

Diseño geotécnico y dinámico de la cimentación para una máquina laminadora de mármol en la ciudad de Puebla, México.

Geotechnical and dynamic design of the foundation for a marble block cutting machine in Puebla City, Mexico

PhD. Oscar Andrés Cuanalo-Campos¹, Ing. (c) Reyna Ayala-Aranda², MSc (c). Leidy Joana Quintero-Lemus³

¹ Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8031-6958>, Email: oscarandres.cuanalo@upaep.mx

² Estudiante de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8084-5817>, Email: reyna.ayala@upaep.edu.mx

³ Estudiante de maestría, Universidad Santo Tomás, Colombia, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6356-1575>, Email: leidyquintero@usantotomas.edu.co

Cómo citar: O. A. Cuanalo-Campos, R. Ayala Aranda & L.J. Quintero-Lemus, "Diseño geotécnico de la cimentación para una maquina laminadora de mármol en la ciudad de Puebla, México", Rev. Ingenio, vol. 21, n°1, pp. 1-8, 2024, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.3588>

Fecha de recibido: 15 de marzo, 2023
Fecha aprobación: 29 de agosto de 2023

RESUMEN

Palabras clave:

Arcillas expansivas,
Bloque de cimentación,
Diseño geotécnico
y dinámico,
Especificaciones
constructivas, Máquina
laminadora.

Se presenta el diseño geotécnico y dinámico de la cimentación para una laminadora de mármol en Puebla, México, abordado desde el punto de vista geotécnico-constructivo ya que la ingeniería de cimentaciones es parte fundamental de esta disciplina, y especial el diseño de cimentaciones para maquinaria con partes giratorias que producen esfuerzos dinámicos en la cimentación y su terreno de apoyo. La cimentación consiste en un bloque de concreto armado cuyo terreno de cimentación superficial donde se pretendía desplantar la cimentación está constituido por arcillas expansivas, ubicadas principalmente al sur de la ciudad Puebla, abarcando las colonias de Agua Santa, San Ramón y las comunidades ubicadas en la periferia de la presa de Valsequillo, incluyendo San Francisco Totimehuacán, San Pedro Zacachimalpa y los Ángeles Tetela. Se incluye una descripción detallada de las características de la máquina laminadora de origen italiano, del bloque de cimentación y de las propiedades que debe cumplir el terreno de cimentación especificadas en los planos del fabricante; además, se indican los trabajos de exploración y muestreo, las pruebas de laboratorio, los resultados del diseño geotécnico y dinámico de la cimentación, las especificaciones constructivas, la supervisión y el control de calidad para la ejecución de la obra.

ABSTRACT

Keywords:

Swelling clays,
Foundation block,
Geotechnical and
dynamic design,
Construction
specifications, Rolling
machine.

This paper presents the geotechnical and dynamic design of the foundation of a marble block cutting machine in Puebla, Mexico, approached from the geotechnical construction point of view, since foundation engineering is a fundamental part of this discipline, especially the design of machine foundations with rotating parts that generate dynamic stresses in the foundation and its supporting soil. The foundation consists of a block of reinforced concrete, the superficial ground where the foundation was to be placed consists of expansive clays, located mainly in the south of the city of Puebla, including the neighborhoods of Agua Santa, San Ramón and the communities located on the periphery of the Valsequillo Dam, including San Francisco Totimehuacán, San Pedro Zacachimalpa and Los Ángeles Tetela. A detailed description of the characteristics of the Italian marble cutting machine, the foundation block and the characteristics that the foundation soil must meet, as specified in the plans provided by the manufacturer, are included. It also describes the exploration and sampling work, the laboratory tests, the results of the geotechnical and dynamic design of the foundation, the construction specifications, and the supervision and quality control of the work.

1. Planteamiento del problema

La empresa "Transformación Artística del Mármol" proyectó la instalación de una máquina laminadora de mármol de origen italiano en un predio ubicado en Valsequillo Puebla; dicha maquinaria transmitirán una carga dinámica de 415 kN al terreno de cimentación y cuenta con elementos giratorios a 90 ciclos por minuto. Generalmente la cimentación para máquinas vibratorias consiste en un bloque macizo de concreto armado desplantado en un terreno de buena calidad para soportar adecuadamente las cargas sin presentar falla

por cortante o punzonamiento, además el centro de gravedad de la máquina debe coincidir con el centro de gravedad de la cimentación para evitar fuerzas y pares de desbalanceo durante su operación y no presentar resonancia. Debido a lo anterior el diseño estructural de este bloque de cimentación varía considerablemente en relación al diseño por cortante y flexión de cimentaciones superficiales típicas como zapatas aisladas, zapatas corridas o losas [1, 2]. Las especificaciones técnicas estructurales y geotécnicas consignadas en los planos proporcionados por el fabricante italiano están descritas

Autor para correspondencia

Correo electrónico: oscarandres.cuanalo@upaep.mx (Oscar Andrés Cuanalo Campos)

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Artículo bajo la licencia CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>)



a detalle en los incisos 2.1.1 a 2.1.4 de este manuscrito; en el aspecto geotécnico se requiere un terreno de apoyo homogéneo y bien compactado hasta una profundidad de 15 m bajo la cimentación, el cual debe soportar una presión estática mayor a 100 kN/m^2 y tener un módulo de reacción promedio igual a $50,000 \text{ kN/m}^3$. En nuestro caso particular, el terreno de cimentación está constituido por cenizas volcánicas producto de las erupciones de los volcanes que existen alrededor de Puebla, el Popocatepetl y el Iztaccihuatl; superficialmente aparece una arcilla volcánica café oscuro expansiva y de alta plasticidad tipo CH con un espesor de 3.6 m, la cual es totalmente inadecuada para emplazar el bloque de cimentación de la laminadora, lo que obligó a proponer el retiro total de esta capa y realizar ajustes en el diseño geotécnico y dinámico de la cimentación propuesta por el fabricante de la máquina vibratoria. Las arcillas expansivas de origen volcánico que existen en la ciudad Puebla pueden ejercer presiones de expansión de hasta 20 kPa, lo que puede incluso levantar una edificación de 2 niveles debido a los cambios de volumen que experimentan por la variación de su consistencia durante las diferentes estaciones del año, contracción durante la época de secas y expansión durante la temporada de lluvias.

2. Explicaciones argumentadas

2.1 Características de la maquinaria

2.1.1 *Información general.* Del catálogo de la máquina fabricada por una empresa italiana, se obtuvo la siguiente información:

- Longitud máxima = 12.35 m
- Altura = 3.35 m
- Ancho = 4.60 m
- Peso total = 400 kN
- Número de cuchillas = 40
- Longitud de las cuchillas = 4.2 m
- Golpes por minuto = 90
- Potencia del motor principal = 75 kW

De los planos proporcionados por el fabricante se obtuvieron los siguientes datos:

2.1.2 De la máquina.

- Carga estática por columna = 75 kN
- Carga dinámica por columna = 70 kN
- Masa en movimiento = 140 kN
- Carga dinámica en la batería = 415 kN
- Carga estática en cada soporte = 50 kN

2.1.3 De la cimentación a base de un bloque de concreto armado.

- Largo = 11.74 m; ancho = 5.50 m; profundidad = 1.50 y 2.50 m.

- Resistencia del concreto $f'c = 30\,000 \text{ kN/m}^2$
- Acero de refuerzo de diámetro 3/8" y 5/8"

2.1.4 Del terreno de cimentación.

- Homogéneo y bien compactado hasta una profundidad de 15 m bajo la cimentación.
- El terreno de desplante de la cimentación debe soportar una presión estática mayor a 100 kN/m^2
- El módulo de reacción del terreno deberá ser en promedio igual a $50,000 \text{ kN/m}^3$

3. Metodología

Para realizar la revisión geotécnica y dinámica de la cimentación de la laminadora de mármol se llevaron a cabo las actividades que se describen a continuación:

3.1 Trabajos de exploración y muestreo

Con la finalidad de determinar la estratigrafía del sitio y obtener muestras representativas de los estratos de suelo se obtuvieron muestras cúbicas inalteradas a nivel de desplante de la cimentación y en el estrato de arcilla expansiva. Además, se realizó un sondeo de penetración estándar a 14.4 m de profundidad.

3.2 Ensayos de laboratorio

A las muestras obtenidas se les realizaron las siguientes pruebas de laboratorio (Tabla 1):

3.2.1 *Pruebas índice.* La determinación de los distintos tipos de suelos se basa en la clasificación SUCS, en la cual a cada uno se le da un nombre descriptivo o un símbolo, tomando en cuenta sus propiedades índice [3], las cuáles se calcularon con los respectivos ensayos de laboratorio incluyendo:

- Granulometría
- Contenido natural de agua
- Límites Atterberg
- Peso volumétrico
- Densidad de sólidos

3.2.2 *Pruebas mecánicas.* La resistencia cortante de una masa de suelo es la resistencia al esfuerzo cortante que la masa de suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él [4].

Para el estudio, se realizaron las pruebas de compresión simple y compresión triaxial no consolidada no drenada UU [5].

Tabla 1. Pruebas índice y mecánicas del terreno de cimentación de la laminadora de mármol

Muestra	1	2	3 Barril	4 Barril
	Inalt.	Inalt.	Denison	Denison
Prof. (m)	2	3	5	12
γ_m (kN/m ³)	17.1	16.8	15	17
W (%)	33.5	30.4	20.6	37.2
Granulometría				
G %	0	0	3	0
S %	12	16	18	14
F %	88	84	79	86
Límites A.				
LL %	66.2	57.3	47	72
LP %	23	24.2	27	28
IP %	43.2	33.1	20	44
SUCS	CH	CH	CL	CH
qu (kPa)	47	---	---	191.3
Triaxial UU				
c (kPa)	---	---	100	---
ϕ (°)	---	---	15	---

Nomenclatura y abreviaciones de la tabla

Inalt. → Inalterada

Prof. → Profundidad

Límites A. → Límites de Atterberg

CH → Arcilla de alta plasticidad

CL → Arcilla de baja plasticidad

γ_m → Peso específico

W → Contenido de agua

G → Gravas

S → Arenas

F → Finos

LL → Límite Líquido

LP → Límite Plástico

IP → Índice de Plasticidad

qu → Resistencia a compresión simple

c → Cohesión

ϕ → Ángulo de fricción

3.3 Sondeo de penetración estándar SPT




Para determinar el perfil estratigráfico del terreno se llevó a cabo un sondeo de penetración estándar a 14.4 m de profundidad, donde se detectaron fundamentalmente tres tipos de material (Figura 1), el superficial hasta una profundidad media de 3.60 m corresponde a una arcilla CH café oscuro con alta expansividad [6], de consistencia firme a dura, contenido de arena 12% y de finos 88%, contenido natural agua de 33.5% y límites líquido y plástico de 66 y 23% respectivamente; en esta capa se obtuvieron de 8 a 18 golpes según la prueba SPT, con promedio 13.8 golpes en este estrato (Figura 1).

En la prueba de compresión no confinada realizada en una muestra inalterada obtenida a 2 m de profundidad se obtuvo un valor de cohesión de 47 Kpa (Tabla 1).

Subyaciendo al material anterior y hasta una profundidad de 10.2 m aparece un tepetate (ceniza volcánica) color café claro constituido por una arcilla CL de consistencia dura, con un contenido de agua del 20.6% y límites líquido de 47% y plástico de 27%; el número de golpes en la prueba SPT varió entre 25 y 43, con un promedio de 38 golpes en este estrato (Figura 1).

Las pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas “UU” arrojaron valores de peso volumétrico de 15 kN/m³, cohesión de 100 kPa y ángulo de fricción interna de 15 grados.

Las dos capas anteriores de origen volcánico descansan sobre una roca de tipo dacita color rojizo, que en sus primeros dos metros está totalmente alterada dando origen a una arcilla plástica CH de consistencia firme a dura, en la cual se obtuvieron valores del número de golpes variable entre 16 y 50 con un promedio de 34 golpes (Figura 1) ; a mayor profundidad y hasta la máxima del sondeo de 14.4 m se presentan partículas roca del tamaño de la grava y arena empacados en la misma matriz arcillosa. Se infiere que a mayor profundidad esta roca se presente sana.

Profundidad	Simbología	Descripción	SPT	
			No. De golpes	Promedio
0.0		Arcilla café oscuro con algunos cantos de dacita, en la parte inferior del estrato aparecen gran cantidad de gramos de limo café claro y poca arena fina volcánica.	11 14 8 18 18	13.8
3.6		Limo-arcilloso color crema de consistencia firme a dura, con poca arena fina y muy fina volcánica de color gris y negro. (Tepetate)	38 40 37 43 35 42 40 25 40 40	38.0
10.2		Arcilla plástica color rojizo, consistencia firme a dura; en la parte inferior del estrato aparecen empacadas en la matriz arcillosa, partículas de roca dacita color rojizo, del	16 28 50 30 38 42	34.0


	tamaño de grava arena. Se observan algunas partículas aisladas de calcaita.	35	
---	---	----	--

Figura 1. Perfil estratigráfico del terreno en la laminadora de mármol (Valsequillo, Puebla).

4. Revisión geotécnica de la cimentación

Del perfil estratigráfico obtenido de sondeo de penetración estándar y de los resultados de los ensayos de laboratorio (clasificación de suelos y parámetros de resistencia), se determinó la capacidad de carga del terreno objeto de estudio.

Debido a que el estrato de arcilla superficial es totalmente inapropiado para cimentar cualquier estructura, ya que experimenta fuertes cambios volumétricos al variar su contenido de agua (expansión cuando se humedece y contracción cuando se seca), se consideró que el apoyo debería ser en el estrato de tepetate ubicado entre 3.6 y 10.2 m de profundidad, el cual presenta una consistencia dura.

Aplicando la fórmula de Vesic para cimentaciones superficiales (Ecuación 1) [7], se obtuvo una capacidad de carga admisible del terreno de apoyo “ q_{adm} ” de 481 kPa utilizando un factor de seguridad de 3.

$$q_{adm} = \frac{CNc \delta c + \gamma_m Df Nq \delta q + 0.5 \gamma B N\gamma \delta \gamma}{3} \quad (1)$$

Donde:

C = cohesión = 100 kPa

γ_m = 17.1 kN/m³ (Peso específico)

Df = 2m (profundidad de desplante)

$Nc, Nq, N\gamma$ = Factores de capacidad de carga

$\delta c, \delta q, \delta \gamma$ = Factores de forma de Vesic

B = 5.5 m (ancho de la cimentación)

γ = 15 $\frac{kN}{m^3}$ (peso específico estrato de apoyo)

El módulo de reacción del terreno obtenido en función de la capacidad de carga admisible resultó “ K_s ” de 57,720 kPa (Ecuación 2) [8].

$$K_s = 120 q_{adm} \quad (2)$$

Los parámetros elásticos del suelo obtenido de correlaciones con el módulo de reacción resultaron de: Módulo de elasticidad “ E ” de 40,000 kPa y la relación de Poisson “ μ ” de 0.4 [8].

$$E = \frac{(1-\mu^2)}{1.13} \sqrt{A} * K_s \quad (3)$$

Donde A = área de la placa de 1.20 m de lado

Se hace notar que los valores obtenidos anteriormente de capacidad de carga admisible y módulo de reacción, resultaron en general mayores que los solicitados por el fabricante de la máquina de 100 kPa y de 50,000 kN/m³ para uno y otro parámetro respectivamente.

5. Diseño dinámico de la cimentación

Para el diseño dinámico de la cimentación se tomaron en cuenta los siguientes valores:

- Peso total de la máquina = 400 kN
- Peso de elementos giratorios = 240 kN*
- Velocidad de operación = 102 cpm = 1.7 cps
- Altura de la flecha = 1.20 m
- Altura del centro de masa = 1.31 m
- Dimensiones en planta = 11.74 m y ancho = 5.5 m
- Fuerzas y pares de desbalanceo
- $F_x = 13.4$ kN*
- $F_z = 37.4$ kN*
- $M_y = 49.6$ kN-m*

Nota * valores obtenidos a partir de las dimensiones de la máquina [9,10].

Respecto del bloque de cimentación se obtuvieron los siguientes datos:

- Dimensiones: largo = 11.74 m, ancho = 5.5 m y profundidad = 1.5 a 2.5 m.
- Volumen = 151 m³
- Peso = 3624 kN

5.2 Revisión del centro de gravedad

- Centro de gravedad de la máquina. Obtenido de los planos proporcionados por el fabricante se ubica en las siguientes coordenadas: $y = 7.05$ m (dirección longitudinal) $x = 1.31$ m (dirección transversal) $z = 1.31$ m (dirección vertical)
- Centro de gravedad de la cimentación. Obtenido de los planos proporcionados por el fabricante se ubica en las siguientes coordenadas: $y = 4.70$ m (dirección longitudinal) $x = 2.75$ m (dirección transversal) $z = 1.68$ m (dirección vertical)
- Centro de gravedad común máquina- cimentación $y = 4.93$ m

El centro de gravedad común de la máquina y su cimentación se ubica a una distancia de 4.93 m del borde exterior donde se localiza el volante giratorio, el centro de gravedad del área de contacto entre el bloque de cimentación y el suelo está a 5.87 m del mismo borde antes mencionado.

En este caso particular existe una excentricidad de 94 cm entre los centros de gravedad, pero en la bibliografía técnica consultada [11], recomiendan para evitar asentamientos diferenciales y vibración torsional que el centro de gravedad común de la máquina con su cimentación, coincida con el centro de gravedad del área de contacto.

Para resolver lo anterior se realizaron varios tanteos en las dimensiones del bloque de cimentación hasta lograr la coincidencia antes referida (Figura 2).

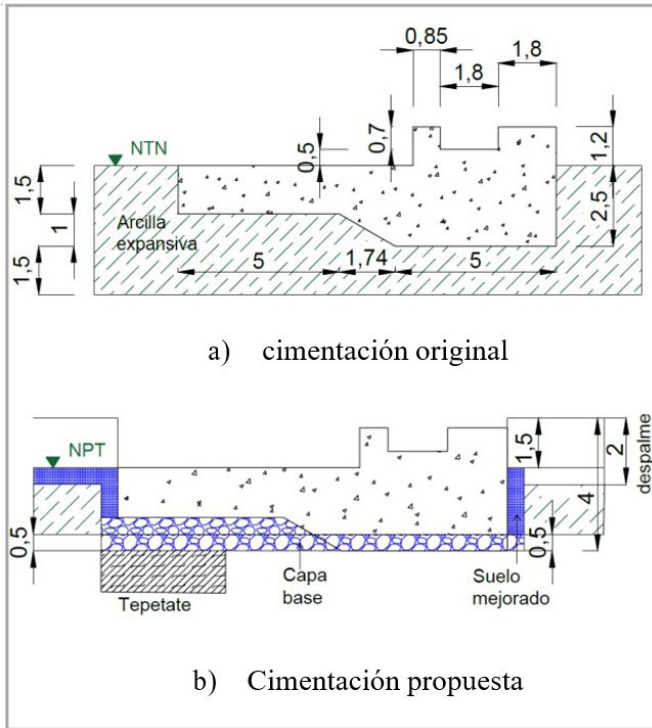


Figura 2. Cimentación a base de un bloque de concreto armado

5.3 Presión dinámica.

Se consideró un factor de impacto dinámico de 1.5 y se obtuvo una presión dinámica de 66 kPa, valor inferior a la capacidad de carga admisible de 481 kPa (Ecuación 4).

$$\sigma_d = \frac{W_m FI + W_{bc}}{A_c} \quad (4)$$

Donde:

σ_d = Presión dinámica

W_m = Peso total de la máquina

FI = Factor de impacto

W_{bc} = Peso del bloque de cimentación

A_c = Área de contacto de la cimentación

5.4 Frecuencia natural de operación

La frecuencia natural del sistema máquina-cimentación-suelo resultó 6.4 cps (Ecuación 5) [12, 13], valor que excede en 3.8 veces la frecuencia natural de operación de la máquina de 1.7 cps. En la literatura técnica recomiendan que mínimo exceda 1.5 veces.

$$f_n = \frac{f_{nr}}{\sqrt{\sigma_e}} \quad (5)$$

Donde:

f_n = frecuencia natural de operación

f_{nr} = frecuencia natural reducida = 16

σ_e = esfuerzo estático o presión estática
= 62.4 kPa

5.5 Amplitudes desplazamiento

El cálculo de las amplitudes de desplazamiento producidas durante la operación de la máquina, fueron: para la componente vertical "Av" de 0.114 mm y para la horizontal "Ah" de 0.07 mm (Ecuaciones 6 y 7), valores que clasifican a la vibración de apreciable a escasamente apreciable, sin tener efectos negativos ni en la máquina ni en las construcciones o estructuras cercanas.

$$A_v = \sqrt{(A_z)^2 + (A_{v\phi})^2} \quad (6)$$

$$A_h = \sqrt{(A_x)^2 + (A_{h\phi})^2} \quad (7)$$

Donde:

A_h = componente de desplazamiento horizontal

A_x = amplitud de desplazamiento en función de la fuerza horizontal f_x

A_v = componente de desplazamiento vertical

A_z = amplitud de desplazamiento en función de la fuerza vertical f_z

$A_{v\phi}$ = amplitud de desplazamiento en función del momento vertical

$A_{h\phi}$ = amplitud de desplazamiento en función de la profundidad de desplante D_f

6. Cálculo de asentamientos

En el caso del diseño dinámico de cimentaciones para maquinaria con elementos vibratorios, las deformaciones en el terreno originadas por la operación de la maquinaria se evalúan en términos de amplitudes de desplazamiento vertical y horizontal, con valores de $A_v = 0.114$ mm y $A_h = 0.07$ mm respectivamente (consignados en el inciso 5.1.4), que clasifican a la vibración de apreciable a escasamente apreciable, sin tener efectos negativos ni en la máquina ni en las construcciones o estructuras cercanas.

Por su parte, los asentamientos inmediatos o elásticos que se originarán en la capa de apoyo constituida por una grava arena bien compacta con espesores entre 1.5 y 2.5 m, durante

la etapa constructiva del bloque de cimentación resultaron de 1.8 mm, valor muy inferior a los 80 mm considerados como máximos tolerables. Estos asentamientos se evaluaron con la siguiente fórmula:

$$\delta i = \sigma * B \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right) * I_w \quad (8)$$

Donde:

A_x = amplitud de desplazamiento en función de la fuerza horizontal f_x

A_v = componente de desplazamiento vertical

A_z = amplitud de desplazamiento en función de la fuerza vertical f_z

δi = asentamiento elástico

σ = Presión estática debido al peso de la maquinaria + peso del bloque de cimentación

B = ancho de la cimentación

E y μ = parámetros elásticos de la capa de grava arena compactada

I_w = factor de influencia que depende de la forma y rigidez del bloque de cimentación

7. Resultados del proyecto

Una vez concluidas las diferentes etapas consignadas detalladamente en los párrafos anteriores, se pudieron integrar las especificaciones constructivas para el emplazamiento de la maquinaria, cuyos detalles se indican a continuación:

- Realizar la excavación a 4 m de profundidad para retirar totalmente el estrato de arcilla expansiva (Figura 3).



Figura 3. Estrato de arcilla expansiva CH

- En el perímetro del área se excavarán 50 cm adicionales para colocar material granular con la finalidad de reducir las vibraciones durante la operación de la máquina.
- En el fondo de la excavación se deberá colocar una capa base de 50 cm de espesor en el lado más profundo y de 1 m en el de menor profundidad. La capa base será de grava-arena compactada al 95% del Proctor modificado, en capas de 10 cm de espesor, utilizando un rodillo liso vibratorio manual (Figura 4).



Figura 4. Compactación de la capa base (grava – arena)

- Colocación de una plantilla de concreto pobre de 5 cm de espesor sobre la capa base para recibir el concreto del bloque de cimentación [14].
- Una vez colocado el acero de refuerzo y colado el bloque de cimentación, cuando el concreto alcance el 85% de su resistencia, se colocará en su perímetro en un ancho de 50 cm una capa de arena compactada al 95%, en espesores de 10 cm (Figura 5) [15].



Figura 5. Acero de refuerzo bloque de cimentación

- La compactación de la capa base de grava-arena y del material arenoso perimetral, se realizará con compactadores vibratorios manuales, debiéndose llevar una supervisión y control de calidad mediante calas volumétricas para garantizar el grado de compactación indicado.
- Durante el colado del bloque de cimentación se deberá llevar una supervisión y un control de calidad del concreto mediante pruebas de revenimiento y obtención de especímenes cilíndricos para ensayos de resistencia a compresión a edades de 7, 14 y 28 días (Figura 6).



Figura 6. Colado del bloque de cimentación

- Se sugiere colocar en toda el área de trabajo y circulación vehicular una capa de suelo mejorado de 50 cm de espesor, para evitar el apoyo directo en la arcilla expansiva que es de mala calidad.
- Cualquier estructura adicional que se pretenda construir en el predio, se recomienda desplantarla en el estrato de tepetate ubicado a 3.60 m de profundidad.
- Diseñar un sistema de drenaje que permita desalojar eficientemente las aguas de escurrimiento superficial, incluyendo las utilizadas durante la operación de la

máquina y las aguas pluviales, evitando la infiltración al terreno donde existan estructuras importantes (Figura 7).



Figura 7. Máquina laminadora de mármol

8. Conclusiones

La cimentación para máquinas que cuentan con elemento giratorios, los cuales producen esfuerzos estáticos y dinámicos en su terreno de apoyo, consiste generalmente en un bloque macizo de concreto armado. Debido al peso de la máquina vibratoria y su bloque de cimentación se deberá garantizar un terreno de buena calidad, con adecuada capacidad de carga y poca deformabilidad hasta una profundidad donde se disipen los esfuerzos que transmiten las cargas.

Cuando el terreno superficial es de mala calidad, es decir, de baja resistencia al esfuerzo cortante y/o muy compresible, existen varias alternativas de solución incluyendo las siguientes:

- a) Evitar o sustituir los suelos superficiales de mala calidad
- b) Apoyar la estructura en una cimentación profunda sobre estratos de buena calidad
- c) Cambiar el lugar de emplazamiento de la maquinaria

En nuestro caso particular se retiró todo el estrato superficial de arcilla expansiva y la cimentación se apoyó en una capa base de suelo mejorado (grava-arena), la cual se desplantó en un depósito de ceniza volcánica clasificada como arcilla CL de alta resistencia al esfuerzo cortante y no compresible. Lo anterior permitió cumplir con las especificaciones del fabricante de la laminadora relativas a la capacidad de carga y su módulo de reacción.

Además, fue necesario modificar las dimensiones del bloque de cimentación para hacer coincidir el centro de gravedad común de la máquina y su cimentación con el centro de gravedad del área de contacto; lo anterior para evitar asentamientos diferenciales y vibración torsional.

También se cumplió con las especificaciones de la frecuencia natural del sistema máquina- cimentación-suelo, y de las amplitudes de desplazamiento permitidas.

9. Referencias

- [1] Freitas de Almeida, I., Castelo Branco de Noronha Campos, M., y Almeida de Oliveira, R. A comparative study in flexure and shear design of spread footings. *Rev. Ingenio*, vol. 16, n°1, pp.23–29, 2019, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2364>
- [2] Pérez-Giraldo, M., y Yepes-Tumay, J. D. Diseño geométrico de una zapata doble para cimentación aplicada en torres de transmisión eléctrica. *Rev. Ingenio*, vol.18, n°1, pp.17–24, 2021, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2385>
- [3] L. J. Quintero, and R. J.Gallardo. Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización. *Geotécnica. Acapulco Guerrero, México*. 2010. Vol. 1 pag. 295-301, 2015.
- [4] C. Castrillón and J. D. Quintero. Guía de instrumentación en taludes intervenidos por un proyecto vial (Bachelor's thesis, Universidad de Medellín). 2012.
- [5] N. E. Matos. Diseño de cimentación superficial de tanque séptico para almacenamiento de agua residual utilizando métodos: Hansen-Vesic- Comunidad Maravillas-Cusco, 2021.
- [6] O. Linares, O. Flores, A. Hernández and A. Aguilar. “Caracterización de arcillas expansivas de San Francisco Totimehuacán”. XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería
- [7] B. Das. Principles of Foundation Engineering. 7th Edition. Cengage Learning. USA, 2011.
- [8] J. Bowles “Foundation Analysis and Design”. 5th Edition. McGraw Hill. USA, 1997.
- [9] J. Marujo da Silva, Structures & Foundations Supporting for Vibration Machines, 2019.
- [10] R. Kameswara. Foundation Design. Theory and Practice. John Wiley & Sons. Asia, 2011.
- [11] J. Nieto and D. Reséndiz. Criterios de Diseño para Cimentaciones de Maquinaria. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 1967.
- [12] B. Das. and G. Ramana, Principles of Soil Dynamics. 2nd Edition. Cengage Learning. USA, 2011.
- [13] S. Giorgetti, A. Giogetti, R. Tavafoghi and G. Arcidiacono. “Machinery Foundations Dynamical Analysis: A Case Study on Reciprocating Compressor”, vol. 9 (10), 2021. *Foundation, Machines*. Doi: <https://doi.org/10.3390/machines9100228>
- [14] E. Sahar. Practical Design and Construction of Machine Foundations Subjected to Impact Loads. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 25, 2020. 04020008. 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000491.
- [15] ACI. Foundations for Dynamic Equipment, 2004. [Online] Available: https://www.academia.edu/25648225/ACI_351_3R_04_Foundations_for_Dynamic_Equipment