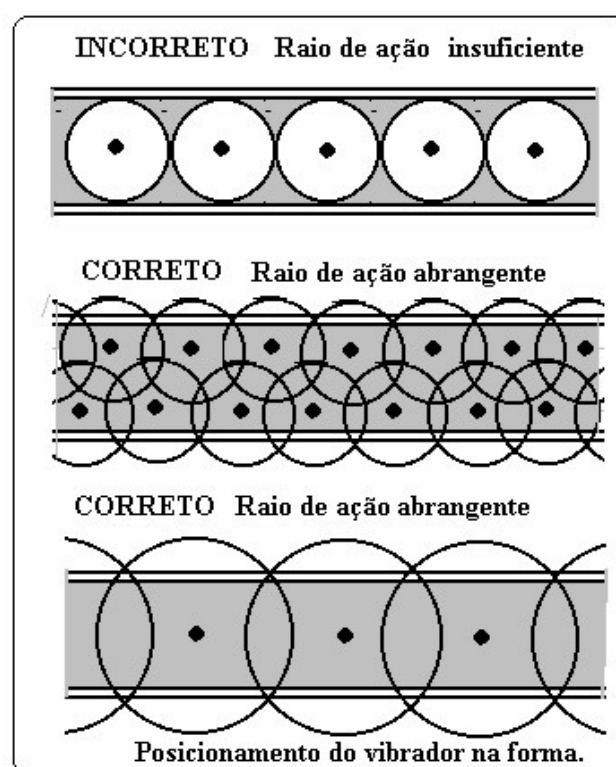


Figura 5a – Posicionamento do vibrador

6.1.2. Comprimento da agulha

Como somente a agulha age sobre o concreto, a profundidade da laje a ser vibrada não deverá ser superior ao seu comprimento. A maioria dos vibradores com diâmetro até 50 mm tem comprimento entre 350 mm a 600 mm; já os de comprimento entre 350 mm e 450 mm possuem diâmetros superiores.

6.1.3. Recomendações para o uso de vibradores internos

A vibração do concreto, em qualquer sistema, é a conjugação de diversos fatores, tais como habilidade do operador, características da mistura, dimensionamento das fôrmas, planejamento das inserções, condições ambientais etc. Não é fácil definir as “especificações para a vibração do concreto”, já que esta atividade tem características de “arte”. Entretanto, algumas recomendações podem otimizar o trabalho.

6.1.4. Ações positivas durante a vibração

Inicialmente, é necessário garantir boa visibilidade do elemento a ser vibrado, recorrendo-se inclusive à iluminação artificial, se for o caso. É importante definir os planos de vibração junto com o engenheiro responsável pela obra ou o encarregado.

Ao manejar o vibrador de imersão, é desejável que este penetre lentamente na massa de concreto, de preferência pela ação do próprio peso, até o fundo da camada que se deseja vibrar.

Se a descarga do concreto for efetuada por camadas, deve-se inserir a agulha pelo menos 100 mm dentro da camada subjacente. O procedimento visa a melhor aderência entre as camadas e evita a ocorrência de juntas frias. Esta ação assegura também a mistura da eventual argamassa que ocorra na parte superior da camada inferior com a parte inferior da camada superior.

O vibrador deverá ser mantido na posição durante o tempo necessário, o qual varia de 5 a 15 segundos para concretos com abatimentos de 75 mm a 25 mm. Considera-se 10 segundos, tempo suficiente para obter o adensamento da mistura.

Após o tempo de vibração, deve-se retirar o vibrador lentamente, e verificar se o furo causado pela presença do vibrador na massa se fecha. No caso de permanecer ainda um pequeno vestígio, deve-se inserir o vibrador próximo ao furo até que a massa fique uniforme. Este fenômeno poderá ocorrer também na última inserção, quando então, ao ser retirado o vibrador, deve-se dar um movimento de vaivém no equipamento, corrigindo o problema.

6.1.5. Ações que devem ser evitadas

Na maioria das obras, os vibradores de agulhas são mal empregados. As observações indicam que 70% do tempo de operação dos vibradores são desperdiçados pelas seguintes razões:

- a) 15% por utilizá-los fora do concreto
- b) 35% por mau posicionamento dentro do concreto
- c) 20% por vibrar em concreto já adensado

Estas situações permitem um aproveitamento de somente 30% do tempo de trabalho, o que nos orienta no sentido de otimizar a utilização dos vibradores quanto ao método de inserção, tempos e posicionamento.

Uma prática bastante utilizada - **e que deve ser evitada** - é empurrar o concreto com o vibrador. Isto poderá ocasionar segregação do concreto.

Na descarga do concreto, deve-se evitar a formação de montes assim como a utilização do vibrador para removê-los, caso existam (Figura 6). O procedimento correto é vibrar o concreto no perímetro externo do monte e em seguida na direção do centro (Figura 7). Desta maneira, evita-se a segregação da mistura.

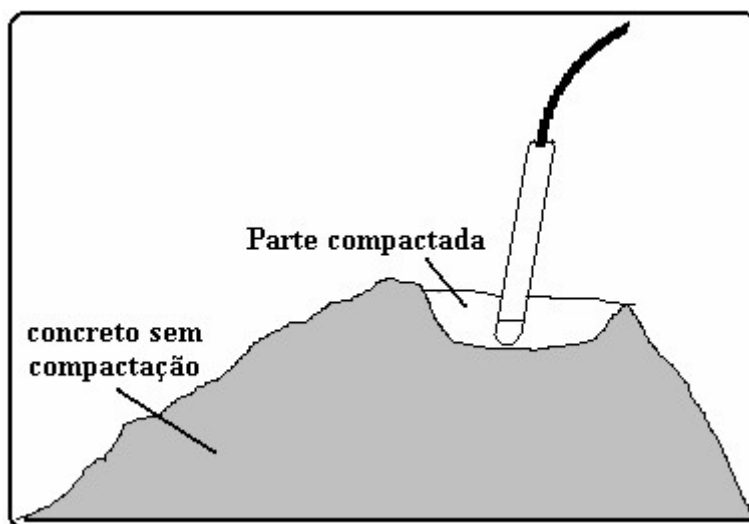


Figura 6 – Má utilização do vibrador

Nunca se pode considerar como parte do processo de consolidação a energia gasta em nivelar os montes de concreto. O tempo de vibração deve ser considerado a partir do momento em que o concreto é nivelado.

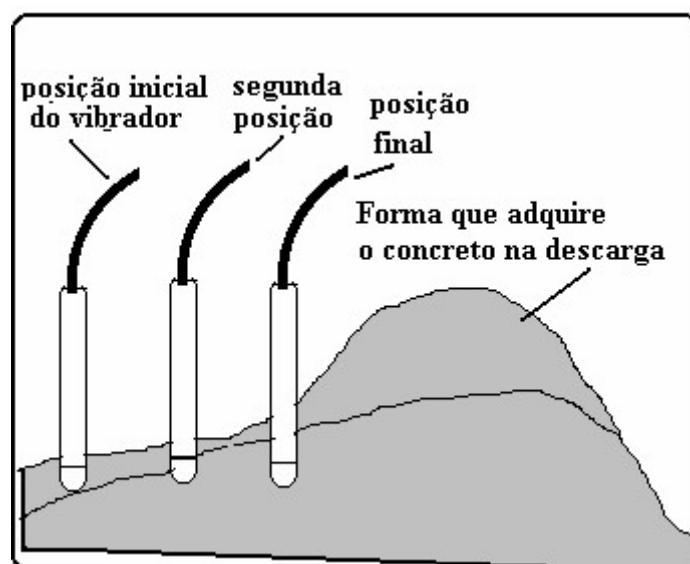


Figura 7 – Utilização do vibrador para espalhar o concreto

Tome-se cuidado para que o vibrador não entre em contato com as paredes das fôrmas, o que pode danificar o equipamento ou a própria fôrma. Recomenda-se manter a agulha a uma distancia de 75 mm a 100 mm da parede da fôrma.

Outra prática a ser evitada é tocar as ferragens já concretadas com o vibrador. Este procedimento poderá gerar a perda de aderência entre a ferragem e o concreto. Entretanto, não há restrição em se tocar a armadura com o vibrador se o concreto estiver fresco. Ao contrário, este procedimento poderá resultar em melhor aderência entre o concreto e a ferragem.

6.1.6. Outras considerações

Para evitar o superaquecimento dos vibradores recomenda-se que não sejam acionados fora do concreto, pois a mistura atua como refrigerante do equipamento.

O manuseio do equipamento deve seguir as recomendações do fabricante, especialmente no que se refere ao modo de segurar e movimentar. Não se deve nunca puxar o motor (quando elétrico) pelo mangote.

Ao desligar o motor, este não deverá continuar vibrando. Se persistir, é sinal de que algo anormal está ocorrendo e poderá ocasionar sérios danos. Finalmente, após o término dos serviços, deve-se limpar totalmente o equipamento.

6.1.7. Bateria de vibradores internos

Quando os vibradores estão montados em um equipamento de fôrmas deslizantes é de fundamental importância o raio de ação, pois este define a velocidade de avanço da máquina, o traço do concreto, o tamanho dos agregados e o aditivo. O espaçamento dos vibradores deverá ser no máximo de duas vezes o raio de ação.

Freqüentemente, recomenda-se a sobreposição dos raios de ação; entretanto, deve-se verificar a ação individual de cada vibrador para que seus efeitos não se sobreponham. Se os espaçamentos excederem a duas vezes o raio de ação, haverá a possibilidade de ocorrerem zonas de vazios no concreto. Entretanto, em qualquer dos casos, sempre haverá a possibilidade de que apareça, durante a vibração, uma região de baixa densidade entre dois vibradores.

6.2. Planejamento no emprego de vibradores internos

Em alguns países, conforme o tipo de obra, consta no projeto uma orientação sobre como vibrar o concreto para que se obtenha um produto “denso e homogêneo”. Como consequência, haverá diversas especificações a serem seguidas nos diferentes tipos de obras, dependendo do traço do concreto, abatimento no momento da aplicação e outras condições a serem determinadas.

6.2.1. Intensidade de vibração

Recentemente, foram desenvolvidos na Suécia (4) vários trabalhos de campo, sob várias condições, os quais permitiram chegar a uma fórmula que estabelece valores adequados de vibração interna do concreto.

Este parâmetro foi definido como “intensidade de vibração” e relaciona o tempo efetivo de vibração por volume de concreto, sendo medido em s/m³ (segundo por metro cúbico).

Se for utilizado o mesmo tipo de vibrador interno, o tempo efetivo de vibração indica também a energia de adensamento transmitida ao concreto. A intensidade de vibração representa, portanto, uma medida da energia de adensamento transmitida.

Esta medida é, entretanto, dependente do efeito do adensamento do vibrador em uso e, principalmente, é relacionada com o diâmetro da agulha. A intensidade de vibração depende do número de inserções, do tempo que durar a inserção e do volume de concreto que estiver sendo vibrado.

O tempo de inserção é o efetivo da vibração, **não se considerando os tempos da penetração e da retirada dos vibradores.**

Considerando os elementos que se relacionam:

n = número de inserções

T = duração da inserção (s)

V = volume da forma (m³)

Ve = intensidade de vibração

teremos a relação:

$$v_e = \frac{n \cdot T}{V}$$

Para formas horizontais com espessura constante – laje ou bloco – teremos a seguinte relação simplificada:

$$v_e = \frac{2 \cdot T}{h \cdot a^2 \cdot \sqrt{3}}$$

o espaçamento será

$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot T}{v_e \cdot h \cdot \sqrt{3}}}$$

para h = 0,40 m

$$v_e = 2,89 \frac{T}{a^2}$$

o espaçamento será

$$a = \sqrt{2,89 \frac{T}{v_e}}$$

Um plano de inserção de vibradores internos em uma fôrma terá a seguinte configuração:

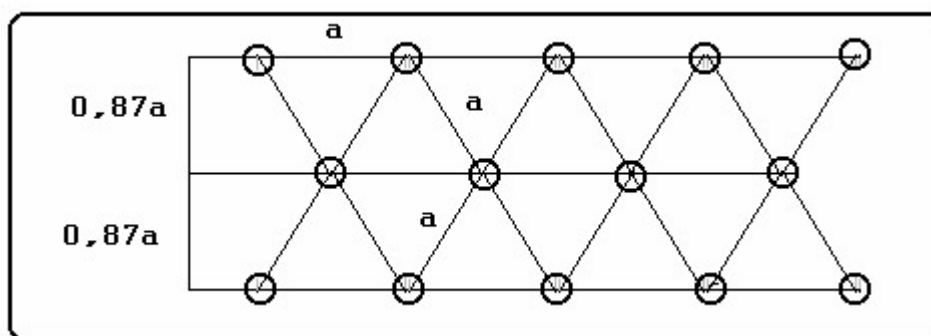


Figura 8 – Plano de inserção de vibradores

O gráfico da Figura 9 mostra as relações entre Pontos e Tempos de inserção para uma laje de 0,40 m de espessura. Deve-se considerar, entretanto, os limites práticos das inserções e respectivos tempos para se obter um bom resultado.

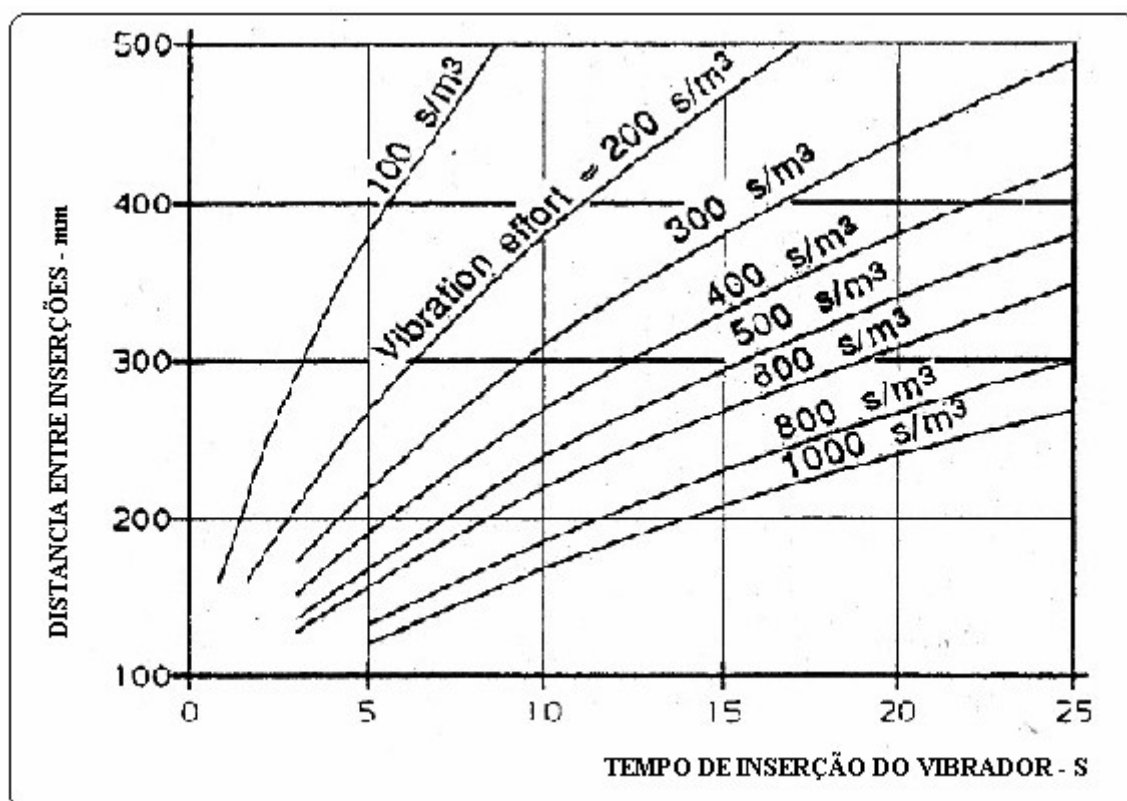


Figura 9 – Relação entre distância e tempo de vibração para $h = 0,40$ m

6.2.2. Capacidade volumétrica do vibrador

Existe uma relação inversa entre a Intensidade de vibração “Vê” e a Capacidade volumétrica “C” de um vibrador interno (m³/h) - dados de fábrica.

Usado com eficiência, um vibrador interno vibra de 60% a 70% do tempo total de operação para o adensamento do concreto em um determinado trabalho – uma placa de pavimento, por exemplo. Considerando que o vibrador estará ativo tanto no momento em que estiver inserido como no período em que estiver sendo retirado da fôrma, o tempo efetivo de vibração do concreto se reduzirá de 40% a 60% do tempo total necessário.

Para um período de operação de 1,0 h = 3.600 s, considerando uma eficiência de 50%, teremos as seguintes relações:

$$V_e = \frac{1800}{C} \quad \text{e} \quad C = \frac{1800}{V_e}$$

Uma intensidade de vibração de 300 s/m³, por exemplo, corresponderá a uma capacidade de vibração de um vibrador de $1800/300 = 6 \text{ m}^3/\text{h}$.

A Figura 10 apresenta uma Tabela que relaciona a intensidade de vibração e a capacidade prática de vibração de um vibrador.

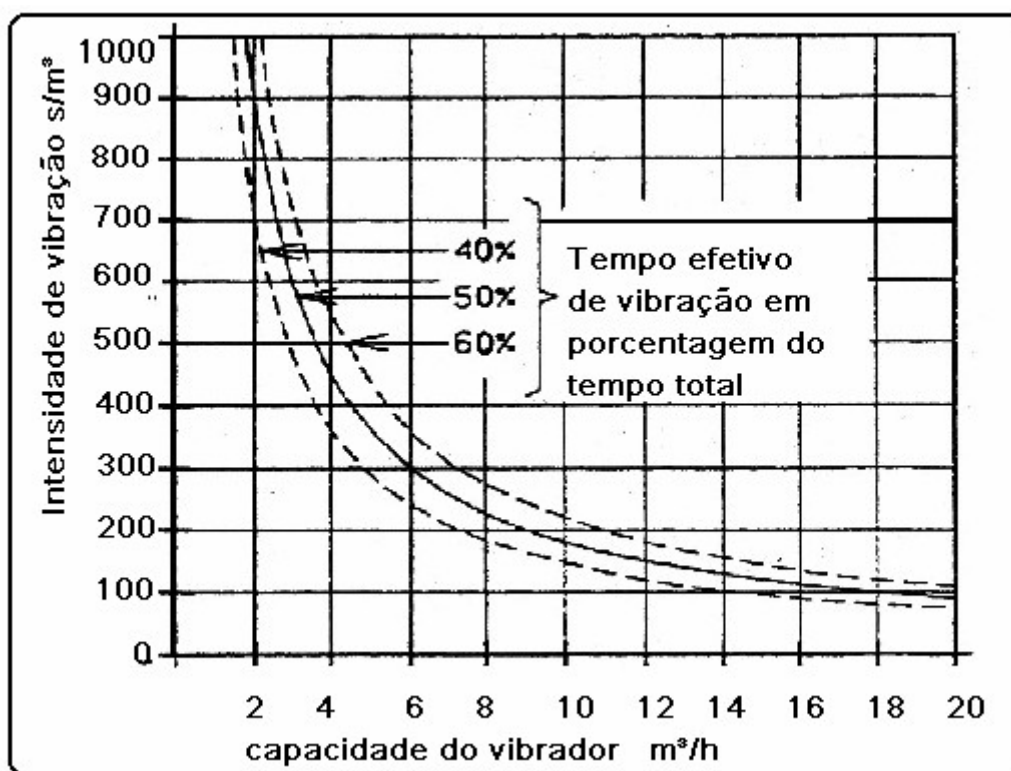


Figura 10 - Relação entre intensidade de vibração e capacidade do vibrador

6.2.3. Quantificação da vibração

A quantificação da vibração é influenciada pelos seguintes fatores:

- Objetivo do produto final
- Graus de dificuldade relativos à localização das fôrmas, dimensões, reforços, encaixes, emendas etc.
- Tipo do concreto definido pela trabalhabilidade e consistência da mistura

A Tabela da Figura 11 mostra um exemplo com os graus de dificuldade em aplicações específicas e as respectivas intensidades de vibração, assim como a capacidade indicada dos vibradores.

GRAU DE DIFICULDADE	INTENSIDADE DE VIBRAÇÃO ADEQUADA	CAPACIDADE DO VIBRADOR
FORMAS LARGAS E ABERTAS - PAVIMENTOS	200 - 300 s/m ³	6 - 10 m ³ /h
PAREDES, COLUNAS, VIGAS PISOS COM REFORÇO.	300 - 400 s/m ³	4 - 6 m ³ /h
VIGAS ESTREITAS E PAREDES COM REFORÇO PRÉ - TENSIONADO	400 - 600 s/m ³	3 - 4 m ³ /h

Figura 11 – Relação Grau de dificuldade / Intensidade / Capacidade do vibrador

Estas relações são baseadas em testes realizados na Suécia (4), utilizando-se concreto com consistência plástica (abatimento 75 mm – 125 mm) e vibradores com diâmetro de 55 mm.

Para um concreto com abatimento de 200 mm, a intensidade de vibração poderá ser reduzida em 50% e a correspondente capacidade do vibrador aumentada em 100%. Deve-se considerar também a relação entre o diâmetro do tubo de um vibrador interno e seu raio de ação.

Os valores constantes da Figura 11 foram obtidos utilizando-se vibradores com diâmetro de 55 mm. Assim, vibradores com diâmetros diferentes exigirão correções nos valores das intensidades de vibração.

O fator de correção é obtido da relação $(D/57)^2$, isto é, divide-se o valor do diâmetro do novo vibrador por 57 e eleva-se ao quadrado. Por exemplo, se o diâmetro de um novo vibrador for 70 mm, dividindo-se este valor por 57 e elevando-se ao quadrado teremos o fator de correção 1,51. Deve-se dividir o valor da intensidade de vibração por 1,51 e multiplicar a capacidade do vibrador por 1,51. Neste caso, teríamos para um pavimento de concreto simples, utilizando a Tabela, os valores de 200 s/m³ e 15 m³/h para intensidade de vibração e capacidade de vibração, respectivamente.

6.2.4. Aplicação

Uma aplicação dos dados da Figura 11, para estabelecer os planos de distribuição de inserções, teria o seguinte procedimento, utilizando-se as fórmulas apresentadas:

- Fôrma aberta com $h = 40$ cm para tempo de inserção de 10 s, próximo da parede da fôrma e intensidade de vibração de 275 s/m^3

$$a = \sqrt{2,89 \times 10 / 275} = 320 \text{ mm}$$

para tempo de inserção de 15 s,

$$a = \sqrt{2,89 \times 15 / 275} = 397 \text{ mm}$$

- Muro com camadas de $h = 40$ cm para tempo de inserção de 10 s, intensidade de vibração de 330 s/m^3

$$a = \sqrt{2,89 \times 10 / 330} = 295 \text{ mm}$$

c – vigas de viadutos, com reforço pré – tensionado.

para tempo de inserção de 15 s e intensidade de vibração de 500 s/m^3

$$a = \sqrt{2,89 \times 15 / 500} = 294 \text{ mm}$$

Com base nos dados citados, os planos de inserções terão a configuração a seguir, com algum arredondamento de medidas:

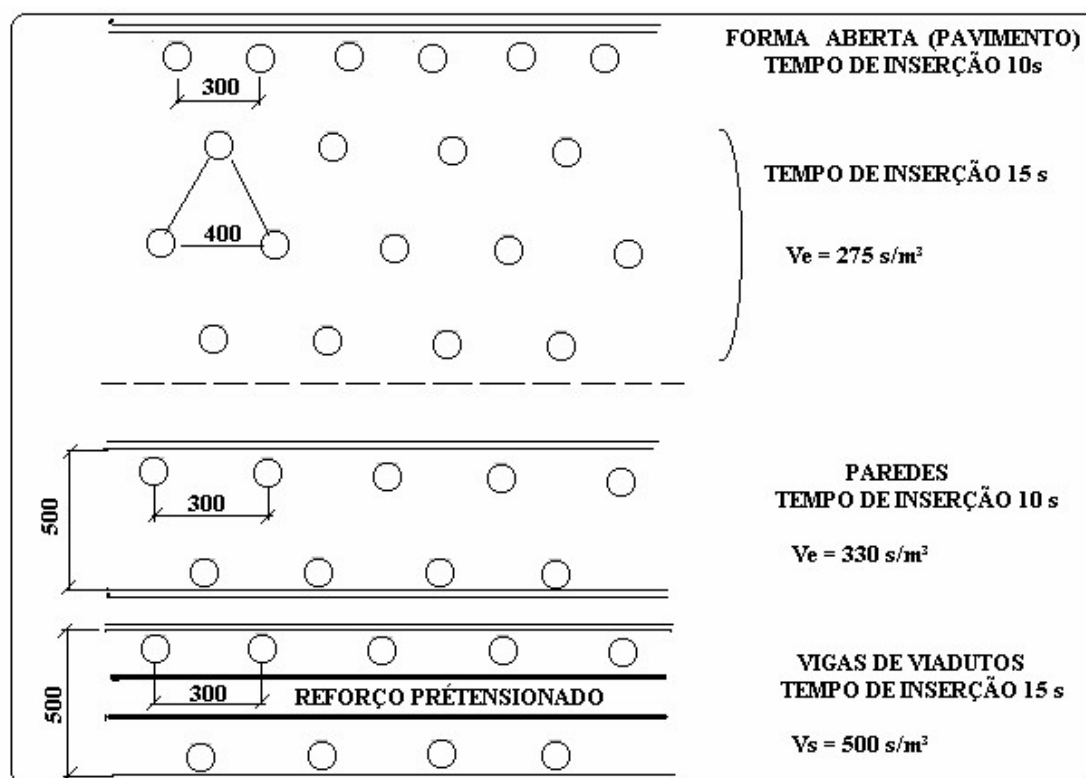


Figura 12 – Planos de vibração

Os valores da Figura 12, que servem como exemplo, referem-se a concreto com abatimento entre 75 mm e 125 mm e vibradores com diâmetro de 55 – 60 mm. Em secções mais estreitas, no caso de vigas, devem ser utilizados vibradores de menor diâmetro, corrigindo-se a distância entre inserções.

6.3. Vibradores de superfície – Régua vibratória

As régua vibratória são utilizadas principalmente na execução de pavimentos, pátios, pisos de concreto e outras aplicações onde se necessita obter um produto confinado e com superfície plana de concreto.

O comportamento do concreto fresco, submetido à vibração com régua vibratória, está condicionado a: amplitude, frequência de vibrações e força exercida sobre a mistura. A trabalhabilidade do concreto, a graduação dos agregados, o peso da sobrecarga, a espessura do pavimento e as condições da sub-base também influenciam na profundidade a que pode alcançar a vibração.

Já o comportamento do equipamento não é afetado nem pela aceleração da vibração nem pela largura da régua na distribuição do deslocamento do concreto fresco devido à ação do vibrador. Como é indicado na Figura 13, a maior influência se dá nos 200 mm superiores do concreto.

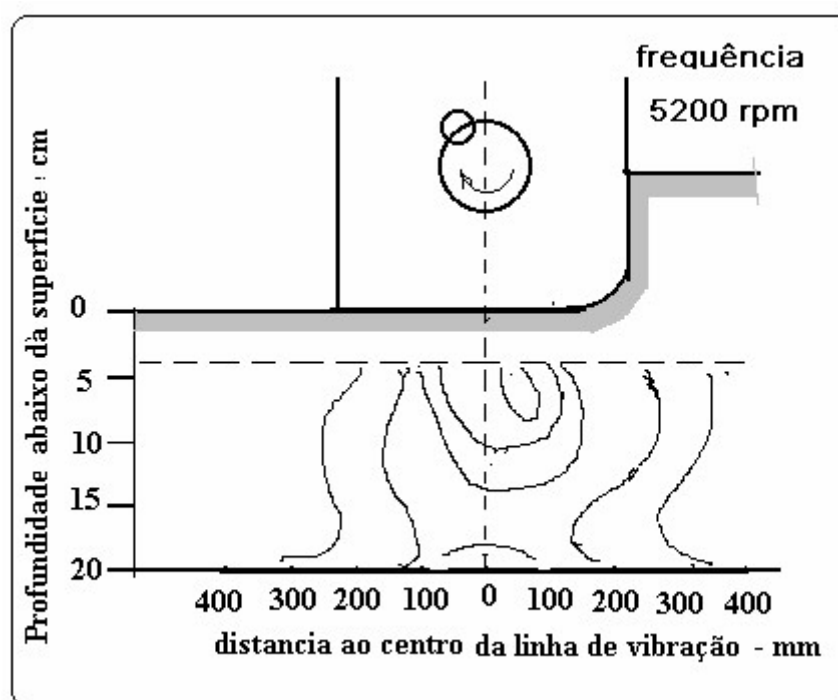


Figura 13 – Propagação das ondas de vibração

6.3.1. Mecanismo da vibração superficial

As vibrações geradas por vibradores de superfície, transmitidas através das placas, se desenvolvem em duas etapas:

- Na primeira etapa, a mistura, que deverá ser considerada como um material acumulado sem compactar, é posta em movimento. O atrito e a coesão entre os agregados – recobertos com argamassa – e também a própria viscosidade da argamassa são reduzidos. A mistura sofre um “colapso”. Volumes maiores de ar, originados durante a elaboração, transporte e na própria descarga do concreto, escapam pela superfície. No final desta etapa, o concreto terá a consistência de um líquido denso e o processo de adensamento se encontra praticamente concluído.
- A segunda etapa começa quando a superfície do concreto se tranqüiliza. O concreto agora possui todas as características de um fluido denso. As bolhas de ar e o excedente de água foram expulsos. Os agregados vão se posicionando em uma forma mais densa. As características do concreto em vibração vão se modificando durante o processo e em função da sua duração. O módulo de elasticidade se torna maior e o volume de poros vai diminuindo.

A composição granulométrica dos agregados deverá permitir uma boa trabalhabilidade do concreto.

Certamente, é possível compactar por vibração concretos que têm dificuldades de serem adensados por outros processos. Entretanto, deverão ser escolhidos grupos granulométricos mais adequados, para que se obtenha o grau de adensamento desejado.

6.3.2. Amortecimento das vibrações

O concreto, ao ser vibrado por um vibrador de superfície, exerce uma atuação de amortecimento, absorvendo as vibrações em função da espessura da camada a ser compactada.

A intensidade da absorção varia em função do tempo de vibração e somente poderá ser considerada constante uma vez terminado o processo de adensamento. A amplitude da oscilação diminui em função do aumento da espessura da camada do concreto.

A absorção das oscilações vai diminuindo à medida que aumenta o grau de adensamento do concreto e, conseqüentemente, vai aumentando a transmissão das amplitudes de oscilação. Como conclusão, pode-se dizer que a profundidade máxima do concreto adensado se incrementa quando se reduz a espessura, devido à reflexão da vibração a partir da base.

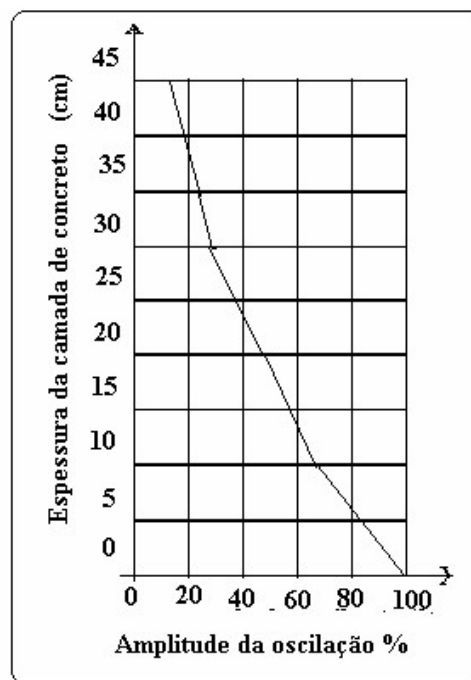


Figura 13A – Amplitude da oscilação

Com base em pesquisas, conclui-se que não é recomendável usar réguas vibratórias para compactar pavimentos com espessura superior a 200 mm. No caso de placas de pavimentos, pátios e outras aplicações onde são empregados vibradores superficiais, tornam-se necessário um adensamento prévio com vibradores internos.

A vibração superficial pode também ser complementada com vibradores internos, posicionados próximos à parede das fôrmas e nos locais onde estão os sistemas de transferência de carga (barras de transferência).

6.3.3. Recomendações para a utilização de vibradores superficiais

Para conseguir um bom adensamento com régua vibratória simples é necessário passá-la duas vezes pela superfície do concreto; a primeira para compactar e a segunda para dar o acabamento superficial. Em geral, com réguas vibratórias duplas (treliçadas) – Figura 14 - basta apenas uma passada.



Figura 14 – Régua treliçada

O trabalho com vibradores superficiais começa com a descarga do concreto em camadas, o mais próximo possível do local a ser trabalhado, com uma altura superior a 20% das dimensões finais da placa, para garantir que se obtenha a espessura determinada, já que durante a vibração o concreto se consolida e, como consequência, reduz o volume.

Após a descarga do concreto fresco, geralmente faz-se um adensamento prévio por intermédio de vibradores de imersão. Em seguida, passa-se a régua vibratória, deslocando-a lentamente ao longo das laterais da fôrma ou guias, observando-se o surgimento de um cordão de concreto na frente de toda a extensão da régua, em ambas as passadas se esta for simples ou nos dois perfis se for dupla.

As réguas vibratórias deverão operar com altas amplitudes e baixas frequências – 3.000 a 6.000 rpm (50 a 100 Hz) e acelerações vibratórias de 5 a 10 g (49 a 98 m/s²). A duração da vibração para camadas de espessuras até 20 cm deverá corresponder no mínimo a 90 s/ m².

A velocidade de deslocamento será: $v = \frac{60}{90 a}$

onde: a = comprimento da régua

A velocidade ótima deverá ser ajustada durante a execução da obra.



Figura 15 – Régua vibratória simples ou de acabamento

A largura da régua vibratória simples (Figura 15) deverá ser, no máximo, da ordem de 4,50 m, para evitar a geração de superfícies côncavas no pavimento em função do peso próprio e do motor. As réguas treliçadas, em virtude de sua concepção, podem ter sua largura aumentada com acréscimo de módulos, chegando a 22,9 m (modelo H 100 da Wacker).

Mesmo com réguas simples mais curtas poderá ocorrer flexão no equipamento - pelo que se recomenda fazer uma compensação tensionando a estrutura através de cabos ou reforçando-a por meio de uma estrutura auxiliar. Nas réguas simples, como a unidade vibratória está montada na parte central, a intensidade de vibração vai diminuindo na direção das extremidades. Por esta razão, se recomenda utilizar vibradores de imersão nas proximidades das paredes das fôrmas para reforçar a eficiência da ação da régua.

6.3.4. Considerações finais sobre vibração com régua

Os danos originados nas placas devido à vibração insuficiente são muito maiores do que aqueles ocasionados por excesso de vibração. Portanto, não se deve precipitar e interromper o processo antes do tempo. A vibração insuficiente gera perdas na resistência, aparência e durabilidade do concreto.

No emprego de réguas vibratórias é conveniente que o abatimento do concreto não supere 75 mm.

Deve-se manter um equipamento similar de reserva na obra, para que, em caso de quebra do primeiro, os serviços não sejam interrompidos.

7. VIBRADORES EXTERNOS

Os vibradores externos, ao contrário dos internos, agem indiretamente sobre o concreto fresco, isto é, as vibrações são transmitidas através das paredes das fôrmas onde são fixados. As fôrmas, em geral, são montadas sobre apoios elásticos, de modo que é vibrada tanto a fôrma quanto o concreto. Conseqüentemente, parte da energia de vibração é perdida na vibração da fôrma.

O princípio do vibrador externo é o mesmo do interno, porém as freqüências de vibração variam de 3.000 a 12.000 ciclos por minuto. Para obter um bom resultado com uma vibração eficiente, a aceleração vibratória deverá estar entre 1 g e 3 g (9,8 a 30 m/s²) para misturas que variam de “fluidas” a “plásticas”, com o concreto preenchendo a fôrma, o que deve corresponder a acelerações vibratórias de 5 g a 10 g (49 a 98 m/s²) com a fôrma vazia (Forssblad 1971) (6).

Os vibradores externos são utilizados em fábricas de pré-moldados e em canteiros de obras, em seções delgadas onde não é possível utilizar vibrador interno. São eficazes para seções de até 600 mm de espessura. A distribuição das vibrações deverá ser bem uniforme ao longo da superfície da fôrma onde estiver agindo, o que significa que o espaçamento entre vibradores deverá estar entre 1,50 e 2,50 m.

Podem ser acionados por sistemas elétricos, hidráulicos e pneumáticos, sendo os vibradores elétricos os mais utilizados.

Os vibradores externos elétricos são constituídos, geralmente, por motores trifásicos com induzido em curto-circuito. O eixo do motor se estende para ambos os lados, em cujas extremidades se localizam as massas excêntricas, que geram forças centrífugas ao ser acionado o vibrador.

A força centrífuga gerada depende do número de rotações do motor, do peso das massas excêntricas e da distância entre o centro de gravidade das massas e o centro do eixo do motor (ver Anexo 4). Alguns fabricantes oferecem em um mesmo vibrador condições para se obterem forças centrífugas diferentes mediante a substituição ou variação de posição das massas excêntricas.

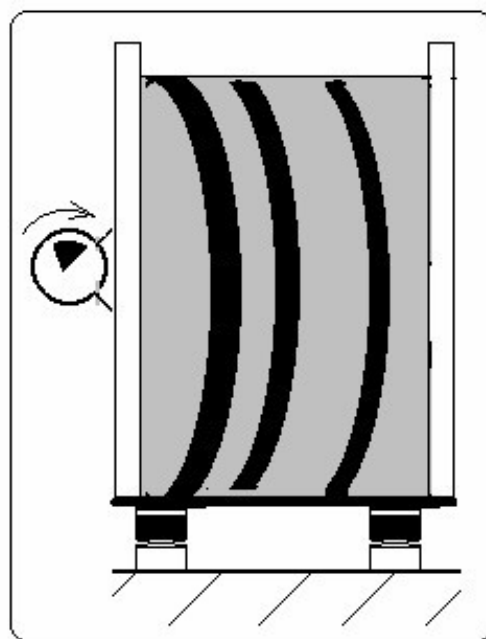


Figura 16 – Vibrador externo fixado à fôrma

A Figura 17 apresenta um típico vibrador externo, onde se pode notar a posição dos excêntricos nas laterais da carcaça.

Os vibradores externos são fixados às fôrmas, normalmente, por meio de parafusos. Entretanto, conforme a necessidade, poderão ser fixados por dispositivos que permitam sua remoção e instalação rápida entre pontos diversos das fôrmas. Comercialmente, são oferecidos com várias faixas de frequências, de 1.000 a 3.500 rpm, podendo chegar a intervalos de 4.000 a 12.000 rpm (alta frequência), conforme necessidades específicas. Os vibradores de alta frequência, largamente empregados na indústria de pré-moldados, são alimentados através de conversores de frequência.

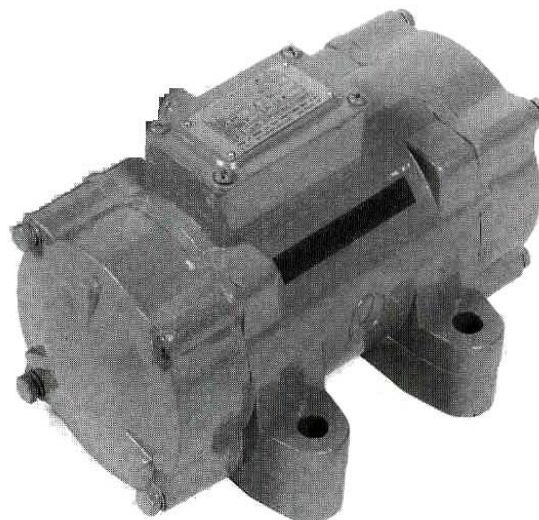


Figura 17– Vibrador externo

O número de rotações de um vibrador externo depende da frequência de entrada da rede elétrica e do número de pares de pólos do motor. Assim, para uma rede de alimentação de 60 Hz, um motor com 2 pares de pólos terá uma rotação de 1800 rpm, conforme a conhecida relação:

$$n = \frac{60 \times f}{p} \quad \text{onde: } \begin{array}{l} n - \text{n}^\circ \text{ de rotações por minuto} \\ f - \text{frequência da rede - Hz} \\ p - \text{n}^\circ \text{ de pares de pólos do motor elétrico} \end{array}$$

A escolha do vibrador adequado a uma determinada aplicação dependerá de diversos fatores. Os principais fabricantes terão condições de orientar os usuários. A Tabela da Figura 18 apresenta algumas características técnicas de vibradores externos fornecidas por um tradicional fabricante.

Frequência de vibração (vpm)	3.500	3.500	3.500
Força centrífuga (N)	6.700	9.900	16.400
Amplitude máxima (mm)	2,5	2,4	2,8
Potência nominal (kw)	0,55	0,8	1,5
Peso (kg)	18	27	37
Corrente 220 / 380 (A)	2,0 / 1,2	3,1 / 1,8	7,6 / 4,4

vpm – Vibração por minuto

Figura 18 – Características de vibradores externos

Sabe-se que existe uma relação entre o tamanho das partículas e o número de oscilações. Desta relação é possível deduzir que diminui o número de oscilações naturais ao aumentar o diâmetro das partículas dos agregados. Isto significa que as partículas pequenas correspondem a um número alto de oscilações, enquanto que as partículas maiores respondem por um número baixo de oscilações.

Na prática, o número de oscilações do vibrador externo deverá ser ajustado ao tamanho das partículas. Os agregados do concreto contêm grupos de partículas dispostas segundo curvas granulométricas – pequenas e grandes. O rendimento ótimo de adensamento poderia ser alcançado ao introduzir-se simultaneamente, dentro do concreto fresco, diferentes valores de frequência ou amplitudes de oscilação. Entretanto, por diversas razões, inclusive econômicas, não é possível adotar essa solução.

7.1. Considerações finais sobre vibradores externos

Os vibradores externos deverão ser fixados à fôrma de maneira que permitam a transmissão efetiva das vibrações ao concreto. Na concretagem de colunas, o concreto deve ser aplicado em camadas de altura adequada, pois o ar não pode ser expelido através de espessuras grandes de concreto. Se a espessura for superior a 750 mm, o vibrador deverá ser deslocado na vertical, sucessivamente à medida que se faz o lançamento do concreto e se processa o adensamento das diferentes camadas.

A frequência adequada para a vibração de uma fôrma depende essencialmente de seu formato e dimensões. Grandes fôrmas necessitam de vibradores com altas frequências para obter melhor distribuição das vibrações ao longo da sua superfície. Portanto, as características das fôrmas tornam-se mais relevantes na escolha de vibradores de alta ou baixa frequência do que as próprias características do concreto. Deve-se lembrar, entretanto, que as vibrações em alta frequência resultam em melhor aparência do produto final.

No adensamento de tubos de concreto, a vibração, para ser eficiente, deverá ser transmitida simultaneamente em toda a circunferência da fôrma.

8. MESAS VIBRATÓRIAS

Mesa vibratória consiste em uma mesa de aço com vibradores externos fixados em sua estrutura e apoiada sobre amortecedores, que poderão ser de neoprene ou outro material amortecedor de vibrações.

Os resultados obtidos com mesa vibratória são geralmente menos consistentes e mais difíceis de serem interpretados do que os obtidos com outros processos. O efeito do adensamento é determinado pela aceleração da mesa – devido à força centrífuga (ver Anexo 4). Nas mesas vibratórias, tanto o concreto como a fôrma pode se mover livremente durante a vibração, quando poderá haver ressonância.

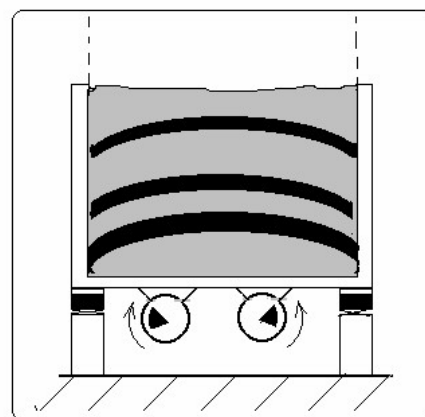


Figura 19 – Desenho esquemático de mesa vibratória

A pressão das ondas de vibração sobre o concreto sofre um amortecimento ao longo da camada. As acelerações de 5 g a 10 g (49 a 98 m/s²) sem carga se reduzem, passando de 2 g a 4 g (20 a 39 m/s²) durante a vibração com carga. Quanto maior for a aceleração tanto menor será o tempo necessário para vibrar o concreto.

Comercialmente, as mesas vibratórias são especificadas pela força centrífuga, medida em kp (=daN), e pela rotação do motor, além das especificações dimensionais. Os valores de frequência ideais para as mesas vibratórias estão situados entre 3.000 a 6.000 vibrações por minuto (50 a 100 Hz).

Para uma certa aceleração, a combinação entre alta amplitude com frequência moderada resulta em uma consolidação mais rápida do concreto do que uma combinação de alta frequência com baixa amplitude.

Dependendo dos recursos de que se dispõe – limitação da capacidade dos vibradores, por exemplo –, em um concreto mais denso a baixa intensidade de vibração poderá ser compensada por um tempo de vibração mais longo.

A aplicação de um vibrador externo à mesa vibratória, que contenha apenas um elemento excêntrico, poderá gerar um movimento circular vibratório com possíveis prejuízos ao concreto (componente horizontal). Para evitar este problema, devem-se instalar dois vibradores com sentidos de rotação contrários (Figura 19). Assim, se neutralizam os componentes horizontais de vibração, de maneira que a mesa fica submetida apenas a um movimento harmônico simples na direção vertical.

Ao concreto vibrado em uma mesa vibratória, geralmente confinado em uma fôrma – bloco, por exemplo -, é aplicada uma força estática sobre a superfície do concreto. Assim, o aumento da pressão dinâmica melhora o adensamento das misturas secas. Deve-se, entretanto, equilibrar a intensidade desta força com a intensidade de vibração, para que se obtenha um produto final com ótimas qualidades de resistência e acabamento.

9. EQUIPAMENTOS PARA PAVIMENTAÇÃO

A aplicação de concreto para a execução de pavimentos rodoviários e urbanos, pátios etc. necessita de equipamentos com maior produtividade e qualidade do que oferecem os equipamentos manuais – vibradores de imersão, réguas vibratórias, por exemplo.

A produção diária, de cerca de 800 m³/ dia, exige equipamentos com um certo grau de sofisticação, capazes de atingir os objetivos traçados. Atualmente, o mercado dispõe de vibroacabadoras de fôrmas deslizantes de grande porte, com capacidade de executar pavimentos com larguras de 2,0 m a 9,20 m e espessuras de 0,15 m a 0,42 m. São dotadas de dispositivos eletrônicos e/ou hidráulicos que lhes permitem operar automaticamente, em direções e elevações pré-determinadas, de acordo com guias instaladas ao longo do pavimento a ser executado, seguindo as especificações do projeto.

Durante o processo de pavimentação vários sistemas interagem para que o produto final seja acabado com qualidade. Altura, direção, vibração e distribuição do concreto são funções que permitem a execução do pavimento segundo os dados dos projetos de rodovias, pátios etc.

A ABCP dispõe de três modelos de vibroacabadora, cujas marcas são: CMI SF 3004, Gomaco GP 2600 e Wirtgen SP 500. A Figura 20 mostra a vibroacabadora CMI em posição de operação.



Figura 20 – Vibroacabadora CMI

9.1. Sistemas de vibração

As vibroacabadoras são dotadas de baterias de vibradores montados em barras horizontais transversais ao equipamento, cujo posicionamento junto ao pavimento (inclinação e altura) é ajustado hidráulicamente por comando hidráulico. A Figura 21 mostra o sistema de vibradores da Gomaco.



Figura 21 – Bateria de vibradores internos

9.2. Características dos vibradores

Os vibradores utilizados nas vibroacabadoras Gomaco e CMI são de acionamento hidráulico, enquanto os vibradores da Wirtgen são de acionamento elétrico.

9.2.1. Vibrador hidráulico

O vibrador hidráulico é provido de um motor hidráulico interno, no qual o fluxo de óleo é controlado por válvulas “controladoras de fluxo” montadas em um painel, cuja finalidade é regular a frequência de vibração.



Figura 22 – Painel de controle dos vibradores CMI

Os equipamentos com vibradores hidráulicos trabalham com concreto cujo abatimento varia em torno de 40 mm e frequência de vibração de 8.000 vpm. Para valores menores, em circunstâncias especiais, a frequência poderá chegar a 10.000 vpm. Para medir a frequência de vibração dos vibradores em função da variação de fluxo das válvulas de controle deve-se utilizar um tacômetro manual (ver Anexo 3).

O motor diesel deverá ser ajustado para uma rotação suficiente, de forma que a pressão do óleo hidráulico se mantenha em torno de 2.000 psi (13790 kPa).

Os vibradores não devem operar em vazio por muito tempo. No entanto, durante a calibragem, haverá a possibilidade de aquecimento dos vibradores, que se pode apurar por toque manual na parte central. Notando-se um certo desconforto em relação à temperatura, deve-se desligar o vibrador e aguardar que esfrie.

Durante a operação normal, os vibradores são resfriados pelo contato com o concreto, podendo operar por alguns minutos somente em contato com o ar. Deve-se tomar cuidado para que não haja superaquecimento, que pode danificar seriamente o mecanismo interno do vibrador.

A faixa de vibração em operações normais situa-se entre 8.000 e 10.000 rpm. Entretanto, por algum descontrole, pode atingir 15.000 a 20.000 rpm sem que isso seja perceptível visualmente – notando-se apenas um zumbido alto.

Os valores mínimos da frequência de vibração de cada vibrador estão na faixa de 0 a 750 rpm, enquanto os valores máximos variam de 9.000 a 12.000 rpm. O controle das vibrações do conjunto é feito por meio de uma Tabela que identifica cada vibrador, a correspondente válvula e as vibrações obtidas. Esta Tabela será de grande utilidade, tanto para a operação como para a manutenção do equipamento.

9.2.2. Vibrador elétrico

Os vibradores da pavimentadora Wirtgen são acionados eletricamente, com energia fornecida por um gerador acoplado ao seu motor diesel (Figura 23).

Para ajustar a frequência de vibração deve-se utilizar um potenciômetro localizado no painel principal, girando-o até atingir o valor desejado (Figura 23a).



Figura 23 – Conjunto gerador com as tomadas para os vibradores

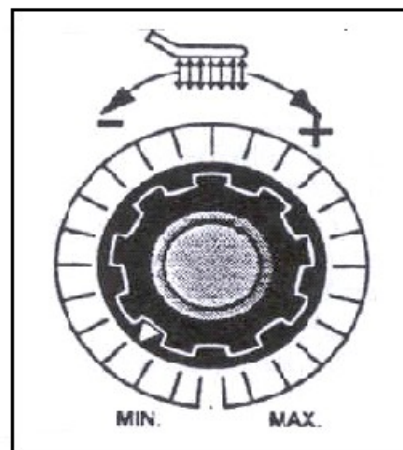


Figura 23 A – Potenciômetro

A tensão do gerador deverá estar entre 90 V e 110V, fornecendo uma frequência de vibração entre 160 Hz à 200 Hz. O que poderá ser verificado nos instrumentos do painel elétrico do equipamento.

9.3. Espaçamento entre vibradores

Os vibradores são montados em um eixo horizontal, localizado transversalmente ao equipamento, em quantidades adequadas à largura do pavimento que se queira executar, variando, entretanto, de um equipamento para outro, o que poderá ser ajustado conforme orientação do Manual de Operação de cada máquina. A Figura 24 mostra o eixo suporte dos vibradores da Wirtgen.

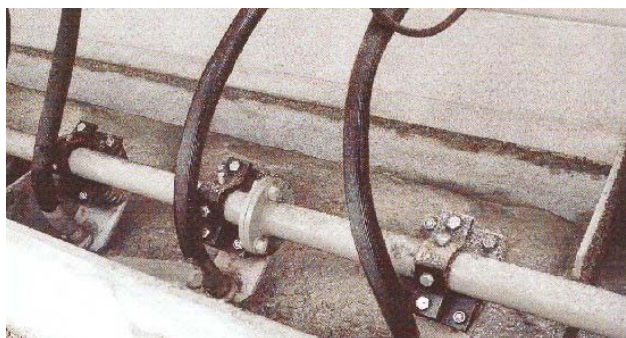


Figura 24 – Espaçamento entre vibradores

O espaçamento entre vibradores é, em geral, em torno de 45 cm, não devendo ultrapassar 50 cm. Os vibradores localizados nas extremidades do eixo suporte deverão ficar a uma distância das bordas equivalente à metade do espaçamento normal entre os vibradores e ter suas vibrações ajustadas.

9.4. Velocidade de translação do equipamento

O American Concrete Institute (ACI) recomenda que os vibradores internos atuem sobre o concreto de 5 a 15 segundos. Isto exige um controle da velocidade de deslocamento do equipamento de fôrmas deslizantes, no qual os vibradores se posicionam horizontalmente. Admitindo que o comprimento médio de um vibrador é 30 cm, a velocidade de deslocamento da máquina estará entre 1,2 metros / min. e 3,6 metros / min., considerando os tempos acima. A velocidade de deslocamento deve ser bem monitorada, pois quando o equipamento atinge 5 metros / min. a densidade do concreto cai sensivelmente.

Este critério não apresenta grande precisão. No Anexo 5 é apresentado um sistema de cálculo mais preciso da velocidade do equipamento, que leva em conta a largura e espessura do pavimento a ser executado. Como as recomendações sobre a velocidade do equipamento são generalizadas, deve-se fazer alguns testes antes do início da obra, para definir o tempo de adensamento adequado para o concreto a ser empregado.

9.5. Profundidade e ângulo do vibrador

A densidade do concreto não sofre alteração significativa se o ângulo formado pelo eixo do vibrador em relação à horizontal estiver compreendido entre 0° e 30°. Esta observação se enquadra nas recomendações do ACI, de posicionar os vibradores horizontalmente a uma altura correspondente à metade da espessura do pavimento, quando esta for inferior a 250 mm. Para pavimentos com espessuras superiores devem-se introduzir os vibradores inclinados e mantê-los a uma distancia de 50 mm da base.

9.6. Tempo de vibração

O tempo de vibração é uma variável que depende das características do vibrador e do próprio concreto, especialmente no que se refere à trabalhabilidade da mistura, caso em que o tempo pode mudar de um equipamento para outro.

A prática é de grande importância na avaliação do tempo de vibração. Um operador experiente poderá conduzir o equipamento com velocidade adequada e correspondente vibração, de forma a conseguir a consolidação ótima do concreto.

A decisão não deverá ser arbitrária, mas com base em algumas evidências que se apresentam durante o processo, tais como:

- A consolidação inicial é rápida e se reconhece porque o nível do concreto se retrai com a vibração. Entretanto, o ar aprisionado ainda não foi removido.
- Durante a vibração, as bolhas de ar sobem para a superfície, de maneira análoga à água que ferve; quando as bolhas cessam de aparecer é um indício de que o processo está terminando.
- O som também serve como orientação. Quando o vibrador é inserido, a frequência do equipamento diminui imediatamente e começa a aumentar e se tornar constante. Neste momento, o concreto já estará livre do ar aprisionado.

- Finalmente, a aparência superficial é um dos fatores mais evidentes para definir se a consolidação do concreto foi obtida, pois quando ocorre surge uma pequena película de argamassa que dá um certo brilho à superfície.

Existe uma relação entre o tempo de vibração e a frequência do equipamento. Pode-se dizer que o tempo de vibração geralmente diminui quando aumenta a frequência. Estima-se que para um acréscimo de 50% na frequência do vibrador se reduz o tempo de vibração em 75%.

No caso de dúvida sobre interromper ou não a vibração do concreto em um dado momento, recomenda-se estender um pouco mais a operação, pois o excesso de vibração traz menos riscos de problemas futuros que a falta dela. É melhor muita vibração do que pouca.

No caso específico das réguas vibratórias, quando cessam o aparecimento das bolhas na superfície, que afloram com frequência no início da operação, é um indício de que o trabalho está terminando.

10. Observações complementares

10.1. Excesso de vibração no concreto

Uma mistura de concreto bem elaborado não será afetada pelo excesso de vibração. E, ainda mais, torna-se quase impossível vibrar excessivamente um concreto bem dosado.

A idéia de que o comportamento do concreto é afetado de forma adversa quando ocorre vibração em excesso surgiu com o emprego dos primeiros vibradores. Estes possuíam baixa frequência e grandes amplitudes, o que podia gerar segregação dos materiais, quando mal aplicados. Atualmente, com os vibradores de alta frequência, a segregação não ocorre facilmente.

Quando se trata de misturas mal dosadas, o resultado da vibração em excesso é o surgimento de água ou exsudação em excesso na superfície do concreto. Neste caso, deve-se remover o material exsudado do que correr o risco de não vibrar o concreto adequadamente.

A remoção do material exsudado que ocorre nas misturas com baixa coesão ou com excesso de água é fácil de fazer em colunas ou muros. Entretanto, em lajes ou pavimentos, onde as áreas são mais extensas, a remoção do material torna-se mais difícil. Por isso, nesses casos, deve-se ter cuidado redobrado na formulação do traço, buscando reduzir ao mínimo a exsudação, de modo a evitar que a superfície seja submetida a um trabalho extra de acabamento. A recomendação de otimizar o traço de um concreto é, na verdade, extensiva a todas as aplicações.

10.2. Intervalo de tempo entre o lançamento e vibração do concreto

Em função do desenvolvimento tecnológico do concreto, da aplicação de aditivos e de outros recursos, não existe um tempo definido entre a preparação da mistura e a vibração do concreto, pois dependerá das características de cada um. Além disso, o concreto poderá ser lançado e adensado em qualquer momento após ser misturado, desde que seja adequado para o sistema de vibração disponível, inclusive quando já tenha diminuído sua trabalhabilidade nominal.

O concreto poderá ser sempre adensado quando a sua consistência permitir que o vibrador penetre na massa pela ação exclusiva do peso próprio e, ao ser retirado, o furo originado pela ponta do vibrador se feche por completo.

Como mencionado, não se pode limitar os tempos das diferentes operações relacionadas com o concreto, porque eles dependem da rigidez da mistura, do teor de cimento, das temperaturas dos constituintes, da presença de aditivos, retardadores etc. Em dias não muito quentes, alguns concretos são trabalháveis após três ou quatro horas de realizada a mistura; enquanto em dias mais quentes, especialmente em misturas com alto teor de cimento, meia hora poderá ser o tempo máximo.

10.3. Revibração do concreto

Quando se constroem lajes ou placas delgadas e se utilizam misturas propensas a exsudar, é possível que apareçam fissuras coincidentes com a direção dos reforços na parte superior. Essas fissuras aparecem entre uma e duas horas após o adensamento. Se for observado que o concreto é ainda trabalhável (condição de vibração vista anteriormente) e o vibrador possa penetrar no concreto sob a ação do seu peso próprio, deve-se revibrar os 75 mm a 100 mm superiores da camada.

A revibração do concreto, quando ainda apresenta condições de trabalhabilidade, não resulta em nenhum dano; inclusive, ensaios demonstram que a resistência aumenta em torno de 10% no concreto revibrado após duas horas da mistura, conforme mostra o gráfico da Figura 25.

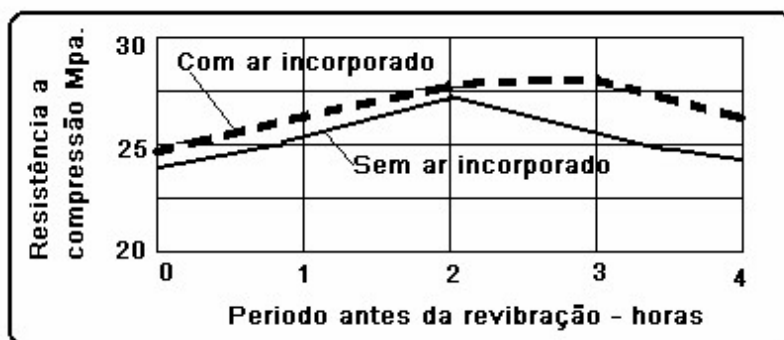


Figura 25 – Relação entre a resistência aos 28 dias e a revibração

Em geral, o aumento da resistência é mais acentuado nas primeiras idades, e é maior em concretos sujeitos a muita exsudação, devido à expulsão da água aprisionada pela revibração. É possível também que parte do aumento da resistência seja devido ao alívio das tensões em torno das partículas de agregado devido à retração plástica.

Apesar das vantagens da revibração do concreto, esta prática nem sempre poderá ser utilizada, pois implica em uma operação a mais, com aumento de custo; e se não for aplicada no tempo correto poderá danificar o concreto.

ANEXO 1 - RECOMENDAÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DE VIBRADORES DE IMERSÃO

- 1) Escolher o vibrador adequado para o tipo de obra – diâmetro etc.
- 2) O vibrador de imersão deve ser manuseado com muita atenção, nunca de maneira displicente, pois de seu emprego correto depende a obtenção dos resultados ótimos na aplicação do concreto fresco.
- 3) É fundamental seguir o planejamento pré-estabelecido no que se refere às distâncias entre inserções do vibrador e o tempo de permanência.
- 4) Ao inserir o vibrador, é recomendado que este penetre lentamente na massa de concreto, de preferência pela ação do seu peso próprio, até o fundo da camada que se deseja vibrar.
- 5) O vibrador deve permanecer na posição durante o tempo recomendado pelo planejamento pré-estabelecido.
- 6) A retirada do vibrador deve ser lenta e cuidadosa. Ao retirá-lo, é necessário observar se o furo causado por sua presença se fecha. Caso isso não ocorra, deve-se inserir o vibrador próximo ao furo até que a massa fique uniforme.
- 7) Não se deve puxar o motor do conjunto vibrador pelo seu mangote.
- 8) Evitar que durante o trabalho o vibrador entre em contato com as paredes das fôrmas ou ferragens já concretadas.
- 9) Não funcionar o vibrador fora do concreto, pois este age como refrigerante do equipamento, impedindo o superaquecimento.



Figura 26 - Posicionamento correto do vibrador

Limpar completamente o vibrador, eliminando todos os resíduos de concreto, após o término dos serviços.

ANEXO 2 - EXEMPLOS DE PLANEJAMENTO DE PLANO DE INSERÇÃO

Pavimento de concreto com 0,22 m de espessura.

Concreto A – Concreto com 80 a 100 mm de abatimento

Pela Tabela 2 (pág. 14), é recomendado o vibrador de imersão com os seguintes dados:

- Diâmetro – 45 mm
- Capacidade – 6,60 m³/h
- Raio de ação – 380 mm

Determinação da intensidade de vibração – $V_c = \frac{1800}{6,60} = 273 \text{ s/m}^3$

considerando um tempo de inserção $t = 10 \text{ s}$

$$\text{espaçamento} - a = \sqrt{\frac{2xt}{V_c \times h \times \sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{2 \times 10}{273 \times 0,22 \times 1,73}} = 0,44 \text{ m}$$

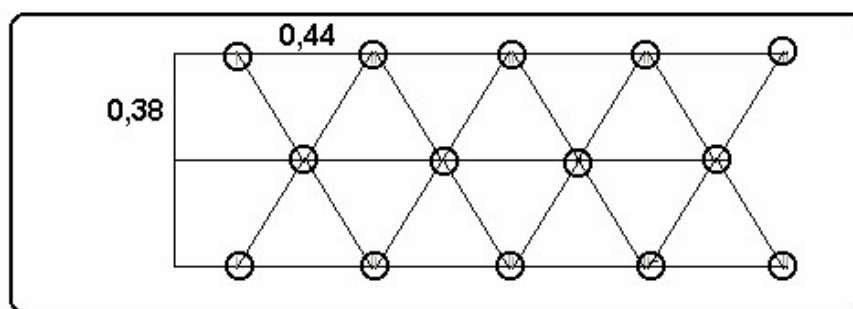


Figura 27 – Plano de inserção $t = 10 \text{ s}$

considerando um tempo de inserção $t = 5 \text{ s}$

$$\text{espaçamento} - a = \sqrt{\frac{2xt}{V_c \times h \times \sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{2 \times 5}{273 \times 0,22 \times 1,73}} = 0,31 \text{ m}$$

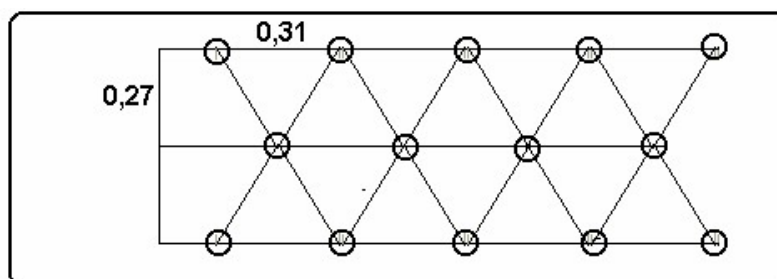


Figura 28 – Plano de inserção $t = 5 \text{ s}$

Concreto B – Concreto com 60 a 80 mm de abatimento

Pela Tabela 2 (pág. 14), é recomendado o vibrador de imersão com os seguintes dados:

- Diâmetro – 55 mm
- Capacidade – 8,50 m³/h
- Raio de ação – 510 mm

Determinação da intensidade de vibração – $V_c = \frac{1800}{8,50} = 212 \text{ s/m}^3$

considerando um tempo de inserção $t = 10 \text{ s}$

$$\text{espaçamento} - a = \sqrt{\frac{2xt}{V_c \times h \times \sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{2 \times 10}{212 \times 0,22 \times 1,73}} = 0,50 \text{ m}$$

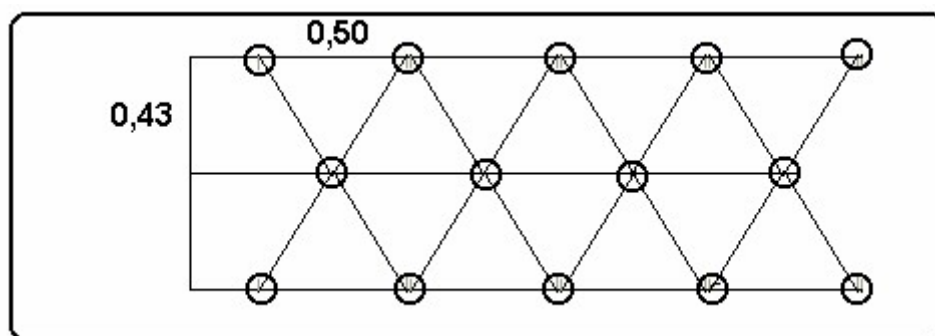


Figura 29 – Plano de inserção $t = 10 \text{ s}$

considerando um tempo de inserção $t = 5 \text{ s}$

$$\text{espaçamento} - a = \sqrt{\frac{2xt}{V_c \times h \times \sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{2 \times 5}{212 \times 0,22 \times 1,73}} = 0,35 \text{ m}$$

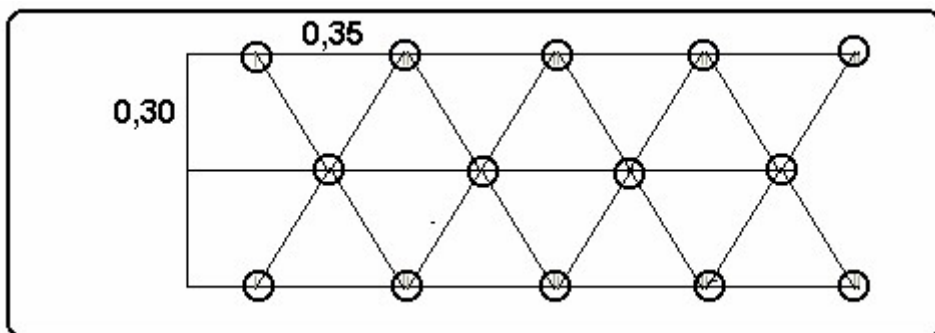


Figura 30 – Plano de inserção $t = 5 \text{ s}$

Concreto C – Concreto com 0 a 50 mm de abatimento

Pela Tabela 2 (pág. 14), é recomendado o vibrador de imersão com os seguintes dados:

- Diâmetro – 65 mm
- Capacidade – 10 m³/h
- Raio de ação – 600 mm

Determinação da intensidade de vibração – $V_c = \frac{1800}{10} = 180 \text{ s/m}^3$

considerando um tempo de inserção $t = 10 \text{ s}$

$$\text{espaçamento} - a = \sqrt{\frac{2xt}{V_c \times h \sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{2 \times 10}{180 \times 0,22 \times 1,73}} = 0,54 \text{ m}$$

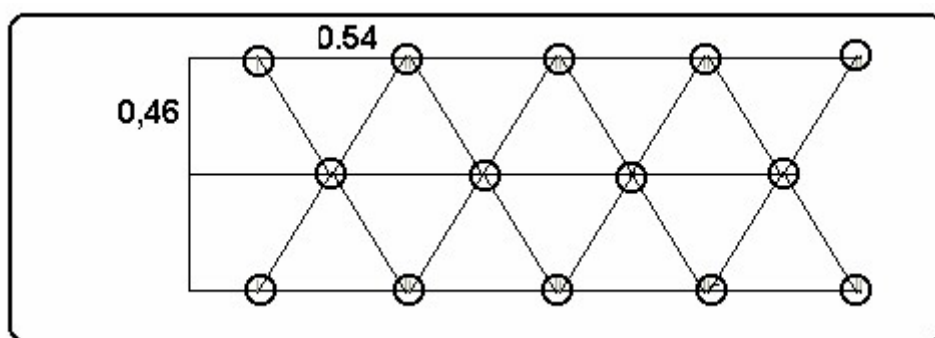


Figura 31 – Plano de inserção $t = 10 \text{ s}$

considerando um tempo de inserção $t = 5 \text{ s}$

$$\text{espaçamento} - a = \sqrt{\frac{2xt}{V_c \times h \sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{2 \times 5}{180 \times 0,22 \times 1,73}} = 0,38 \text{ m}$$

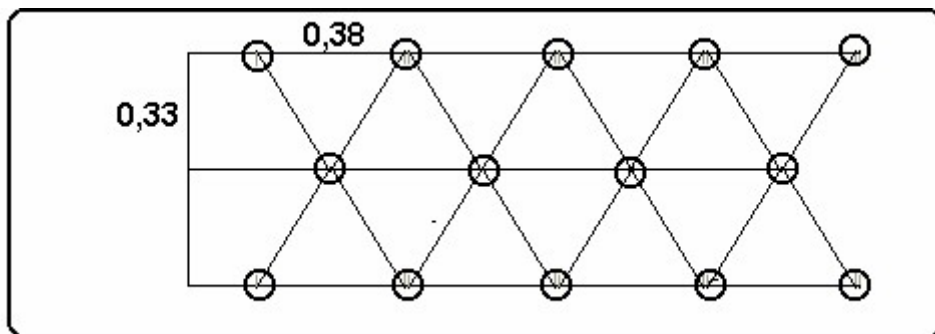


Figura 32 – Plano de inserção $t = 5 \text{ s}$

ANEXO 3 - MEDIÇÃO DA FREQUÊNCIA DE VIBRADORES INTERNOS

Para medir a frequência de um vibrador interno pode-se utilizar um tacômetro de agulha. Este dispositivo é bastante simples e fácil de operar, bastando tocar o vibrador e ajustar o cursor sobre uma escala para obter a leitura da respectiva frequência.

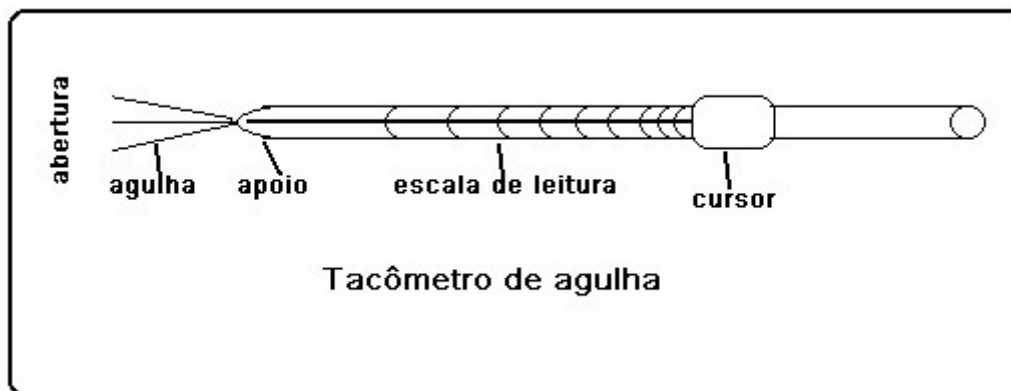


Figura 33 – Tacômetro de agulha

Procedimento:

- Apoiar o tacômetro sobre a superfície do vibrador o mais próximo possível da sua extremidade.
- Observar a oscilação da agulha.
- Deslocar o cursor ao longo do tacômetro.
- Observar a variação da amplitude da oscilação da agulha, ajustando o cursor até que consiga uma amplitude máxima.
- Ler o valor da frequência indicado na escala.

Eventualmente, esta medição poderá ser efetuada sem que o vibrador esteja imerso no concreto, para que se faça uma avaliação de sua frequência livre. Entretanto, como alertado anteriormente, deve-se evitar ao máximo operar um vibrador de imersão fora do concreto por muito tempo.

ANEXO 4 - MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES

A vibração tem sido usada em quase todas as atividades ligadas ao concreto. A teoria e os conhecimentos dos mecanismos que regulam os fenômenos ligados à vibração são bastante limitados. Serão apresentadas a seguir algumas relações matemáticas que regem os fenômenos vibratórios simples.

Os vibradores geralmente utilizam massas giratórias excêntricas, que geram movimentos harmônicos caracterizados por uma onda senoidal.

1 - Equações do movimento harmônico simples

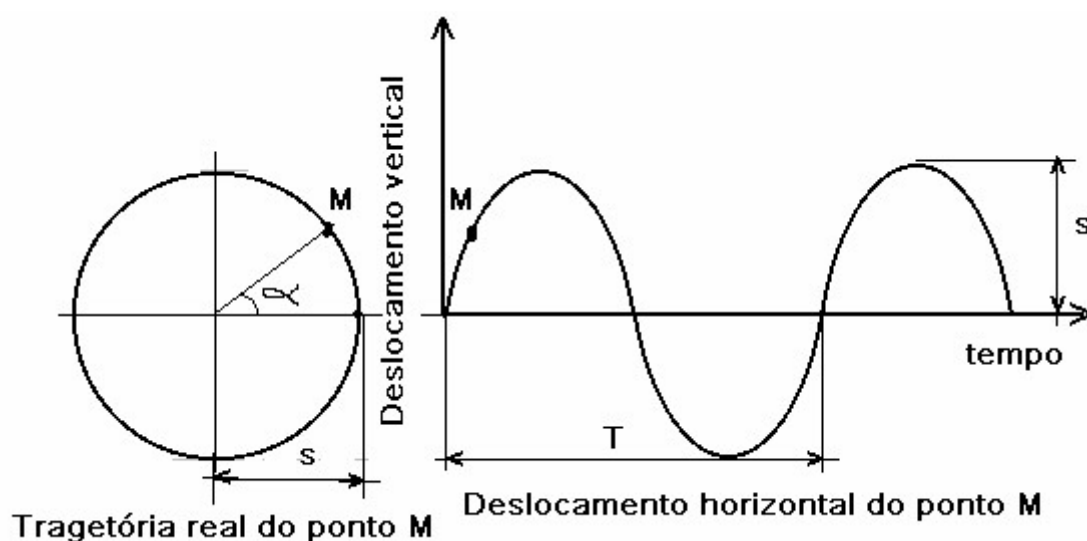


Figura 34 – Curva do movimento

Definições:

amplitude - s

frequência - $f = 1/T$

velocidade angular - $\omega = 2\pi f$

A curva representativa do movimento é dada pela equação:

equação do movimento harmônico - $x = s \cdot \sin \omega t = s \cdot \sin 2\pi f t$

derivando a equação do movimento, obtém-se:

equação da curva da velocidade - $x' = 2\pi f s \cdot \cos 2\pi f t = v \cdot \cos 2\pi f t$

a derivada segunda será:

equação da curva da aceleração - $x'' = -4\pi^2 f^2 s \cdot \sin 2\pi f t = -a \cdot \sin 2\pi f t$

onde: a aceleração será dada pela expressão $a = 4\pi^2 f^2 s$

2 - Força centrífuga – Aplicações

A força centrífuga gerada por uma massa excêntrica giratória tem a seguinte expressão:

$$F = m \cdot a = m \cdot 4 \pi^2 f^2 s$$

onde:

m.g = Peso da massa excêntrica

A força centrífuga é especificada em **N**, entretanto alguns fabricantes de equipamentos especificam a força centrífuga em **kp = daN**.

Exemplo: Um motovibrador cuja massa excêntrica pesa 1 kg tem seu centro de gravidade situado a 5 cm do centro de giro. Com rotação de 3.000 rpm terá a seguinte força centrífuga, sendo:

$$m = 1/981 \text{ (g = 981 m/s}^2\text{)}$$

$$s = 5 \text{ cm}$$

$$f = n/60 = 3.000 / 60 = 50 \text{ Hz}$$

$$F = 1/981 \times 4 (3,14 \times 50)^2 \times 5 = 125,63 \text{ kp ou } 12,563 \text{ N}$$

3 - Aceleração vibratória

A aceleração vibratória é um valor utilizado para especificar a aplicação de vibradores e está relacionada com um múltiplo da aceleração da gravidade.

Por exemplo, especifica-se que para vibrar um determinado material em uma mesa vibratória deve-se ter uma aceleração vibratória **a' = 3,5**. Isto significa que a aceleração da força centrífuga deverá ser 3,5 vezes superior à aceleração da gravidade.

Nas mesas vibratórias recomenda-se o valor **a'** entre 5 e 6, enquanto para vibradores de imersão o valor ideal é **a' = 3**. Para determinar na prática o valor da aceleração vibratória de um vibrador deve-se utilizar a seguinte relação adotada pela empresa (MAVI) (7):

$$a' = \frac{0,0039 \times s \times n^2}{g}$$

onde:

s – Amplitude

n – Frequência de vibração

g – Aceleração da gravidade

4 - Torque

Segundo a orientação da MAVI, para determinar a amplitude de vibração utiliza-se uma grandeza, **Torque**, fornecida em uma Tabela dos produtos, que tem a expressão:

$$T = P \times A$$

onde:

P = Peso total a ser vibrado

A = Amplitude do deslocamento

Exemplo de aplicação (Catálogo MAVI):

Deseja-se instalar um conjunto de vibradores (2) em uma peneira vibratória, cuja aceleração vibratória deverá ser **a' = 3**.

O peso total a ser vibrado é 350 kg.

Inicialmente escolhe-se um vibrador com 1150 rpm.

Admite-se que para a peneira a amplitude de vibração seja 0,5 cm.

Aplicando-se a fórmula da aceleração vibratória, teremos:

$$a' = 0,0039 \times 1150^2 \cdot 0,5 / 981 = 2,63$$

Este valor está abaixo do recomendado. Admitindo uma amplitude de 0,7 cm, a aceleração vibratória será:

$$a' = 0,0039 \times 1150^2 \times 0,7 / 981 = 3,68, \text{ que satisfaz.}$$

Considerando a nova amplitude e o peso total a ser deslocado 350 kg, teremos:

$$T = 350 \times 0,7 = 245 \text{ kg.cm}$$

Como é recomendável a utilização de dois vibradores no conjunto, deverão ser escolhidos dois vibradores com pelo menos 143 kg.cm.

As características dos vibradores se assemelham com a do produto S -20 – 6.

ANEXO 5 - CÁLCULO DA VELOCIDADE DE TRANSLAÇÃO DE UMA VIBROACABADORA DE FÔRMAS DESLIZANTES

A velocidade de translação de uma vibroacabadora de fôrmas deslizantes deverá ser ajustada, durante a operação, conforme as condições em que estiver operando, dependendo do concreto, dimensões do pavimento etc. Entretanto, pode-se estabelecer uma velocidade de translação básica do equipamento, que servirá como ponto de partida para a execução dos trabalhos.

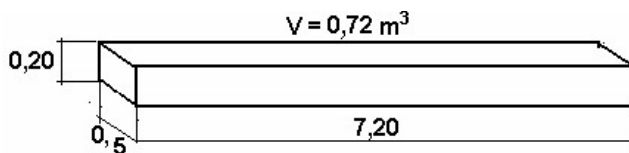
Para facilitar o entendimento da metodologia aplicada serão apresentados dois exemplos com dados reais:

- Pavimentos com 0,20 e 0,22 m executados com uma vibroacabadora Gomaco, utilizando modulação de fôrma para 7,20 m de largura.
- O abatimento do concreto utilizado é de 40 mm.
- Escolha dos vibradores: Conforme recomendação da ACI, para abatimentos inferiores a 50 mm, são recomendados vibradores de diâmetros de 55 e 60 mm. O equipamento é dotado de vibradores de 55 mm, com frequência de 8.000 vpm com raio de ação de 500 mm.
- Quantidade de vibradores: O espaçamento recomendado entre os vibradores é da ordem de 450 mm., podendo ser ajustado para valores menores de acordo com as condições operacionais do equipamento em função da obra a ser executada. Neste caso segue-se a mesma rotina de cálculo adotando-se o novo valor de espaçamento. Para estabelecer a quantidade de vibradores, pode-se usar a expressão:

$$n = 1 + l/e, \text{ onde: } l = 7,20 \text{ m e } e = 0,45 \text{ m}$$

teremos: $n = 17$ vibradores

- Capacidade de compactação: Segundo dados dos fabricantes, o vibrador escolhido tem $C_c = 10,00 \text{ m}^3/\text{h}$, portanto o conjunto terá $170 \text{ m}^3/\text{h}$ ou $2,83 \text{ m}^3/\text{min}$.
- Volume adensado: O conjunto de vibradores irá adensar um volume de concreto conforme ilustrado na Figura 35, considerando os dados fornecidos (espessura de 0,20 m)



$$\text{Volume unitário} \\ v = 0,20 \times 0,50 \times 7,20 = 0,72 \text{ m}^3$$

Figura 35 – Volume unitário

- Tempo de vibração: Considerando a capacidade de vibração do conjunto e o volume unitário a ser adensado, o tempo necessário para a operação será:

$$t = \frac{0,72 \text{ m}^3}{2,83 \text{ m}^3/\text{min}} = 0,25 \text{ min.}$$

- Velocidade de translação do equipamento: Considerando que, neste exemplo, para adensar uma laje de 0,5 m de comprimento necessita-se de 0,25 min., a velocidade do equipamento para percorrer este segmento será:

$$V = \frac{0,5}{0,25} = 2,0 \text{ m/min}$$

Este é um valor ideal da velocidade do equipamento que poderá ser tomada como parâmetro no início da operação, devendo ser ajustada ao longo dos trabalhos, conforme necessidades e experiência do operador.

Para o cálculo da produção do equipamento em função da velocidade, deve-se considerar um rendimento da ordem de 83% - recomendado pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) -, considerando eventuais paradas por falta de material, manutenção ou outros fatores independentes da operação.

Neste caso, a velocidade a ser considerada no cálculo da produção horária do equipamento será:

$$V = 0,83 \times 2 = 1,66 \text{ m/min}$$

Isso representa uma produção linear de 99,6 m/h ou 143,42 m³/h.

Para a espessura de pavimento de 0,22 m, utilizando o mesmo critério, teremos:

- Volume unitário $v = 0,22 \times 0,50 \times 7,20 = 0,792 \text{ m}^3$
- Tempo de vibração: Considerando a capacidade de vibração do conjunto e o volume unitário a ser adensado, o tempo necessário para a operação será:

$$t = \frac{0,792 \text{ m}^3}{2,83 \text{ m}^3/\text{min}} = 0,28 \text{ min.}$$

- Velocidade de translação do equipamento: Considerando que, neste exemplo, para adensar uma laje de 0,5 m de comprimento necessita-se de 0,28 min., a velocidade do equipamento para percorrer este segmento será:

$$V = \frac{0,5}{0,28} = 1,78 \text{ m/min}$$

Para o cálculo da produção do equipamento em função da velocidade, deve-se considerar um rendimento da ordem de 83% - recomendado pelo DNIT - considerando eventuais paradas por falta de material, manutenção ou outros fatores independentes da operação.

Neste caso, a velocidade a ser considerada no cálculo da produção horária do equipamento será:

$$V = 0,83 \times 1,78 = 1,48 \text{ m/min}$$

Isso representa uma produção linear de 88,64 m/h ou 140,66 m³/h.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – Rixner, Sepp e outros. Fundamentos sobre la Compactacion del Hormigon - WACKER. Munique, 1999.
- 2 – Américan Concrete Institut – Journal – Abril, 1960.
- 3 – Londoño, Carlos Alberto. Vibracion del Concreto para Pavimentos. Boletin ICPC, nº 79, 1997.
- 4 – Forssblad, Lars. Concrete Vibration – What's Adequate? Concrete International. December, 1995.
- 5 – Associação Brasileira de Cimento Portland. ABCP. Concreto Vibrado. Boletim Nº 37, 1940.
- 6 – American Concret Institut – Behavior of Fresh Concret During Vibration – ACI 309.1 R – 93 (Reapproved 1998).
- 7 – MAVI - Máquinas Vibratórias Ltda. – Catálogo técnico.