

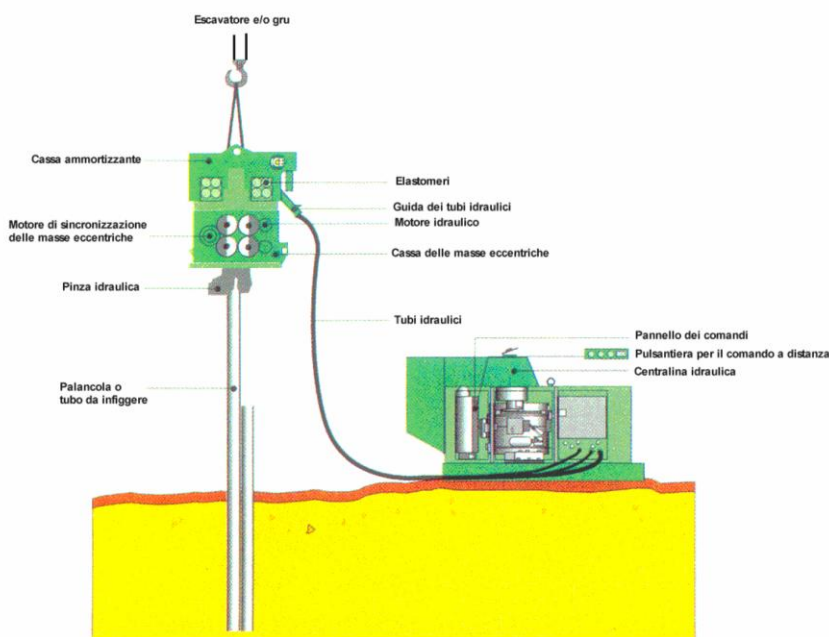
CENNI STORICI

Negli anni precedenti alla seconda guerra mondiale in Russia, per ovviare all'impossibilità d'un utilizzo intensivo dei battipali a vapore a causa del gelo, il governo russo commissionò al **professor Balkan** di verificare se il fenomeno dell'infissione nel terreno di una barra sottoposta a vibrazione potesse essere trasformato in un processo industriale per l'infissione di pali. Gli esperimenti condotti dimostrarono che le vibrazioni verticali indotte nel terreno dell'elemento da infiggere facevano diminuire la coesione del suolo fino all'80/90 %. Il professor Balkan, accertando che la metodologia era idonea ad infiggere palancole, tubi e travi ad H, sviluppò un gran numero di formule per spiegare il fenomeno. Negli anni 60 in Europa svilupparono queste macchine che trovarono immediata applicazione nel campo delle imprese di costruzione. Queste macchine furono chiamate battipali vibranti o vibroinfissori. Fino agli anni 70 tutti questi vibroinfissori erano azionati elettricamente, poi lentamente furono introdotti quelli a funzionamento idraulico.

Il loro successo fu enorme tanto che le imprese li adottarono immediatamente, in special modo per le macchine d'elevata potenza.

I vantaggi erano, oltre al loro ridotto peso ed ingombro, la loro sicurezza e affidabilità d'esercizio.

PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN VIBRATORE



Il vibroinfissore è una macchina che genera delle vibrazioni verticali ed è composta da due parti principali ben distinte e collegate elasticamente fra loro:

- **La parte inferiore**, la più importante, è la **cassa eccentrici rotanti** ad alta velocità. Conseguentemente con la rotazione vengono generate forze verticali aventi un andamento sinusoidale che producono vibrazioni crescenti e decrescenti.

Le vibrazioni vengono trasmesse dal vibratore all'oggetto che si deve infiggere per mezzo di una pinza posta alla base della cassa eccentrici.

- **La parte superiore**, la **cassa ammortizzante**, è collegata mediante elastomeri (molle o gommoni elastici), alla cassa eccentrici e serve ad evitare la trasmissione delle vibrazioni che si propagano verso il mezzo di sollevamento.

Una centralina separata o il collegamento diretto ad un escavatore a seconda del sistema

utilizzato, provvede a fornire la necessaria potenza idraulica al funzionamento del vibroinfissore. Le vibrazioni generate nell'oggetto da infiggere, sia esso una palancole o un tubo aperto o chiuso, sono trasferite al terreno adiacente provocandone una rapida e temporanea diminuzione di consistenza. Questo fenomeno è denominato "**liquefazione del terreno**" e, conseguentemente la forza necessaria all'infissione ed estrazione risulta relativamente bassa.

Al cessare delle vibrazioni, il terreno tende ad assumere nuovamente la sua condizione d'origine permettendo all'oggetto infisso di trasferire il carico al terreno senza il rischio di deformazioni. Possiamo pertanto semplificare, affermando che l'infissione avviene per spostamento di terreno; i vari grani di terra, assestandosi, fanno spazio all'elemento da infiggere, lo spazio intergranulare in questo caso diminuisce e di conseguenza diminuisce la percentuale di vuoti nel terreno.

Ovviamente tutto ciò ha senso se gli elementi da infiggere richiedono un minimo spostamento del terreno, come per le palancole, le travi ad H, i tubi aperti o chiusi di piccolo diametro; se invece i volumi da spostare sono dimensionalmente alti (tubi valvolati di grande diametro) o se il terreno ha un basso indice di vuoti (terreni coesivi) l'infissione mediante vibroinfissore risulta inefficace e pertanto è necessario ricorrere ad altre tecnologie.

TERRENI

Questo capitolo è molto controverso e sicuramente l'esperienza diretta di cantiere sarà sempre più efficace in termini pratici.

La controversia nasce dal fatto che non esiste, a nostra conoscenza una teoria che possa qualificare con precisione il terreno adatto alla vibroinfissione. Generalmente i geotecnici eseguono calcoli statici per le fondazioni e non si occupano del comportamento dinamico del terreno, viceversa l'infissione dei pali, specialmente quando si utilizza un vibroinfissore, necessita di un'analisi dinamica dei suoli e dell'uso della teoria di trasmissione delle onde applicata al terreno. Per essere in grado di predire se un terreno è adatto all'utilizzo di un vibroinfissore bisogna eseguire uno "studio di infissione" applicando le formule che derivano dall'esperienza diretta maturata nei cantieri.

- Gli studi sui terreni sono effettuati per lo studio statico delle fondazioni, pertanto la correlazione che si può stabilire fra i dati è empirica e basata sull'esperienza di cantiere.

- I terreni infiggibili tramite vibrazioni possono essere suddivisi in due categorie fondamentali:

"sabbiosi" Il cui comportamento è quello dei terreni drenati senza coesione;

"argillosi" Il cui comportamento è quello dei terreni non drenati ad alta coesione.

Nel terreno a comportamento sabbioso ha particolare importanza la resistenza alla punta, mentre in quello a comportamento argilloso prevale la superficie laterale (superficie bagnata). Il terreno assimilabile a "sabbioso" può essere suddiviso in 5 zone di resistenza, da sciolto a molto denso. Le caratteristiche geomeccaniche sono citate nella tabella 1 riportata di seguito, comunque a grandi linee questi terreni hanno un angolo d'attrito interno (ϕ) che varia da 22° a 42°.

- Il terreno assimilabile a "argilloso" può essere suddiviso in 7 zone di resistenza che vanno dal molto soffice al moto duro con valori di taglio non drenato (S_u calcolate in KPa) che variano tra 5 e 1200 KPa. - L'alternanza degli strati di terreno e la permeabilità dei singoli strati e la loro fluidificazione durante l'infissione gioca un ruolo importante per stabilire se il terreno è idoneo all'infissione.

- La presenza d'acqua può aiutare l'infissione grazie all'azione lubrificante che si crea tra il terreno e l'oggetto da infiggere.

- Nel caso d'infissione di palancole bisogna tenere in particolare conto della verticalità fra le parti a contatto e dell'attrito che si genera nel gergame, il quale tende a dissipare la forza di infissione producendo calore. Tale valore d'attrito non è calcolabile e purtroppo è spesso fonte di problemi.

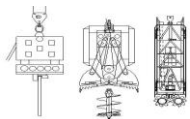
- Infine, il rendimento del vibroinfissore utilizzato (energia fornita dalla centralina ed utilizzata dal vibroinfissore) e la frequenza alla quale si sta operando.

Come sappiamo, la maggior parte dei casi le prove effettuate in situ sono le seguenti:

- SPT (Standard penetration test)

- CPT (Prova penetrometrica con il cono)

Per quanto concerne i terreni non coesivi si è stabilita una correlazione tra i dati ottenuti dalle prove in situ (SPT e CPT), la densità relativa e l'angolo d'attrito interno (correlazione Meyerhof, 1956; Peck e altri 1974). Queste correlazioni ci mettono in condizione di poter calcolare i coefficienti d'attrito che saranno utilizzati in seguito per il calcolo della resistenza opposta dal terreno all'infissione.



Le tabelle riportate elencano le correlazioni di cui sopra, i coefficienti d'attrito attribuiti alle varie categorie calcolati in funzione dei dati geotecnici.

Tabella 1 - Terreni non coesivi drenati

Zone	"sabbioso"	SPT N	Densità Relativa	Penetrometro Cono Q_c (MPa)	β_p coefficiente d'attrito alla punta	β_l coefficiente d'attrito laterale	Commenti Sull'infissione
1	Molto sciolto	< 4	0-0,2	0-0,2	0,2	0,05	Molto facile
2	Sciolto	4-10	0,2-0,4	2-4	0,25	0,05	Facile
3	Medio denso	10-30	0,4-0,6	4-12	0,3	0,1	Normale
4	Denso	30-50	0,6-0,8	12-20	0,4	0,15	Difficoltosa
5	Molto denso	> 50	0,8-0,98	> 20	0,5-0,7	0,25	Problematica

Tabella 2 – Terreni coesivi non drenati

Zone	"argilloso"	SPT N	S_u (KPa)	Penetrometro Cono Q_c (MPa)	β_p coefficiente d'attrito alla punta	β_l coefficiente d'attrito laterale	Commenti Sull'infissione
1	Molto soffice	< 2	0-12,5	0,025	1	0,1	Affonda per peso
2	Soffice	2-6	12,5-25	0,25-05	1	0,15	
3	Stabile	6-20	25-50	0,5-1	1	0,17	Molto facile
4	Compatto	$\geq 20^*$	050-100	1-2	1	0,2	Facile
5	Molto compatto	$\geq 20^*$	100-200	2-4	1	0,3	Normale
6	compatto	$\geq 20^*$	200-400	4-8	1	0,4	Difficoltosa
7	Duro	$\geq 20^*$	> 400	> 8	1	0,5	Molto difficoltosa
	Molto duro						Problematica

Esse devono intendersi come guide per il calcolo della resistenza opposta dal terreno e di conseguenza della forza centrifuga (F_c) necessaria all'infissione e servono a mettere in relazione il comportamento statico con quello dinamico.

(coefficiente β d'attrito).

I valori di SPT nell'argilla non sono rappresentativi per il calcolo della resistenza al taglio non drenato.

** S_u (Kpa) = Q_c / N_k (ove N_k è un fattore empirico di conversione di valore compreso tra i 15 e 20).

N.B. I valori β espressi in tabella sono solo indicativi e potrebbero risultare differenti a causa della non omogeneità del terreno, bisogna tenere conto anche delle variazioni di durezza del terreno nonché della stratigrafia.

Calcolo della resistenza del terreno all'infissione:

$R = Q_c * S_1 * \beta_h + Q_c * S_p * \beta_p$ di ogni strato di terreno (1) ove Q_i è riferito allo strato di terreno relativo.

Tenendo conto delle eventuali alternanze di terreni la resistenza totale (R_t) sarà la somma delle singole resistenze calcolate sugli strati di terreno. La resistenza totale sarà $R_t = R_0 + R_1 + \dots + R_i$ (2)

Ove non si avessero i dati geotecnici elencati sulla tabella superiore forniamo qui di seguito alcuni parametri che permetteranno di dare in prima istanza un'idea sulla capacità di infissione di un vibroinfissore in un terreno (ovviamente questi parametri vanno presi con cautela e valgono solo per terreni non coesivi)

- **Indice dei vuoti** (sempre riferito a terreni a comportamento sabbioso). E' evidente che la capacità di infissione di un vibroinfissore in un terreno sarà tanto maggiore quanto sarà alto (in percentuale) l'indice dei vuoti. Un valore indicativo dei vuoti del 50% o maggiore indica che il terreno è favorevole all'infissione.

- **Angolo d'attrito** (sempre riferito a terreni a comportamento sabbioso). Se tale valore risulta compreso tra 22° e 42° il terreno è favorevole all'infissione.

- **Limite liquido** (sempre riferito a terreni a comportamento sabbioso). Qualora esso sia inferiore a 50 il terreno risulterà favorevole all'infissione.

PARAMETRI DI SCELTA DI UN VIBROINFISSORE

Il capitolo precedente ci ha permesso di calcolare, sebbene con regole empiriche, la resistenza opposta da un terreno all'infissione di un oggetto utilizzando un vibroinfissore.

In questo capitolo svilupperemo alcune considerazioni sulla scelta del vibroinfissore idoneo a vincere la resistenza summenzionata ed a portare a buon fine l'infissione. Partendo dalla formula (2) si deve calcolare la forza dinamica necessaria ad infiggere l'oggetto.

$$F_d > R_t$$

In infissione $F_d = F_c + P_d$

P_d = peso dinamico del vibroinfissore (cassa eccentrici + pinza) + peso dell'elemento da infiggere.

In estrazione $F_d = F_c + P_d$

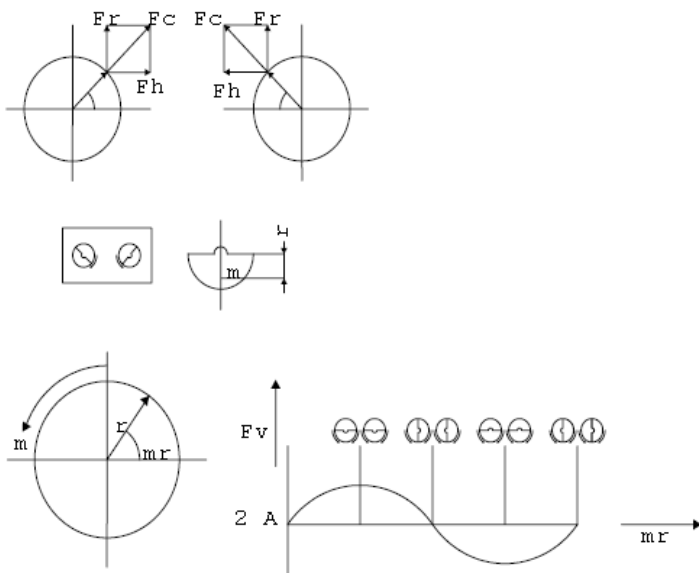
Valutiamo durante l'infissione, a causa delle resistenze che si incontrano, l'ampiezza di vibrazione tenderà a calare fino a rendere impossibile l'ulteriore penetrazione. Si è calcolato che la perdita d'ampiezza al metro per un tubo infisso è in funzione della resistenza al taglio del suolo, della sua plasticità nonché del diametro del tubo. Tale perdita può essere espressa con la seguente formula:

$$\Delta A = \text{da } 0,005 \text{ a } 0,008 * D * S_u$$

In funzione di quanto sopraesposto è necessario calcolare prima di intraprendere un lavoro l'ampiezza di vibrazione a vuoto, che si ottiene con la seguente formula:

$$2A(\text{mm}) = \frac{2000 * M_{\text{eccentrico}}(\text{kNm})}{P_d(\text{kN})}$$

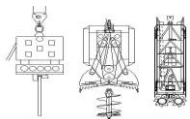
ove 2A è l'ampiezza fra due picchi successivi come si può vedere nel disegno sottostante.



Si è riscontrato, nella pratica, che data la difficoltà a determinare la perdita d'ampiezza di vibrazione, sarebbe raccomandabile che l'ampiezza minima a vuoto superasse i 5 mm per i terreni a comportamento "argilloso" e di 3 mm per i terreni a comportamento "sabbioso".

Il **Meccentrico** è una caratteristica della macchina da utilizzare, un dato che solitamente viene fornito dai costruttori di vibroinfessori nei loro prospetti illustrativi. Ovviamente esistono delle tecniche applicative da utilizzarsi di volta in volta a seconda delle necessità per facilitare l'infissione in terreni difficili.

Nelle sabbie ove fosse permesso, l'infissione, viene enormemente facilitata dall'uso di **jetting** (**acqua in pressione**) lungo tutta la lunghezza dell'elemento da infiggere; l'acqua in pressione evita l'addensamento delle sabbie aprendo la via all'elemento. Nelle argille può essere d'aiuto l'acqua o qualche altro composto che aiuti la riduzione dell'attrito che si crea fra l'elemento ed il terreno durante l'infissione.



TIPI DI VIBROINFISSORI

- **Vibroinfissori a frequenza normale** (1200- 1770 giri /min. a 18-24 Hz)

I vibroinfissori a frequenza normale combinano un altro momento eccentrico ed un'alta ampiezza di vibrazione e sono utilizzati ove si rendono necessarie queste caratteristiche per infiggere oggetti pesanti e/o lunghi, così come per ottenere i migliori risultati di compattazione. Queste macchine sotto sforzo operano con frequenze molto prossime a quelle dei suoli o dei materiali da costruzione, pertanto tendono a trasmettere vibrazioni nelle vicinanze dove operano pali; le vibrazioni potrebbero causare danni ad edifici o a strutture attigue. Sono ancora molto usati per l'infissione di tubi aperti, tubi valvolati o travi ad H.

- **Vibroinfissori ad alta frequenza** (1800-2400 giri/min. o 30-40 Hz).

I vibroinfissori ad alta frequenza combinano un'ampiezza bassa ad un'alta frequenza ed un'elevata forza centrifuga.

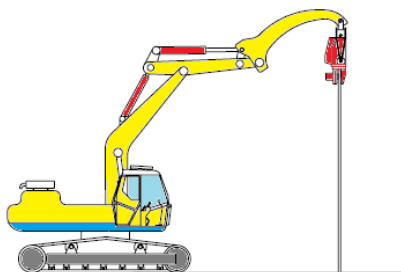
Tali vibroinfissori raggiungono rapidamente la velocità operativa, pertanto il momento eccentrico risulta limitato, ne consegue che la risonanza indotta nel terreno e nelle costruzioni adiacenti rimane minima durante la fase d'avvio e d'arresto, mentre è praticamente ininfluenza durante la fase di infissione ed estrazione.

I vibroinfissori ad alta frequenza operano ad una velocità che varia da 1800 a 2400 giri al minuto (30-40 Hz di frequenza) che equivalgono quasi a 1,5 volte la frequenza della maggior parte dei terreni eliminando così tutte le vibrazioni dannose.

Alcuni costruttori per ovviare ai problemi di surriscaldamento installano la lubrificazione forzata dei cuscinetti all'interno della cassa eccentrici, minimizzando di fatto i punti di maggiore usura di questi modelli.

Vibroinfissori per escavatori

Essi sono nati per supplire ad una necessità sempre maggiore: l'infissione di palancole relativamente corte (max. 8 metri) in ambienti urbani. Questo lavoro necessita ovviamente di spazi ristretti, per cui i tradizionali scavatori a fune come supporto ai vibroinfissori risultano troppo ingombranti e onerosi dal punto di vista pratico. I lavori in zone urbane sono sempre più limitati in estensione e nel tempo d'esecuzione, di qui la necessità di avere attrezzature a basso costo sia per la movimentazione che per l'utilizzo. I vibroinfissori per escavatori rispondono a queste esigenze: infatti: possono essere assemblati su normali escavatori idraulici attingendo alla potenza idraulica dell'escavatore stesso, e pertanto non necessitano nemmeno della centralina, e sono di ridotte dimensioni per cui possono essere utilizzati appunto in spazi angusti e addirittura sotto i ponti.



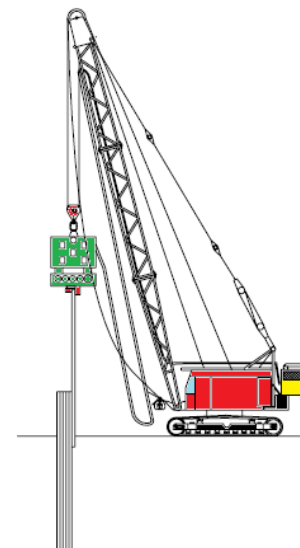
Attualmente sul mercato vi sono due tipologie di macchine: quelle fisse e quelle che hanno la possibilità di ruotare la cassa eccentrici di 90° rispetto al vibroinfissore permettendo la presa della palancola direttamente con la pinza minimizzando così i tempi morti. Questi particolari vibroinfissori, lavorano generalmente ad alta frequenza, caratteristica essenziale per poter lavorare in ambiente urbano dove le vibrazioni indotte potrebbero creare disturbi alle strutture attigue al cantiere. Con apposite pinze, questi vibroinfissori sono anche utilizzati per l'infissione di pali in legno in prossimità di difese spondali.

Vibroinfissori a frequenza variabile

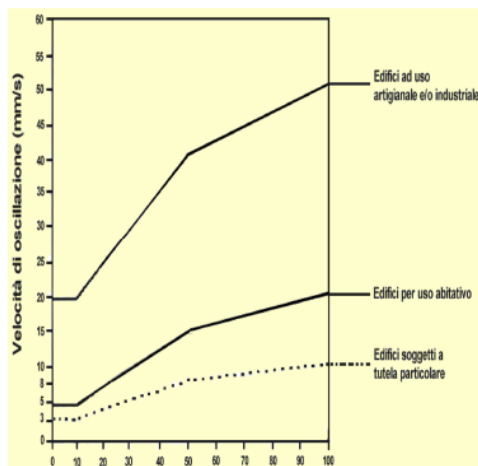
Questi vibrator sono gli ultimi nati nel mondo della vibroinfissione per rispondere ad una esigenza molto sentita: quella delle emissioni nocive. Qualsiasi vibroinfissore, soprattutto quelli a frequenza standard, ma anche quelli ad alta frequenza, durante la fase d'avvio e di arresto operano con frequenze molto vicine a quelle di risonanza dei terreni e dei materiali di costruzione.

Tale modo di operare fa in modo che le vibrazioni vengano trasmesse intorno all'oggetto infisso creando così effetti nocivi.

La legislazione tedesca a protezione dell'ambiente ha creato delle apposite norme per regolamentare il settore.



La tabella riporta la velocità d'oscillazione consentita (**velocità di picco delle particelle**) in funzione della frequenza di vibrazione.

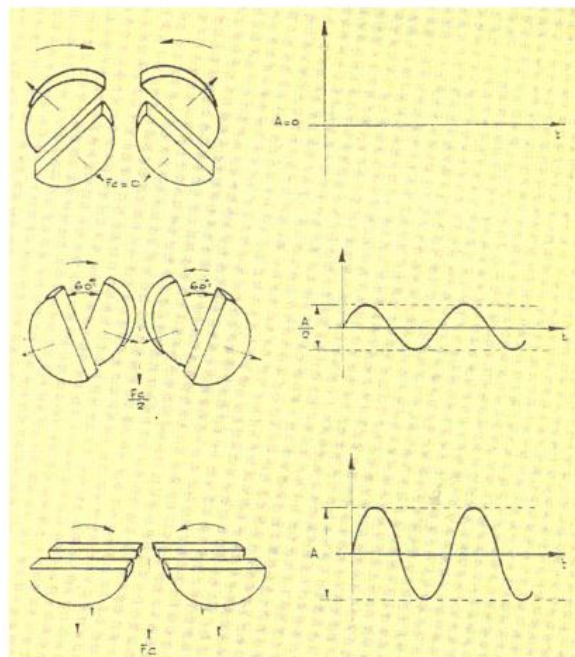


Le linee delimitano, secondo gli edifici, i limiti consentiti di vibrazione. Per ovviare a questo problema è stato concepito un nuovo vibroinfissore che permette di controllare l'ampiezza di vibrazione variando il momento eccentrico.

Vi sono due posizioni limite: la prima si ha mantenendo le coppie di masse in opposizione (**fase $A = 0$**), in questo caso il momento risultante è nullo e non si genera nessuna vibrazione. La seconda con le masse in fase, pertanto il vibratore diventa standard.

La prima posizione diventa importante all'avvio e all'arresto del vibroinfissore. Una volta raggiunta la velocità massima di vibrazione (stiamo parlando di vibroinfessori ad alta frequenza di rotazione), le masse possono essere ruotate di 180° , generando il momento massimo e l'ampiezza massima, che trasmessa ad alta frequenza (30-40 Hz, a 2300 giri al minuto) uscirà dal campo delle frequenze dannose.

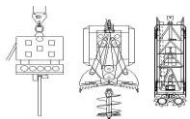
Ovviamente può essere impostata qualsiasi posizione intermedia. La variazione del momento avviene tramite un comando a distanza (telecomando in dotazione alla centralina che fornisce la potenza idraulica al vibroinfissore), in modo tale che l'operatore possa intervenire al momento più opportuno sulla posizione degli eccentrici. La tabella (a destra) riporta per facilitarne la comprensione un confronto fra i vari vibroinfessori, la velocità delle particelle e la frequenza di vibrazione. I vibroinfessori standard hanno la sigla **LF**, quelli ad alta frequenza **HF** e quelli a momento variabile **RF**. Si può notare che:



- **I vibroinfessori LF**, (bassa frequenza, attorno ai 1500 giri al minuto o 22 Hz) oltre alle fasi d'avviamento e di fermo anche a regime operativo rientrano nella fascia limite (cioè la C) le cui vibrazioni sono particolarmente avvertite e pertanto si consiglia l'utilizzo in aree di lavoro lontane dai centri abitati.

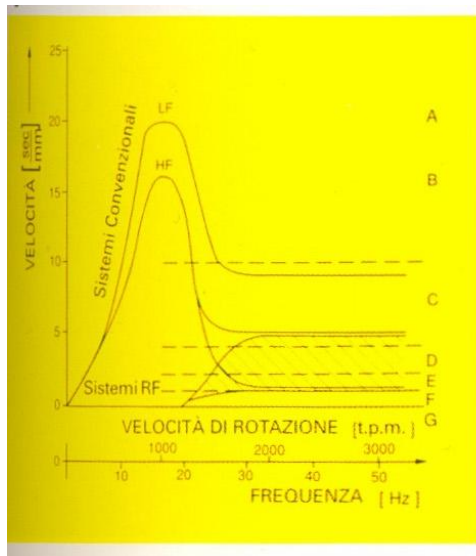
- **I vibroinfessori HF**, (alta frequenza, attorno ai 2000/2300 giri al minuto o 30-40 Hz) la zona d'allarme viene sfiorata all'avvio e all'arresto della macchina, mentre a regime operativo essi girano a frequenze ben al di sotto dei limiti posti dalle norme.

- **I vibroinfessori RF**, (a momento variabile) si avviano senza alcuna vibrazione ed una volta raggiunta la velocità di rotazione di 2000/2300 giri al minuto o 30-40 Hz iniziano a vibrare, agendo pertanto come gli HF a regime, e pertanto al di sotto dei limiti imposti dalle norme. All'arresto si opera nella stessa identica modalità.



Questa caratteristica, ben evidenziata nel grafico, fa sì che i lavori effettuati con modelli a momento variabile non creino problemi all'ambiente a causa degli effetti dannosi delle vibrazioni, in quanto queste macchine operano sempre al di sotto dei limiti posti dalle norme.

Ultimamente l'interesse delle imprese si è rivolto verso questi ultimi modelli e alcuni costruttori hanno presentato sul mercato vibroinfessori a momento variabile per escavatori, permettendo così d'operare nell'ambiente urbano con macchine di piccole dimensioni che hanno gli stessi benefici delle più grandi. Di questi modelli ne sono apparsi sia a cassa eccentrica fissa, sia a cassa eccentrica rotante di 90° rispetto alla cassa ammortizzante, garantendo dal punto di vista del rispetto dell'ambiente circostante un salto qualitativo enorme, così da permettere l'uso anche in situazioni molto critiche (fronti di palazzi antichi).



Descrizione di sensibilità	Possibilità per delle persone di stare nelle costruzioni	Stima approssimativa degli effetti sulle strutture	Esempi
A insostenibile	proibito	rischio di crollo.	situazioni di emergenza
B spiacevole e rapidamente intollerabile	proibito	danno localizzato	arresto di automobili
C molto sensibile	difficilmente permesso	lesioni di murature	ascensori, tram
D abbastanza sensibile	per lavori manuali generici	inizio di una leggera lesione	leggero di mal di mare
E sensibile	per brevi periodi	nessun effetto sulle normali strutture	-
F a malapena sensibile	per lunghi periodi	nessun effetto	-
G insensibile	-	nessun effetto	-

CONCLUSIONI

L'uso dei vibroinfessori per infiggere elementi si rileva estremamente pratico e veloce se il terreno affrontato è idoneo. Per l'estrazione invece deve essere considerato come uno degli unici metodi esistenti.

La manovrabilità e l'estrema adattabilità di queste macchine ad affrontare situazioni di cantiere le rendono ambite dalle imprese di costruzione specializzate.

L'estensione d'uso, grazie ai vibroinfessori per escavatori, ha reso il vibroinfessore una macchina sempre presente nei cantieri ove per ragioni di sicurezza è necessario proteggere gli scavi.

Molto importante è stata l'innovazione dei vibroinfessori a momento variabile in quanto ha reso queste macchine utilizzabili in ogni circostanza, eliminando così anche i problemi causati dalle vibrazioni alle basse frequenze create all'avvio e all'arresto.

A conferma delle affermazioni di cui sopra possiamo dare alcuni dati significativi:

dal 1970 1992 sono stati venduti ad imprese italiane circa 250 macchine, nel solo 1997 i dati di vendita sono di 25 macchine circa. Il successo del noleggio di queste macchine non fa che rafforzare la sensazione che l'uso del vibroinfessore sia diventata pratica comune alle imprese di costruzione anche non specializzate in questo particolare settore.

Bibliografia:

Consolidamenti e fondazioni - M. Brignioti - D. Bottero Edizioni PEI PARMA