



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL**  
**FACULTAD REGIONAL RAFAELA**  
**Departamento Ingeniería Civil**

ASIGNATURA  
**PROYECTO FINAL**

**DISEÑO DE UNA CIMENTACIÓN  
SOMETIDA A CARGAS DINÁMICAS  
CAUSADAS POR PRENSA MECÁNICA  
DE ALTO IMPACTO**

AUTORES:  
**LUCIANA ITATÍ FERRERO**  
**MILAGROS ELENEI TURINO**

DIRECTOR:  
**ING. CIVIL RUBÉN CARLOS ROSETTI**

RAFAELA (SF), diciembre de 2021



**DISEÑO DE UNA CIMENTACIÓN SOMETIDA A CARGAS  
DINÁMICAS CAUSADAS POR PRENSA MECÁNICA DE ALTO  
IMPACTO**

PROYECTO FINAL

ELABORADO POR

**LUCIANA ITATÍ FERRERO  
MILAGROS ELENEI TURINO**

BAJO LA DIRECCIÓN DE

**ING. CIVIL RUBÉN CARLOS ROSETTI**



## AGRADECIMIENTOS

Al iniciar un viaje, normalmente se conoce dónde comienza y no dónde se culmina. A menudo, el destino que uno se plantea suele encontrarse distante, lo que requiere atravesar caminos difíciles, casi imposibles de concretar, si se analiza a corto plazo. Es por esta razón, que toda persona que inicia un viaje y desea tener éxito, requiere la guía, la experiencia y el acompañamiento de aquellos que ya lo hicieron. Por tal motivo, queremos agradecer:

A la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rafaela, haciendo extensas estas palabras a todos los Ingenieros que integran el Departamento de Ingeniería Civil, quienes, desde el primer momento y a lo largo de estos años, nos han brindado su excelencia académica, que, en combinación con la calidez, no sólo nos han transmitido sus conocimientos, sino también sus experiencias y criterios, dándonos la oportunidad de ser exitosos futuros profesionales y colegas.

En especial, a nuestro Director de Proyecto, Ing. Rubén Rosetti, por su dedicación y compromiso para con nosotras.

Por último, a dos grandes Ingenieros: al Ing. Héctor Mónaco, por su distintiva calidez humana como mentor a lo largo de nuestro trayecto académico, motivándonos a seguir en todo momento; y al Ing. Hugo Begliardo, por su calidez profesional, quien nos insta a mejorar y perseguir la excelencia continuamente.

A nuestras familias, quienes nos inculcaron que, no sólo se requiere de capacidad y conocimiento, sino de constancia y perseverancia para alcanzar el destino deseado.

A nuestros amigos y seres queridos, quienes nos han brindado todo su apoyo incondicional para poder concretar esta meta.

A todos aquellos quienes comparten la idea de que las cosas pueden hacerse mejor sin caer en el simplismo de que, porque una meta es difícil, no puede realizarse.

A todos ellos, simplemente GRACIAS.

Luciana I. Ferrero y Milagros E. Turino.



## *PREFACIO*

El Proyecto se estructuró en siete capítulos:

El Capítulo 1 introduce los conceptos de una cimentación, clasifica las máquinas dinámicas que requieren bases especiales y expone cada tipología que existe. Además, realiza un listado de recomendaciones a tener en cuenta para poder lograr un correcto diseño estructural. Por último, menciona la ubicación y antecedentes.

El Capítulo 2 aborda nociones generales en el estudio de la Dinámica, tales como rigidez y amortiguamiento. Culmina con teoría de vibraciones, en donde se presentan los posibles modos de vibración, los cuales se utilizan al momento de modelar la base en cuestión, en función al tipo de máquina elegida.

El Capítulo 3 se enfoca en explicar la máquina elegida, sus componentes, funcionamiento, y se realiza la estimación de la carga dinámica que produce.

En el Capítulo 4 se describen las propiedades del suelo para el diseño de cimentaciones. El mismo se divide en dos partes: estática y dinámica de suelos. En la primera parte se mencionan conceptos básicos tales como: tipos de suelo, origen y clasificación, esfuerzos en una masa de suelo. La segunda, explica la teoría de ondas de corte y parámetros dinámicos de suelo, como es el módulo dinámico de corte. Al finalizar, conceptualiza el amortiguamiento en suelos y se realiza una comparativa entre rigidez y amortiguamiento en distintos tipos de suelos.

En el Capítulo 5 se describe el fundamento teórico del diseño de una cimentación para equipo dinámico: predimensionado, verificación a cargas estáticas, diseño dinámico y cálculo de armaduras de refuerzo.

El Capítulo 6 constituye el eje central del Proyecto Final y en él se desarrollan los cálculos propiamente dichos que constituyen el diseño de una cimentación para equipo dinámico.

El Capítulo 7 aborda el cálculo de anclajes de la maquinaria y se desarrolla el método de diseño de hormigón por capacidad (CCD) del reglamento ACI 318.

El último capítulo es el Capítulo 8, el cual aglomera las conclusiones que derivan del Proyecto, junto con sugerencias constructivas.

Finalmente, el Anexo I ilustra las dimensiones de la base calculada a través de planos de detalle.

Por último, cabe destacar que se decide no incorporar un estudio impacto ambiental por tratarse de un diseño y cálculo estructural de una cimentación aislada.





## *RESUMEN*

El Presente Proyecto Final consiste en el diseño de una cimentación sometida a cargas dinámicas causadas por una prensa mecánica de 250 toneladas para una empresa metalúrgica, localizada en la ciudad de San Francisco, Córdoba.

Para tal fin, se empleó el método de Análisis Dinámico, el cual modela una cimentación rígida en un semi-espacio a través de un sistema de parámetros agrupados. Además, se efectuaron consideraciones adicionales, como ser el modo de funcionamiento de la máquina y su anclaje a la base, verificaciones de capacidad de carga del suelo y dimensionamiento de acero de refuerzo.

Como resultado, se obtuvo una base con un valor de frecuencia satisfactorio. La misma posee dimensiones finales de 3,50 [m] de ancho, 5,30 [m] de largo y 1,20 [m] de alto, con barras de acero de  $\varnothing 20$  [mm] con una separación de 14 [cm]. La cota de fundación es de -1,00 [m], alejada 1,00 [m] del nivel freático.

Se concluye que la frecuencia natural del sistema cumple con el requisito de mantenerse lo suficientemente alejada de la frecuencia de vibración del equipo, evitando así, el fenómeno de resonancia.

**PALABRAS CLAVES:** Cimentación de máquina – análisis dinámico – prensa de alto impacto – prensa mecánica.



# ÍNDICE

<i>PREFACIO</i>	v
<i>RESUMEN</i>	vii
<i>ÍNDICE</i>	ix
<i>LISTA DE TABLAS</i>	xv
<i>LISTA DE FIGURAS</i>	xvii
<i>LISTA DE SÍMBOLOS</i>	xxi

## *CAPÍTULO 1*

<b>GENERALIDADES</b>	<b>1</b>
1.1. CONCEPTO DE CIMENTACIÓN	1
1.2. CLASIFICACIÓN DE CIMENTACIONES DE MAQUINARIA	1
1.3. CONSIDERACIONES GENERALES	3
1.4. CLASIFICACIÓN DE MÁQUINAS	4
1.5. UBICACIÓN Y ANTECEDENTES	6
1.6. OBSERVACIONES	7
1.7. OBJETIVOS	8

## *CAPÍTULO 2*

<b>CARGAS DINÁMICAS</b>	<b>9</b>
2.1. NOCIONES GENERALES DE LA DINÁMICA	9
2.1.1. Introducción	9
2.1.2. Conceptos básicos	11
2.2. TEORÍA DE VIBRACIONES	13
2.2.1. Sistema sin amortiguación: vibración libre	14
2.2.2. Sistema con amortiguación: vibración libre	16
2.2.3. Sistema con amortiguación: vibración forzada	20

## *CAPÍTULO 3*

<b>DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA Y PROCESO PRODUCTIVO</b>	<b>23</b>
3.1. GENERALIDADES	23
3.2. NOCIONES BÁSICAS SOBRE LA FORJA	23
3.3. PROCEDIMIENTOS INDUSTRIALES DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN CALIENTE	24
3.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ESTAMPADO	24
3.5. DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA A CIMENTAR	25
3.5.1. Componentes de una prensa mecánica	25
3.5.2. Configuración geométrica de la prensa	27
3.5.3. Análisis de cargas estáticas	27
3.5.4. Estimación de cargas dinámicas	28

## *CAPÍTULO 4*

<b>PROPIEDADES DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES DE EQUIPOS VIBRATORIOS</b>	<b>35</b>
4.1. INTRODUCCIÓN	35
4.2. MECÁNICA ESTÁTICA DE SUELOS	36
4.2.1. Origen de suelo	36
4.2.2. Tipos de suelos	37
4.2.3. Partes constituyentes del suelo	38
4.2.4. Parámetros de identificación de suelos	39
4.2.5. Clasificación de suelos	41
4.2.6. Esfuerzos en el suelo	42
4.2.7. Resistencia al esfuerzo cortante	43
4.3. DINÁMICA DE SUELOS	44
4.3.1. Teorías de ondas de corte	45
4.3.2. Parámetros dinámicos del suelo	48
4.3.2.1. Módulo de Poisson	48
4.3.2.2. Módulo dinámico de corte $G'$	49
4.3.3. Amortiguamiento de Suelos	52
4.3.4. Comportamiento típico referido a rigidez y amortiguamiento en suelos	55

## CAPÍTULO 5

<b>TEORÍA DE DISEÑO DE CIMENTACIÓN DE EQUIPO</b>	<b>57</b>
5.1. GENERALIDADES	57
5.2. PRE-DIMENSIONADO: DISEÑO GEOMÉTRICO	58
5.2.1. Método de Relación de Masas	58
5.2.2. Recomendaciones Geométricas ACI 351	59
5.3. DISEÑO A CARGAS ESTÁTICAS	60
5.3.1. Verificación de la capacidad de carga	60
5.4. DISEÑO A CARGAS DINÁMICAS	62
5.4.1. Criterios de diseño	62
5.4.1.1. Relación de frecuencias	63
5.4.1.2. Desempeño ante vibraciones	63
5.4.2. Modelo matemático	66
5.4.3. Modelo de Richart	68
5.4.4. Impedancia Dinámica	71
5.4.5. Modelo de Veletsos y Verbic	73
5.4.5.1. CASO 1 – Solución A	73
5.4.5.2. CASO 1 – Solución B	75
5.4.5.3. CASO 2 – Solución A y B	76
5.4.5.4. Impedancia total	77
5.4.6. Amplitudes del sistema	77
5.4.7. Fuerza transmitida al cimiento	78
5.5. ACERO DE REFUERZO	79
5.5.1. Introducción a códigos y criterios utilizados	79
5.5.2. Acero de refuerzo	80
5.5.2.1. Acero de refuerzo vertical	80
5.5.2.2. Acero de refuerzo horizontal	80
5.5.2.3. Acero por corte en pedestales	81
5.5.2.4. Requerimientos de acero mínimo	81
5.5.2. Control de agrietamiento del hormigón	82
5.6. RESUMEN	85

## CAPÍTULO 6

<b>DISEÑO DE CIMENTACIÓN DE EQUIPO DINÁMICO</b>	<b>89</b>
6.1. GENERALIDADES	89
6.2. ENTRADA DE DATOS	89
6.2.1. Características del material	89
6.2.2. Características del equipo	90
6.2.3. Características del suelo	90
6.3. PREDIMENSIONADO	91
6.3.1. Dimensiones propuestas	91
6.3.2. Verificación de criterios de diseño	92
6.3.3. Verificación rigidez del bloque	92
6.3.4. Cálculo de peso de cimentación	92
6.3.5. Verificación de relación de peso	93
6.4. ANÁLISIS ESTÁTICO	93
6.5. ANÁLISIS DINÁMICO	93
6.5.1. Cálculos preliminares	94
6.5.2. Solución A	94
6.5.2.1. Caso 1	94
6.5.2.2. Caso 2	95
6.5.3. Solución B	95
6.5.3.1. Caso 1	95
6.5.3.2. Caso 2	96
6.5.4. Impedancia total	96
6.6. CONTROL DE AMPLITUDES	96
6.6.1 Fuerza dinámica	96
6.6.2 Cálculo de amplitud de desplazamiento	97
6.6.3 Verificación al hundimiento mientras la máquina se encuentra en funcionamiento	98
6.6.4 Verificación de relación de frecuencias	99
6.6.5 Verificación de desempeño ante vibraciones	99
6.7. REFUERZO CIMENTACIÓN	100
6.7.1 Según criterio ACI 318-14	100
6.7.2 Control de agrietamiento	100

## CAPÍTULO 7

<b>PERNOS DE ANCLAJE</b>	<b>103</b>
7.1. GENERALIDADES	103
7.1.1. Grouting	103
7.1.2. Materiales de anclajes y tipologías – según ACI 351 2R	104
7.2. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A LA EXTRACCIÓN CON PERNOS DE ANCLAJE	106
7.2.1. Diseño del hormigón por capacidad	106
7.2.2. Fuerzas de diseño en pernos de anclaje	110
7.3. CÁLCULO DE ANCLAJES PARA EQUIPO DINÁMICO	111
7.3.1. Entrada de datos	111
7.3.2. Cálculo de fuerza máxima de tracción sobre pernos de anclaje	111
7.3.3. Verificación de la resistencia a la extracción del hormigón	112
7.3.4. Cálculo de profundidad efectiva $h_{ef}$	112
7.3.5. Cálculo de resistencia a la ruptura para un grupo de anclaje	113
7.4. RECOMENDACIONES	113

## CAPÍTULO 8

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>115</b>
8.1. CONCLUSIONES	115
8.2. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS	117
8.2.1. Condiciones geotécnicas	117
8.2.2. Localización	117
8.2.3. Técnicas de vaciado y juntas	118
8.2.4. Excavaciones	118
8.2.5. Material circundante	119

<i>REFERENCIAS</i>	121
--------------------	-----

<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	123
---------------------	-----

<i>ANEXO I</i>	125
----------------	-----





## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Nivel de daño en elementos estructurales en función de su amortiguamiento.	19
<b>Tabla 3.1.</b> Características geométricas de la prensa elegida.	27
<b>Tabla 4.1.</b> Escala de tamaños de partículas de suelo.	37
<b>Tabla 4.2.</b> Características del suelo en función de IP e IL.	41
<b>Tabla 4.3.</b> Variación de $\eta_H$ .	47
<b>Tabla 4.4.</b> Variación de $\eta_B$ .	47
<b>Tabla 4.5.</b> Variación de $\eta_S$ .	47
<b>Tabla 4.6.</b> Variación de $\eta_R$ .	48
<b>Tabla 4.7.</b> Rangos de valor del módulo de Poisson, según Bowless.	49
<b>Tabla 4.8.</b> Rangos de valor del módulo de Poisson, según ACI.	49
<b>Tabla 4.9.</b> Rangos de valor del coeficiente de amortiguamiento.	54
<b>Tabla 5.1.</b> Relación de masas para equipos recíprocos y rotativos según el tipo de fundación.	59
<b>Tabla 5.2.</b> Factores de servicio.	66
<b>Tabla 5.3.</b> Esfuerzos producidos en el suelo, según el modo de vibración de la base.	68
<b>Tabla 5.4.</b> Valores de coeficientes para cálculo de Impedancia.	75
<b>Tabla 5.5.</b> Parámetros de rigidez y amortiguamiento. (D=0)	76
<b>Tabla 5.6.</b> Guía para anchos de fisura razonables para hormigón armado bajo cargas de servicio.	84
<b>Tabla 7.1.</b> Resistencia a extracción del hormigón.	112
<b>Tabla 8.1.</b> Tensiones de trabajo del suelo a profundidades evaluadas.	115

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Esquema básico cimentación de máquinas.	1
<b>Figura 1.2.</b> Cimentación tipo bloque.	2
<b>Figura 1.3.</b> Cimentación tipo marco.	2
<b>Figura 1.4.</b> Esquema de máquina reciprocante.	5
<b>Figura 1.5.</b> Esquema de máquina centrífuga.	5
<b>Figura 1.6.</b> Esquema de máquina de impacto.	5
<b>Figura 1.7.</b> Ubicación de HSF.	6
<b>Figura 2.1.</b> Esquema masa resorte, descripción de posición de equilibrio.	9
<b>Figura 2.2.</b> Tipos de excitaciones dinámicas.	10
<b>Figura 2.3.</b> Modelización del sistema resorte y trabajo interno del mismo.	11
<b>Figura 2.4.</b> Modelización del sistema amortiguado y trabajo interno del mismo.	12
<b>Figura 2.5.</b> Fuerzas de fricción entre dos superficies secas.	13
<b>Figura 2.6.</b> Curva fuerza-deformación para material inelástico y disipación de energía en un sistema inelástico.	13
<b>Figura 2.7.</b> Oscilador simple y diagrama de cuerpo libre.	14
<b>Figura 2.8.</b> Desplazamiento de la masa en el tiempo ante condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad.	15
<b>Figura 2.9.</b> Diagrama de cuerpo libre: sistema amortiguado.	16
<b>Figura 2.10.</b> Respuesta de un sistema críticamente amortiguado y sobreamortiguado.	17
<b>Figura 2.11.</b> Vibración libre para un sistema sub-amortiguado.	18
<b>Figura 2.12.</b> Vibración libre para sistemas sin amortiguación, sub-amortiguado, sobreamortiguado y críticamente amortiguado.	18
<b>Figura 2.13.</b> Niveles de daño en vigas, asociadas a amortiguamiento	20
<b>Figura 2.14.</b> Oscilador con amortiguación excitado armónicamente y diagrama de cuerpo libre.	21
<b>Figura 2.15.</b> Curvas de amplificación dinámica en función a la relación de frecuencias.	22
<b>Figura 3.1.</b> Componentes de una prensa mecánica.	26
<b>Figura 3.2.</b> Sistema sujeto a una carga impulsiva.	28
<b>Figura 3.3.</b> Diversos pulsos de corta duración: pulso sinusoidal, pulso rectangular, pulso triangular.	30
<b>Figura 3.4.</b> Modo de operación de una prensa a fricción: velocidades angulares.	31
<b>Figura 3.5.</b> Modo de operación de una prensa a fricción: punto de contacto "A".	31
<b>Figura 3.6.</b> Estados de operación de la prensa.	33
<b>Figura 4.1.</b> Partes constituyentes del suelo.	38
<b>Figura 4.2.</b> Relaciones y partes constituyentes del suelo.	39

<b>Figura 4.3.</b> Variación del volumen en función al contenido de humedad.	40
<b>Figura 4.4.</b> Análisis de esfuerzos en corte transversal de masa de suelo.	42
<b>Figura 4.5.</b> Fuerzas y resistencia interna en masa de suelo.	43
<b>Figura 4.6.</b> Inclinación del plano de falla del suelo con respecto al plano principal mayor. Envolvente de falla definida por ecuación (4.10).	44
<b>Figura 4.7.</b> Ondas primarias u ondas P. Ondas secundarias u ondas S.	45
<b>Figura 4.8.</b> Ondas Love y ondas Rayleigh.	46
<b>Figura 4.9.</b> Bucle de histéresis para un ciclo de carga que muestra $G_{máx}$ , $G$ y $D$ .	50
<b>Figura 4.10.</b> Curva de histéresis deformación de corte $\gamma$ – tensión de corte $\tau$	51
<b>Figura 4.11.</b> Propagación de ondas de radiación.	53
<b>Figura 4.12.</b> Lazo de histéresis.	54
<b>Figura 4.13.</b> Curva tipo backbone y curva tipo de reducción de módulo $G/G_{máx}$ .	55
<b>Figura 4.14.</b> Curvas de reducción de módulo para suelos de grano fino con diferente plasticidad.	56
<b>Figura 5.1.</b> Distribución de esfuerzos en una masa de suelo.	61
<b>Figura 5.2.</b> Lista de verificación de los criterios de diseño.	62
<b>Figura 5.3.</b> Gráfico para control de amplitudes: criterio de Blake, modificado Arya, O'Neill y Pincus.	64
<b>Figura 5.4.</b> Gráfica de Severidad de Vibración de Maquinaria de Baxter y Bernhard.	64
<b>Figura 5.5.</b> Gráfica de Reiher-Meister, modificada por Richart.	65
<b>Figura 5.6.</b> Modos de vibración de un bloque de cimentación.	67
<b>Figura 5.7.</b> Fundación representada por sistema amortiguado de parámetros agrupados, sometida a esfuerzos dinámicos: vertical, horizontal y torsional.	67
<b>Figura 5.8.</b> Cimentación circular equivalente.	69
<b>Figura 5.9.</b> Valores sugeridos del coeficiente de forma $\beta$ .	70
<b>Figura 5.10.</b> Gráfica de desplazamiento / velocidad vs tiempo – Diferencia de fases.	72
<b>Figura 5.11.</b> Esquema de cimentación empotrada en el suelo.	75
<b>Figura 5.12.</b> Esquema resumen: Etapas de diseño de cimentación de máquina.	85
<b>Figura 5.13.</b> Esquema etapas: Entrada de datos, Análisis Estático.	86
<b>Figura 5.14.</b> Esquema etapas: Pre-dimensionado y Refuerzo de cimentación.	86
<b>Figura 5.15.</b> Esquema etapas: Análisis Dinámico.	87
<b>Figura 7.1.</b> Tipos de sistemas de anclajes más utilizados en la industria.	103
<b>Figura 7.2.</b> Tipos de pernos de anclaje.	104
<b>Figura 7.3.</b> Tipos de anclajes con cuña metálica y con grout epóxico.	105
<b>Figura 7.4.</b> Modos de falla en tensión y tracción de acero y hormigón para anclajes.	107
<b>Figura 7.5.</b> Cono de ruptura de hormigón por extracción.	108
<b>Figura 7.6.</b> Fuerzas de estallido laterales para barras de anclaje en tracción cerca del borde.	109

<b>Figura 7.7.</b> Cono de ruptura en tensión cerca de un borde.	110
<b>Figura 7.8.</b> Uso de acero de refuerzo para el desarrollo de barras de anclaje.	110



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>%H</b>	Humedad del suelo
<b>%S</b>	Grado de saturación de una masa de suelo
<b>a</b>	Aceleración de prensa a fricción [m/s <sup>2</sup> ]
<b>A</b>	Amplitud máxima; Área efectiva de hormigón a tracción [in <sup>2</sup> ]
<b>a<sub>0</sub></b>	Frecuencia adimensional
<b>A<sub>adm</sub></b>	Amplitud admisible
<b>Ag</b>	Sección transversal de hormigón
<b>A<sub>N</sub></b>	Área del cono de ruptura del hormigón para el grupo de anclajes
<b>A<sub>No</sub></b>	Área del cono de ruptura del hormigón para un solo anclaje
<b>As</b>	Sección requerida de acero
<b>As'</b>	Sección de acero por pie de longitud
<b>As<sub>min</sub></b>	Sección mínima de acero
<b>B</b>	Dimensión más corta de la cimentación
<b>B<sub>b</sub></b>	Ancho de la bancada de la prensa
<b>B<sub>máq</sub></b>	Ancho de la prensa
<b>c</b>	Constante de amortiguador; Cohesión del suelo
<b>c<sub>1</sub></b>	Recubrimiento lateral mínimo de perno de anclaje
<b>c<sub>cr</sub></b>	Amortiguación crítica
<b>Cn</b>	Coefficiente de corrección de energía
<b>D</b>	Amplificación dinámica; Diámetro del tornillo de la prensa
<b>d<sub>bc</sub></b>	Diámetro de perno de anclaje
<b>d<sub>c</sub></b>	Espesor de recubrimiento de barras [in]
<b>D<sub>i</sub></b>	Constante de amortiguamiento, en la dirección "i"
<b>e</b>	Índice de vacíos del suelo
<b>E<sub>c</sub></b>	Módulo de Young
<b>F</b>	Resultante de fuerzas que actúan sobre un cuerpo; Fuerza impulsiva; Fuerza dinámica de la prensa; Fuerza de tracción sobre anclaje
<b>F(t)</b>	Fuerza armónica
<b>F<sub>0</sub></b>	Amplitud de fuerza armónica
<b>Fa</b>	Fuerza de amortiguamiento
<b>f'<sub>c</sub></b>	Resistencia a la compresión del hormigón

<b>Fr</b>	Fuerza restauradora
<b>FS</b>	Factor de seguridad
<b>fs</b>	Esfuerzo de acero de refuerzo
<b>F<sub>tc</sub></b>	Fuerza transmitida al cimiento
<b>f<sub>y</sub></b>	Tensión de fluencia del acero
<b>G</b>	Módulo de corte del suelo [kg/cm <sup>2</sup> ]
<b>g</b>	Aceleración de la gravedad [m/s <sup>2</sup> ]
<b>G'</b>	Módulo dinámico de corte
<b>G<sub>máx</sub></b>	Módulo dinámico máximo de corte
<b>G<sub>red</sub>'</b>	Módulo dinámico de corte reducido
<b>Gs</b>	Gravedad específica
<b>G<sub>sec</sub></b>	Módulo dinámico secante de corte
<b>G<sub>tan</sub></b>	Módulo dinámico tangente de corte
<b>h</b>	Espesor bloque de cimentación
<b>H<sub>b</sub></b>	Espesor de la bancada de la prensa
<b>h<sub>ef</sub></b>	Profundidad efectiva de embebido de anclaje [in]
<b>h<sub>máq</sub></b>	Alto de la prensa
<b>I</b>	Impulso; Momento de inercia
<b>IL</b>	Índice de Liquidez
<b>IP</b>	Índice de plasticidad
<b>k</b>	Constante de rigidez
<b>k<sub>c</sub></b>	Coeficiente de resistencia básica a la extracción del hormigón
<b>k<sub>i</sub></b>	Constante de rigidez evaluada, en la dirección "i"
<b>L</b>	Dimensión más larga de la cimentación
<b>L<sub>b</sub></b>	Largo de la bancada de la prensa
<b>LC</b>	Límite de contracción
<b>L<sub>emb</sub></b>	Longitud de embebido
<b>LL</b>	Límite líquido
<b>L<sub>máq</sub></b>	Largo de la prensa
<b>LP</b>	Límite plástico
<b>L<sub>t</sub></b>	Largo del tornillo de la prensa
<b>M</b>	Amplificación dinámica; Torque sobre perno de anclaje

<b>m</b>	Masa
<b>m<sub>0</sub></b>	Masa modelada en caída libre; Masa agrupada de tornillo y matriz de la prensa
<b>M<sub>i</sub></b>	Relación de masa, en la dirección “i”
<b>n</b>	Porosidad del suelo
<b>N</b>	Número de penetración medido en campo; Número de anclajes
<b>N<sub>60</sub></b>	Número de penetración estándar corregido para condiciones de campo
<b>N<sub>b</sub></b>	Resistencia nominal del hormigón a la extracción para un perno de anclaje individual a la tracción
<b>N<sub>cbg</sub></b>	Resistencia a la ruptura para un grupo de anclajes
<b>NSPT</b>	Número de golpes de ensayo SPT, obtenido en campo
<b>NTM</b>	Torque sobre perno de anclaje
<b>P</b>	Paso del tornillo de la prensa; Esfuerzo normal
<b>r</b>	Relación de frecuencias; Radio polea 1P
<b>R</b>	Radio volante horizontal; Reacción del suelo
<b>r<sub>0</sub></b>	Radio equivalente
<b>r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub></b>	Distancia entre el baricentro del eje horizontal al punto de contacto “A”
<b>S</b>	Carrera máxima de deslizamiento del tornillo de la prensa
<b>s</b>	Espaciamiento de barras
<b>S<sub>i</sub></b>	Impedancia, en la dirección “i”
<b>t</b>	Frecuencia natural del sistema [Hz]; Tiempo que tarda la masa pasa del PMS al PMI, en un ciclo.
<b>T</b>	Período natural del sistema [s]
<b>U</b>	Deformación armónica del suelo
<b>v</b>	Rapidez de una partícula
<b>V</b>	Volumen total del suelo
<b>v’<sub>0</sub></b>	Velocidad de masa m <sub>0</sub> en caída libre
<b>v<sub>0</sub></b>	Velocidad inicial en el momento t=0
<b>V<sub>c</sub></b>	Velocidad de onda de compresión del suelo
<b>V<sub>s</sub></b>	Volumen de sólidos de una masa de suelo
<b>V<sub>s</sub></b>	Velocidad de onda de corte del suelo
<b>V<sub>tAH</sub></b>	Velocidad tangencial del eje horizontal
<b>V<sub>tAV</sub></b>	Velocidad tangencial del eje vertical
<b>V<sub>tmotor</sub></b>	Velocidad tangencial del motor



$V_{t_{\text{polea}}}$	Velocidad tangencial de la polea
$V_v$	Volumen de vacíos de una masa de suelo
$V_w$	Volumen de agua de una masa de suelo
$W$	Peso total de masa de suelo
$w$	Ancho probable de grieta
$W_f,$ $W_{\text{bloque}}$	Peso de cimentación
$W_{\text{máq}}$ $W'$	Peso máquina
$W_s$	Peso seco de una masa de suelo
$W_w$	Peso del agua contenida en el suelo
$y$	Deformación en el eje “y”
$Y$	Amplitud de movimiento del sistema amortiguado sometido a fuerza armónica
$\dot{y}$	Velocidad relativa entre extremos de amortiguador – Primera derivada del desplazamiento respecto al tiempo
$\ddot{y}$	Segunda derivada del desplazamiento respecto al tiempo: aceleración de la masa
$y_0$	Desplazamiento inicial en el momento $t=0$
$y_f$	Posición final de recorrido de la masa $m_0$
$y_{st}$	Desplazamiento estático del resorte producido por $F_0$
$\xi$	Relación de amortiguamiento del sistema
$\beta$	Relación de distancia entre eje neutro y cara a tracción
$\beta_i$	Coefficiente de forma
$\Delta t$	Variación de tiempo
$\eta_B$	Coefficiente de corrección del muestreador
$\eta_H$	Coefficiente de eficiencia martillo
$\eta_R$	Coefficiente de corrección para longitud de la varilla
$\eta_s$	Coefficiente de corrección para el diámetro de la perforación
$\mu$	Presión de poros; Módulo de Poisson
$\rho$	Momentum; Densidad
$\sigma$	Esfuerzo efectivo total del suelo
$\sigma'$	Esfuerzo efectivo del suelo
$\sigma_{adm}$	Tensión admisible del suelo
$\sigma_d$	Tensión dinámica
$\sigma_{máx}$	Tensión máxima del suelo

$\sigma_z$	Tensión estática medida a una profundidad z
$\tau$	Esfuerzo de resistencia al corte del suelo; Pulso
$\gamma$	Peso específico de una masa de suelo
$\gamma_{ac}$	Peso específico del acero
$\gamma_c$	Peso específico del hormigón
$\gamma_w$	Peso específico del agua
$\phi$	Angulo de fricción; Coeficiente de reducción para $N_{cbg}$
$\psi_3$	Coeficiente de condición de agrietamiento del hormigón
$\omega$	Frecuencia natural del sistema [rad/s]
$\tilde{\omega}$	Frecuencia de fuerza armónica [rad/s]
$\omega_D$	Frecuencia del sistema con amortiguación
$\omega_h$	Velocidad angular de eje horizontal
$\omega_{motor}$	Velocidad angular de motor
$\omega_{polea}$	Velocidad angular de polea
$\omega_v$	Velocidad angular de eje vertical



# CAPÍTULO 1

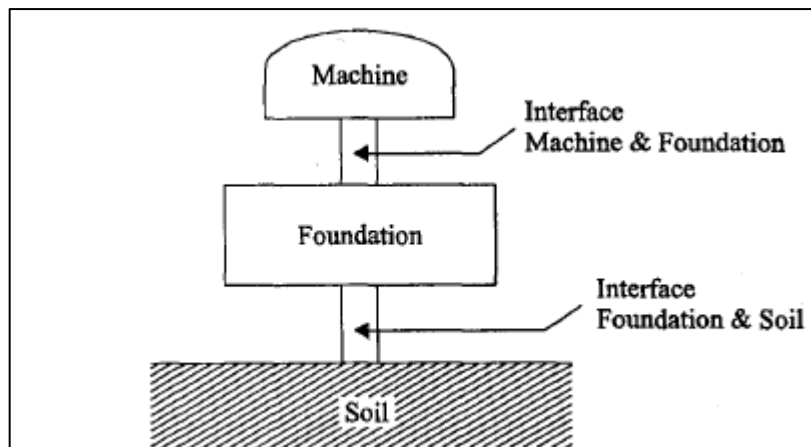
## GENERALIDADES

### 1.1. CONCEPTO DE CIMENTACIÓN

El sistema de cimentación de una máquina se compone, de manera sencilla, de una estructura que descansa sobre el suelo, la cual está sujeta a diversas cargas estáticas y dinámicas. Estas pueden ser:

- Generadas por la propia máquina.
- Aplicadas externamente.
- Causadas por fuerzas externas y transmitidas a través del suelo.

Un sistema típico se adjunta a continuación (Figura 1.1).



**Figura 1.1:** Esquema básico de cimentación de máquinas (Fuente: extraída de Bathia, 2008)

Cabe destacar que el diseño de una cimentación para maquinaria debe contar con la capacidad suficiente para resistir los esfuerzos a los que estará sometido en su vida útil (cargas estáticas y dinámicas, viento, diferenciales de temperatura, entre otros). Con respecto al diseño dinámico, el mismo debe cumplir con los estados límite de servicio y de falla, donde las deformaciones y vibraciones del conjunto máquina-cimentación-suelo, generadas cuando el equipo está en operación, cumplan con las normativas y reglamentos vigentes.

### 1.2. CLASIFICACIÓN DE CIMENTACIONES DE MAQUINARIA

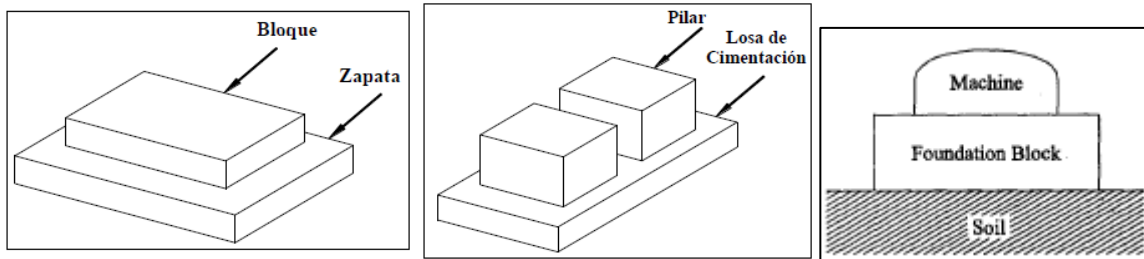
Las cimentaciones se pueden clasificar en dos grandes grupos, *superficiales* o *profundas*, según la profundidad de emplazamiento.

Por otra parte, las clasificaciones para cimentaciones de máquinas varían según el autor que se consulte, por lo que el presente Proyecto Final considerará 2 categorías: fundación tipo *bloque* y fundación tipo *marco*. Ambas pueden poseer o no, aisladores de vibración del tipo resorte o amortiguadores.

- *Fundación tipo bloque*

En este caso, la máquina se monta sobre un bloque sólido o hueco, generalmente de hormigón, que se apoya directamente sobre el suelo. Su centro de gravedad del sistema máquina-fundación se localiza cerca de la rasante. Al ser una cimentación del tipo superficial, su única limitación es la capacidad portante del suelo en los primeros estratos.

Existe una variación, tipo *bloque combinado*, el cual se utiliza cuando se tienen dos máquinas próximas entre sí. Consiste en dos bloques de hormigón, apoyados sobre una losa de cimentación.

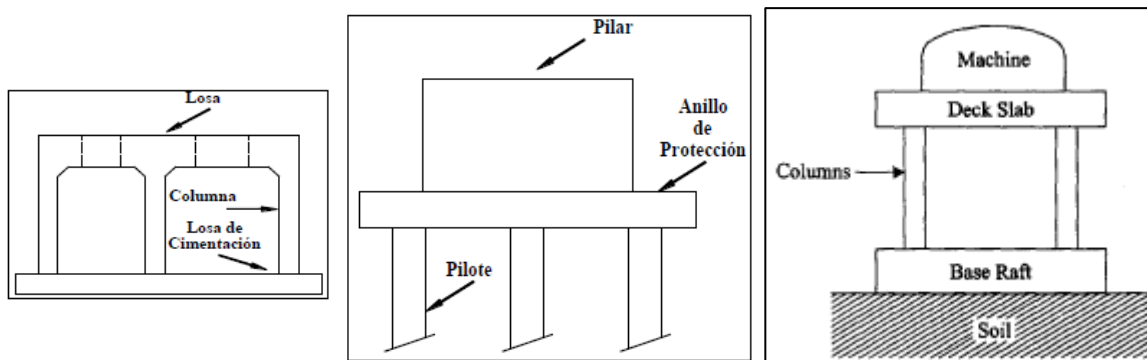


**Figura 1.2:** Cimentación tipo bloque (Fuente: extraída de Salazar Contreras (2013) y de Bathia (2008))

- *Fundación tipo marco*

Por otra parte, en este tipo de fundaciones, la máquina se monta sobre una losa horizontal, sostenida en su parte inferior por columnas verticales, apoyadas en una losa de cimentación, generando una superestructura elevada para soportar equipos, generalmente turbinas que generan electricidad. La elevación permite instalar tuberías, accesorios, pases eléctricos y demás elementos para la maquinaria.

Al igual que en la fundación tipo bloque, existe una variante, en la que, si bien se sigue manteniendo la estructura tipo pórtico, dichas columnas representan pilotes, generando una subestructura, sobre la que luego se apoya la losa de cimentación. En el caso de que las condiciones de resistencia del suelo en las primeras capas sean muy bajas, se puede utilizar una losa, o bien, una estructura combinada con vigas, la cual forma una especie de parrilla, apoyadas sobre pilotes, constituyendo una fundación del tipo profunda.



**Figura 1.3:** Cimentación tipo marco (Fuente: extraída de Salazar Contreras (2013) y de Bathia (2008))

Con respecto a los materiales de fundaciones, si bien con el transcurso del tiempo se han utilizado materiales como ladrillos o perfiles metálicos para cimentaciones tipo marco, el presente Proyecto Final utilizará hormigón armado, como material para la construcción de la fundación, independientemente de la tipología final que se escoja.

El hormigón posee beneficiosas propiedades como lo son: la resistencia al fuego y a la corrosión, y en relación a las cargas dinámicas, una amortiguación mayor que las estructuras de acero, lo que posibilita la reducción de amplitudes de vibración.

### 1.3. CONSIDERACIONES GENERALES

“La clave de un diseño estructural exitoso consiste en determinar correctamente qué tipo de cimentación va a utilizarse, a qué profundidad se va a desplantar y qué armadura llevará. Es responsabilidad del ingeniero dicha elección, utilizando criterios basados en experiencia ingenieril, cumpliendo con la normativa vigente”. (Salazar Contreras, 2013).

Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones respecto a:

Localización del proyecto: constituye una parte primordial del diseño estructural. Se debe conocer en primer lugar la ubicación de la planta de producción de la Empresa, si cuenta con vías de acceso a la misma, las construcciones que existan en el lugar, si existieron edificaciones anteriores y estructuras adyacentes a la planta.

Además, es de vital importancia conocer las propiedades del terreno a fundar, comenzando por una inspección visual y luego la ejecución imprescindible de un estudio de suelos, el cual arrojará importantes resultados como ser: clasificación de los suelos, conformación del suelo mediante perfil de suelo, presencia de flujos de agua a nivel freático e infiltración superficial, propiedades geotécnicas de los suelos encontrados. Los mismos se desarrollarán en el Capítulo 4 del presente Proyecto Final.

Requerimientos del cliente (Empresa): la Empresa deberá brindar toda la información posible respecto al tipo de proceso productivo que realiza, estimar la ubicación final donde se emplazará la máquina, y por ende su fundación; si se prevén ampliaciones o nuevas instalaciones, como así también disponibilidad económica de la misma, y si existiesen restricciones en el montaje o instalación de la máquina, debido a cercanía con otros equipos o pases de tuberías, impuestas por el área de Ingeniería de Producción y Procesos.

Máquina a cimentar: se debe contar con planos del fabricante de la máquina, e información respecto a pesos, dimensiones, cargas y velocidades de operación, localización de anclajes, centros de masa de la máquina.

Existen ciertos parámetros que Salazar recomienda para que una fundación soporte las cargas impuestas por la máquina, restringiendo asentamientos dentro de los límites permisibles. Se detallan a continuación:

En el caso de cimentaciones tipo *bloque*, el mismo deberá ubicarse sobre el nivel freático o sobre estratos de suelo de menor sensibilidad a vibraciones. Se aconseja procurar un área libre de 30 centímetros desde el borde de la máquina hasta el borde del bloque, a fines de mantenimiento. Se deberá tratar que el centro de gravedad de la máquina coincida con el centro de gravedad de la cimentación. Con respecto a las dimensiones, se recomienda mantener una relación cimentación-masa del equipo 3:1, considerando un espesor  $h$  mayor a 60 centímetros y no menor a:

$$h = 0,01 \times \left( \frac{G \times L^4}{B} \right)^{1/3} \quad (1.1)$$

En donde:

- G: módulo de corte del suelo [kg/cm<sup>2</sup>]
- L: dimensión larga de la cimentación [cm]

- B: dimensión corta de la cimentación [cm]

En el caso de cimentaciones tipo *marco*, se deben elegir un número de pilotes de tal manera que ninguno de ellos deba soportar más carga admisible que la que resiste. Se deberá hacer coincidir el centroide del conjunto de pilotes con el centro de gravedad de la estructura combinada y la máquina. Por último, los pilotes deben ser anclados correctamente a la losa, para tener una rigidez adecuada.

Para finalizar, como recomendación general se aconseja evitar el fenómeno de resonancia, concepto que se explicará en el siguiente capítulo del presente Proyecto Final, por lo que se debe verificar que la frecuencia natural del bloque de cimentación esté alejada de la frecuencia de operación de la misma.

#### 1.4. CLASIFICACIÓN DE MÁQUINAS

Según el tipo de máquina a fundar corresponde una tipología de cimentación. En base a esto, las máquinas se pueden clasificar según su:

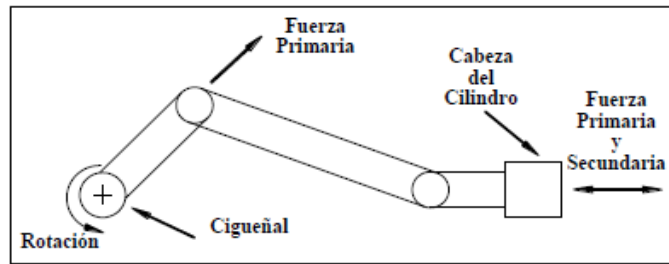
- ❖ Tipo de movimiento:
  - Máquinas reciprocantes
  - Máquinas centrífugas
  - Máquinas de impacto
  - Máquinas soportadas por estructuras
- ❖ Velocidad de operación:
  - Máquinas de muy baja velocidad (hasta 100 rpm)
  - Máquinas de baja velocidad (100 a 500 rpm)
  - Máquinas de velocidad media (1.500 a 3.000 rpm)
  - Máquinas de alta velocidad (3.000 rpm y superiores)

Para el presente Proyecto Final se utilizará el tipo “máquina de impacto” la cual se categoriza dentro de “máquinas de muy baja velocidad”, cuya justificación y características se expondrán en el capítulo 3.

A continuación, se realiza una breve descripción de los tipos de máquinas:

- *Máquina reciprocante:*

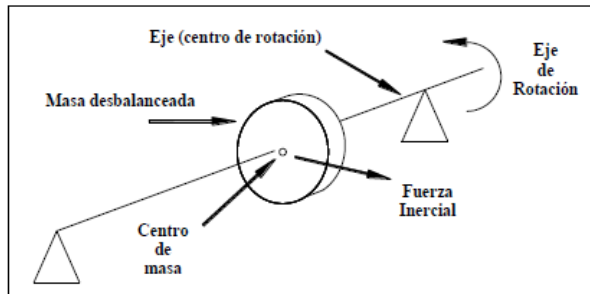
Consiste en un sistema biela-manivela y un pistón, el cual convierte un movimiento de rotación de la manivela en un movimiento rectilíneo alternativo en el pistón, a través de la biela, o viceversa. La operación de una máquina de este tipo ocasiona fuerzas desbalanceadas y momentos asimétricos, los cuales dependen de la inercia de las masas en movimiento y de las fuerzas actuantes propias del proceso. Ejemplos de máquinas reciprocantes: compresor tipo pistón, máquinas limadoras, talladoras y mortajadoras industriales.



**Figura 1.4:** Esquema máquina reciprocante (Fuente: extraída de Taco, 2009)

– **Máquinas centrífugas:**

Describen un único movimiento, el cual es giratorio o de rotación. El ejemplo más común corresponde a la de una turbina, la cual es una máquina de alta velocidad (entre 3.000 y 10.000 rpm), muy sensible a asentamientos y deflexiones. Producen vibraciones inducidas no armónicas. Otro ejemplo de máquina centrífuga es la de un motor eléctrico.



**Figura 1.5:** Esquema máquina centrífuga (Fuente: extraída de Taco, 2009)

– **Puentes grúa:**

Constituyen el tipo de “máquinas soportadas por estructuras”, las cuales en su movimiento de traslación, arranque y frenado transmiten vibraciones a la estructura que las soporta.

– **Máquinas de impacto**

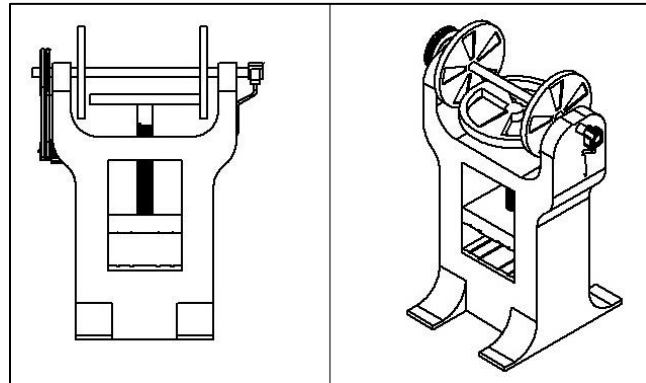
Dentro de esta clasificación, se diferencian tres subgrupos:

- Martinetes
- Balancines
- Prensas (mecánicas o hidráulicas).

La principal diferencia entre ellas radica en que, tanto los martinetes como los balancines generan mayor cantidad de impactos por unidad de tiempo, pero de menor magnitud. Las prensas, en cambio, logran alcanzar un valor de impacto mucho mayor, pero a una menor velocidad, aplicando una presión generada por:

- ✓ Un cilindro hidráulico, que transmite presión al aceite incompresible del sistema y este, a su vez actúa sobre el vástago del pistón que se desplaza linealmente. Cuando este vástago se encuentra con alguna obstrucción (por ejemplo, el material a deformar), aumenta la presión del fluido, lo que genera la fuerza necesaria para el estampado de la pieza (prensa hidráulica).
- ✓ Mediante un mecanismo que transforma el movimiento giratorio de un motor eléctrico, el cual es transmitido a un volante a través de una polea, en uno rectilíneo de la masa (prensas mecánicas).





**Figura 1.6:** Esquema máquina de impacto (Fuente: elaboración propia)

## 1.5. UBICACIÓN Y ANTECEDENTES

El presente Proyecto Final se basa en el estudio de cargas dinámicas y diseño de una cimentación especial para una máquina mecánica de alto impacto del tipo “prensa a fricción” de 250 toneladas, para la firma HIDRÁULICA SAN FRANCISCO S.R.L., en adelante HSF o La Empresa. La misma se encuentra ubicada en calle Lothar Badersbach 4505, dentro del sector del Parque Industrial de la ciudad de San Francisco, Córdoba.



**Figura 1.7:** Ubicación de HSF (Fuente: extraída de Google Maps, 2021).

HSF se dedica a la fabricación de terminales, adaptadores, codos y accesorios para el 70% del sector oleo-hidráulico del país, mediante un proceso de mecanizado de arranque de viruta utilizando maquinaria CNC. Además, fabrican máquinas necesarias para la confección de circuitos hidráulicos.

Debido a la gran demanda de sus productos y adquisición de grandes clientes, la Empresa desea expandirse, ofreciendo al mercado codos forjados marca HSF, utilizados en los circuitos hidráulicos que la misma provee.

Es por esta razón que HSF desea adquirir una máquina mecánica tipo "Prensa a fricción" de 250 toneladas de impacto, utilizada para producir codos forjados en acero SAE 1045.

Aquí es donde se presentan cuatro problemas de incumbencia para el Ingeniero Civil, los cuales serán eje fundamental del presente Proyecto Final. Debido a las características de la prensa a instalar, y al ser ésta una máquina de impacto, cuando se produce el golpe de estampado para forjar el codo, se generan cargas estáticas y dinámicas.

Estas cargas dinámicas pueden afectar principalmente a:

- Las personas que trabajan en la operación de la maquinaria misma, o se encuentran en la cercanía de ésta.
- Las estructuras vecinas.
- La cimentación de la máquina, los materiales que la conforman y el suelo subyacente.
- Máquinas cercanas a la prensa mecánica.

En primer lugar, debido a la alta sensibilidad que posee el cuerpo humano, se debe asegurar que las vibraciones que afecten al trabajador se encuentren dentro de un rango permitido específico, para evitar efectos perjudiciales en su salud.

Con respecto al impacto en las estructuras vecinas, la cimentación deberá estar separada de edificios adyacentes, lo cual es tarea del Ingeniero Civil resolver la aislación de la prensa hacia estas edificaciones.

Por otra parte, debido a la transmisión de cargas dinámicas al conjunto cimentación-suelo, se generan cambios en el estado de esfuerzos del suelo, aumentando las deformaciones y las presiones en los poros. Si bien las cargas dinámicas pueden no inducir a la falla del suelo, proporcionan amplificaciones del movimiento del terreno, generando mayores asentamientos diferenciales y provocando fisuras en el hormigón utilizado en la cimentación.

Por último, y como se explicará en el próximo capítulo, las cargas dinámicas producidas por la prensa están asociadas a vibraciones y frecuencias, las cuales podrían transmitirse al pavimento industrial de la planta de HSF, realizado mediante paños de hormigón armado, en donde están instalados tornos CNC de absoluta precisión. Estos tornos se descalibran fácilmente, provocando errores en las piezas que producen. Si dicho error supera la tolerancia máxima de 0,6 mm, la pieza se descarta, afectando al lote entero de piezas producidas en la tanda, perjudicando económicamente a la Empresa.

## **1.6. OBSERVACIONES**

HSF no es un caso aislado, sino que los problemas enunciados anteriormente, se presentan en aquellas industrias que poseen equipos de características similares, fundados en cimentaciones comunes.

En función a los antecedentes recopilados en industrias de San Francisco y Rafaela, se refleja una preocupación general en cuanto a la percepción de vibraciones en aquellas que no poseían una cimentación especial para equipos dinámicos, afectando no sólo a las industrias en sí, sino que también a las propiedades lindantes.

A su vez, las empresas que poseían equipos de arranque de viruta emplazados en un radio de aproximadamente 5,00 [m] alrededor de una prensa mecánica, manifestaron errores de descalibración. Es por razón que los equipos debieron ser desplazados hacia otros sectores de las plantas de producción, en orden de solucionar este problema.

Por último, en referencia a problemas estructurales, las prensas que se encontraban operando en cercanía de muros, generaron grandes fisuras y grietas en las mamposterías. Además, los problemas de asentamientos diferenciales se presentaron en equipos tipo martinete, aun habiendo ejecutado una cimentación especial, pero que no disponían de un enfoque global de la misma.

## **1.7. OBJETIVOS**

El presente Proyecto Final tiene como objetivo principal diseñar estructuralmente una cimentación sometida a cargas dinámicas, causadas por una prensa mecánica de alto impacto para la Empresa HSF, localizada en la ciudad de San Francisco, Córdoba.

Para ello, el trabajo desarrollado en este Proyecto Final contempla los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el comportamiento del conjunto máquina-cimentación-suelo.
- Investigar los efectos de las vibraciones mecánicas en el sistema suelo-cimiento y el fenómeno de resonancia.
- Analizar las posibles alternativas que dan respuesta a la fundación de máquinas de alto impacto.
- Diseñar estructuralmente la tipología de fundación seleccionada.

# CAPÍTULO 2

## CARGAS DINÁMICAS

Las fuerzas dinámicas sobre las estructuras producen excitaciones que las hacen cambiar de su condición de reposo a una condición de movimiento oscilatorio. La naturaleza de este movimiento se encuentra relacionada con las propiedades del sistema estructural y con el tipo de carga aplicada a la estructura.

El estudio de teoría de vibraciones es fundamental para el correcto entendimiento del comportamiento dinámico de las estructuras y en especial, para realizar un adecuado análisis para el diseño de una cimentación de maquinaria.

En este capítulo, se estudiarán los aspectos asociados a un sistema de masa-resorte-amortiguador para poder explicar los conceptos fundamentales de la teoría de vibraciones, que luego se aplicarán en el estudio y desarrollo del presente Proyecto Final.

### 2.1. NOCIONES GENERALES DE LA DINÁMICA

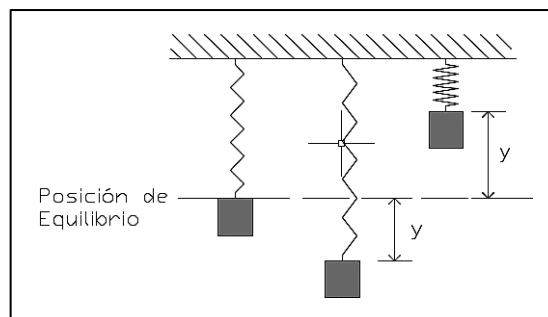
#### 2.1.1. Introducción

La dinámica se enfoca en el estudio de los cuerpos en movimiento, en donde se estudian los orígenes y causas que lo producen, permitiendo predecir las fuerzas que lo generarán. Además, estudia las características que permiten describir el tipo de movimiento, como son: desplazamientos, velocidades y aceleraciones, en función del tiempo.

Las cargas dinámicas se definen como cargas que se aplican en un período relativamente corto de tiempo, induciendo vibraciones o efectos vibratorios en cimentaciones o edificaciones, y en diversas ocasiones ocurre que las estructuras se encuentren afectadas por éstas.

Se define como vibración mecánica o efecto vibratorio a aquella oscilación o desplazamiento que se produce alrededor del punto de equilibrio de un cuerpo.

Con el fin de visualizar el concepto se expone la Figura 2.1, y se considera que existe una masa unida a un resorte, la cual se desplaza un cierto valor de "y" desde su posición o punto de equilibrio. La masa tiende a regresar al punto debido a las fuerzas de restitución del resorte unido a ella, con un valor velocidad que provoca su desplazamiento más allá del punto, generándose una oscilación alrededor de la posición de equilibrio. Cuando esto ocurre, se dice que se está en presencia de vibraciones mecánicas.



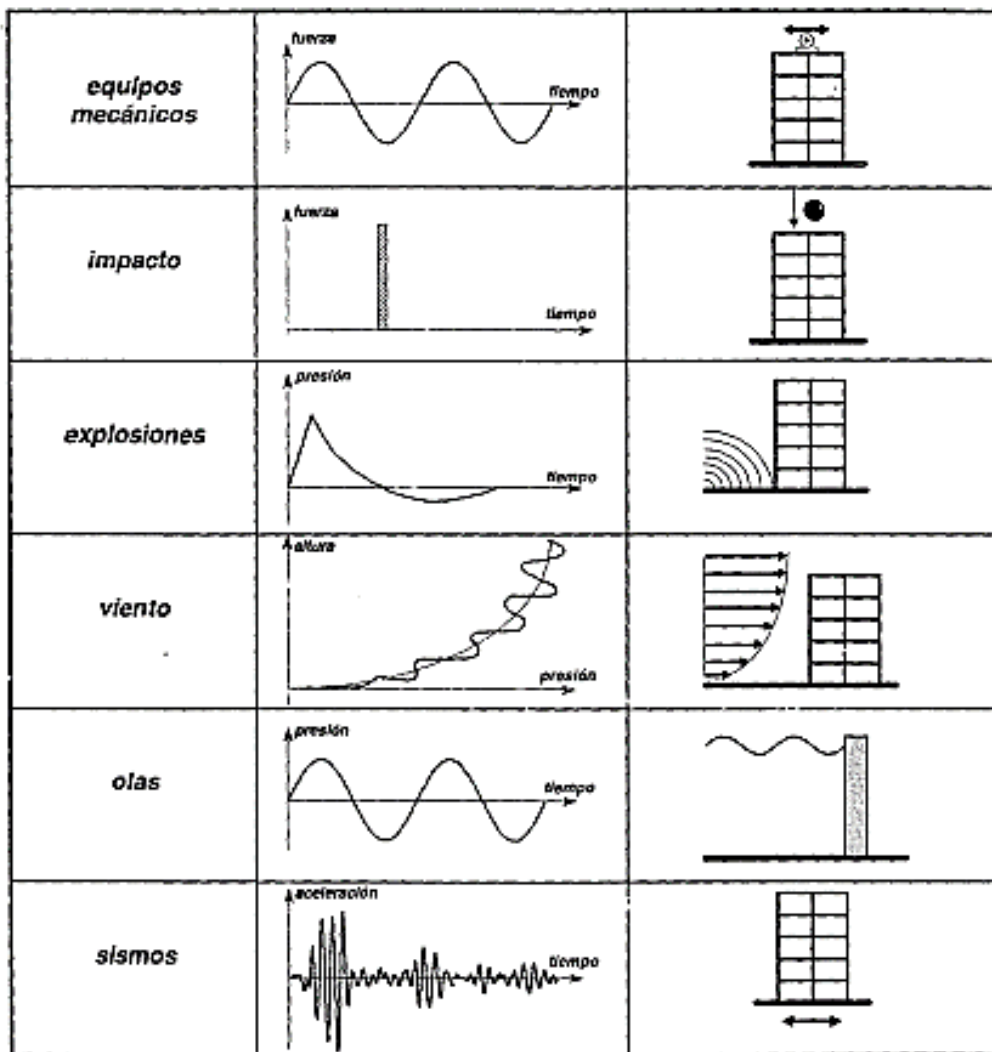
**Figura 2.1:** Esquema masa resorte, descripción de posición de equilibrio.  
(Fuente: adaptada de Bowles, 1996)

Las fuerzas dinámicas generan vibraciones en las estructuras y el desplazamiento que generan depende de su origen. En la Figura 2.2 se observan los distintos tipos de excitaciones dinámicas en las estructuras.

Los movimientos que generan estas excitaciones, pueden ser del tipo aleatorio o repetitivo, clasificándose como:

- Movimiento periódico: son aquellos que se repiten con una misma intensidad en intervalos regulares de tiempo. Son característicos de equipos vibratorios.
- Movimiento no periódico: se producen por la acción de cargas impulsivas de naturaleza aleatoria y no se repiten en intervalos de tiempo constante, como son los sismos, explosiones y tráfico.

En el presente Proyecto Final se estudiará el movimiento periódico de las excitaciones dinámicas producidas por equipos de impacto, como lo es una prensa mecánica.



**Figura 2.2:** Tipos de excitaciones dinámicas (Fuente: extraída de García Reyes, 1998)

### 2.1.2. Conceptos básicos

A continuación, se detallarán los conceptos básicos a considerar al momento de analizar estructuras sometidas a cargas dinámicas.

- Ley de Newton

Isaac Newton (1642-1727) fue quien estableció tres Leyes que permiten el entendimiento del movimiento de los cuerpos, constituyendo las bases de la Mecánica Clásica. A continuación, se hará referencia en particular a la 2ª Ley de Newton, fundamental para los problemas dinámicos, la cual enuncia:

*“La resultante de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo es igual a la masa del cuerpo multiplicada por su aceleración”.*

$$F = m \times a \quad (2.1)$$

Si el valor de la aceleración es igual a cero, la ecuación se encuentra en el campo de la estática; caso contrario, en el de la dinámica.

- Principio de d'Alembert

En la Dinámica, la ecuación (2.1) se expresa de forma similar a la ecuación de equilibrio de la estática gracias al principio de d'Alembert (1717-1783), quedando:

$$F - m \times a = 0 \quad (2.2)$$

- Grados de libertad

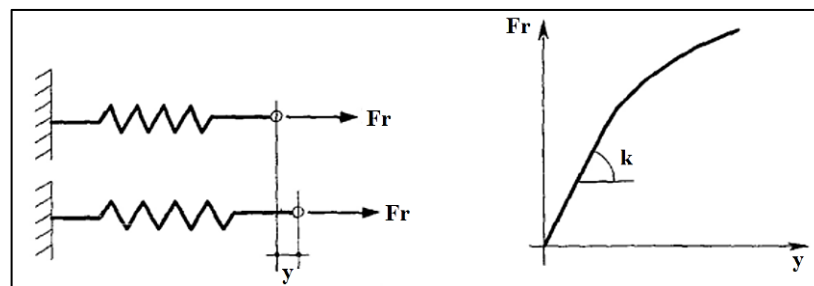
Se define como grado de libertad al número de coordenadas independientes para determinar la posición de un sistema en cualquier instante de tiempo, por lo que, estructuras modeladas con un grado de libertad representan sistemas de una única coordenada de desplazamiento.

- Rigidez

El concepto de rigidez hace referencia a la relación entre las fuerzas externas sobre un cuerpo y las deformaciones que ellas provocan sobre él. Se denota con la letra  $k$ . La rigidez de un cuerpo es la encargada de restituir el sistema a su punto de equilibrio, proporcionando la fuerza restauradora  $Fr$ . La fuerza restauradora se expresa por la ecuación (2.3):

$$Fr = k \times y \quad (2.3)$$

Normalmente en los modelos matemáticos de cálculos de estructuras, la rigidez se representa mediante resortes, los cuales resisten las deformaciones debido a un trabajo interno del material que lo conforma.



**Figura 2.3:** Modelización del sistema resorte (izq.) y trabajo interno del mismo (der.) (Fuente: adaptada de García Reyes, 1998)

- Amortiguamiento

Cuando un sistema experimenta vibraciones en el transcurso del tiempo, éstas disminuirán hasta desaparecer por completo, llevando al sistema a su estado de reposo. Este proceso corresponde a un proceso de disipación o pérdidas de energía que se denomina Amortiguamiento y es producido por fuerzas de amortiguamiento  $F_a$ .

Cumpliendo con el Principio de conservación de energía, el cual afirma que "la cantidad total de energía en un sistema no se crea ni se destruye, sino que se transforma", parte de la energía mecánica en un proceso de vibración se transforma en energía calórica (calor) o energía sonora (ruido).

Todos los sistemas físicos poseen algún tipo de amortiguación y se denominan Sistemas Amortiguados. Existen casos en donde dicha amortiguación es muy pequeña, por lo que se la ignora, clasificándose el sistema como Sistema No Amortiguado.

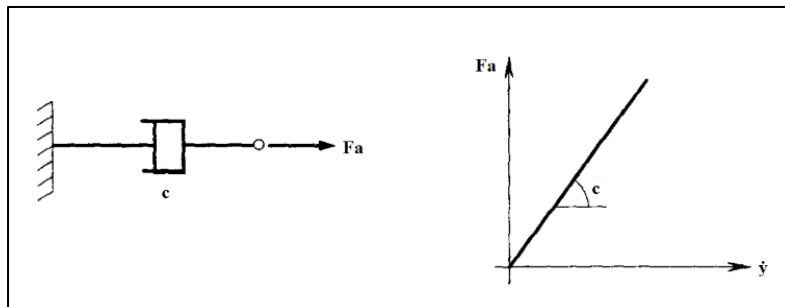
Los fenómenos de amortiguamiento se describen habitualmente en tres tipos, siendo el primero el de uso más extendido debido a su simplicidad.

#### *Amortiguamiento viscoso*

Hace referencia a las fuerzas de viscosidad que se oponen al movimiento de un cuerpo desplazándose dentro de un fluido, provocando pérdidas de energía.

En este tipo de amortiguamiento las fuerzas  $F_a$  o de fricción son proporcionales a la magnitud de la velocidad y opuestas a la dirección del movimiento. La constante del amortiguador viscoso se denota con la letra  $c$ , y la expresión (2.4) expresa la fuerza de amortiguamiento, donde  $\dot{y}$  es la velocidad relativa entre los extremos del amortiguador.

$$F_a = c \times \dot{y} \quad (2.4)$$

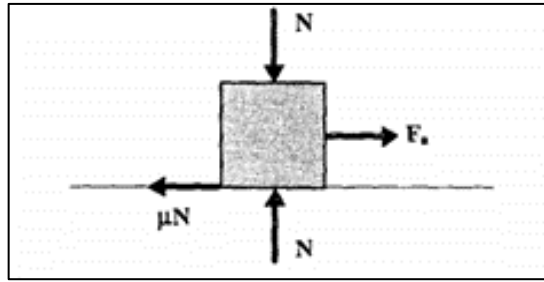


**Figura 2.4:** Modelización del sistema amortiguador (izq.) y trabajo interno del mismo (der.).  
(Fuente: adaptada de García Reyes, 1998)

#### *Amortiguamiento de Coulomb*

En este caso se hace referencia a la generación de fricción producida entre dos superficies secas. La fuerza de fricción es igual al producto entre el coeficiente de fricción  $\mu$  y la fuerza normal a la superficie. Este amortiguamiento posee signo opuesto al de la velocidad y al de la dirección del movimiento.



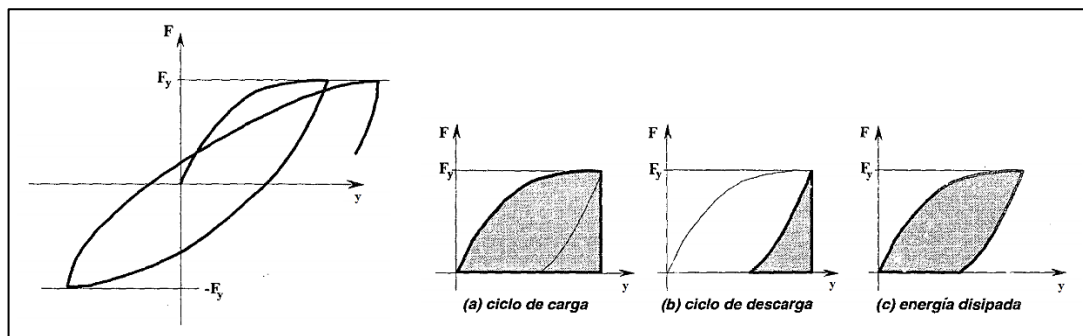


**Figura 2.5:** Fuerzas de fricción entre dos superficies secas.  
(Fuente: extraída de García Reyes, 1998)

### Amortiguamiento histerético

Cuando el material que compone a un elemento estructural se encuentra en el rango no lineal o inelástico, o cuando la carga que está aplicada invierte su sentido, ocurre este tipo de amortiguamiento, el cual se representa con una trayectoria curva.

Generalmente, la trayectoria de la curva de carga es distinta a la de la descarga, lo que indica que no toda la energía de deformación acumulada en el elemento se convierte en energía cinética en el ciclo de descarga.



**Figura 2.6:** Curva fuerza-deformación para material inelástico (izq.) y disipación de energía en un sistema inelástico (der.) (Fuente: adaptada de García Reyes, 1998)

## 2.2. TEORÍA DE VIBRACIONES

Los sistemas dinámicos pueden tratarse de sistemas que vibren libremente, o debido a una excitación armónica. En el primer caso se trata de una vibración libre y en el segundo, de una vibración forzada. Ambos sistemas se idealizan como sistemas de un solo grado de libertad.

Cuando se trata de una vibración libre se refiere a una estructura o sistema estructural, el cual sufre una alteración en su punto de equilibrio y luego se libera, generando una oscilación alrededor de ese punto, como se ha explicado anteriormente. En una vibración libre no existen fuerzas de excitación externas.

Por otra parte, cuando una estructura se encuentra afectada por una vibración forzada, ésta puede estar sometida a excitaciones armónicas cuyas magnitudes pueden ser representadas por funciones de seno y coseno en función del tiempo. Este caso se presenta en estructuras que contienen máquinas, que indefectiblemente por la operación de las mismas generan este tipo de excitación.

A su vez, como se ha mencionado anteriormente, los sistemas sometidos a vibraciones pueden encontrarse amortiguados o despreciar las fuerzas de disipación.



A continuación, se explicarán brevemente los conceptos mencionados y se obtendrán las ecuaciones de cada sistema.

### 2.2.1 Sistema sin amortiguación: vibración libre

Este sistema consiste en un oscilador simple sin amortiguación, donde el movimiento está gobernado por la influencia de la velocidad y desplazamientos especificados, características llamadas condiciones iniciales.

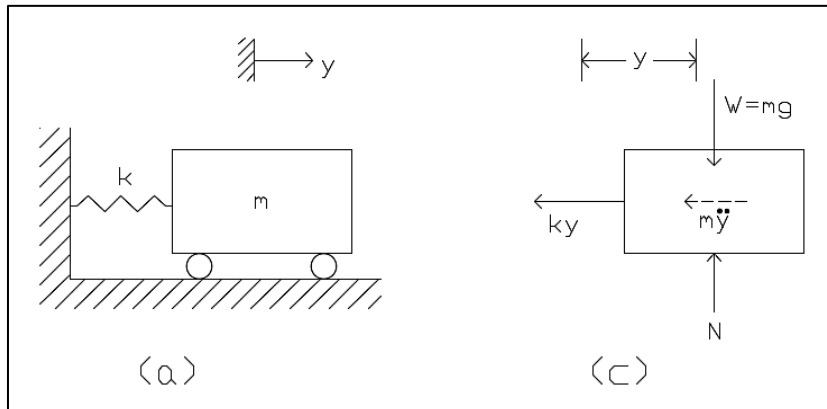
El oscilador simple se define como una masa unida a un resorte, como se muestra en la Figura 2.7, donde el resorte restringe el movimiento de la masa en la dirección de  $y$ .

Si trazamos el diagrama de cuerpo libre del oscilador, se obtiene la ecuación de equilibrio, denotada por la siguiente expresión:

$$m \ddot{y} + k y = 0 \tag{2.5}$$

Donde:

- $k y$  representa la fuerza de restitución del sistema, donde  $k$  es la constante del resorte e  $y$  el desplazamiento en esa coordenada.
- $m \ddot{y}$  representa la fuerza inercial, donde  $\ddot{y}$  es la segunda derivada del desplazamiento respecto al tiempo, es decir, la aceleración de la masa.



**Figura 2.7:** Oscilador simple (a) y diagrama de cuerpo libre (c). (Fuente: adaptada de Paz, 1992).

La ecuación (2.5) describe una ecuación diferencial lineal homogénea de segundo orden. Si en esta ecuación se dividen los términos por  $m$  y se denota  $\omega^2$  a la razón de la constante del resorte por la masa del oscilador  $\omega^2 = k/m$ , se obtiene:

$$\ddot{y} + \omega^2 y = 0 \tag{2.6}$$

Esta ecuación posee las mismas características que la anterior, y tiene como solución la expresión (2.7), siendo  $A$  y  $B$  las condiciones iniciales que generaron el movimiento:

$$y(t) = A \text{ sen } (\omega t) + B \text{ cos } (\omega t) \tag{2.7}$$

Los valores de las constantes  $A$  y  $B$  se obtienen definiendo  $y_0$  y  $v_0$  como el desplazamiento inicial de la masa y la velocidad en el momento  $t = 0$ , respectivamente. Reemplazando en (2.7), se obtiene:

$$y_0 = A \operatorname{sen}(\omega 0) + B \operatorname{cos}(\omega 0) \quad (2.8)$$

$$y_0 = B$$

Derivando la ecuación (2.7), y reemplazando  $t$  por  $t = 0$ , se obtiene:

$$\dot{y} = A \omega \operatorname{cos}(\omega t) - B \omega \operatorname{sen}(\omega t) \quad (2.9)$$

$$v_0 = A \omega \operatorname{cos}(\omega t) - B \omega \operatorname{sen}(\omega t)$$

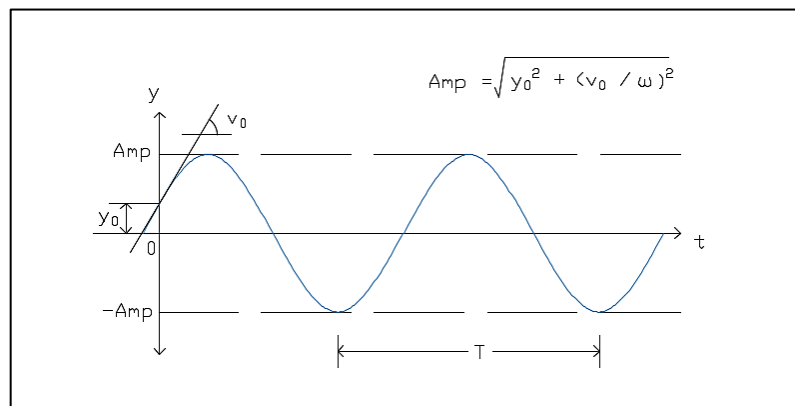
$$v_0 = A \omega \quad (2.10)$$

Reemplazando en (2.7) los valores de  $B$  y  $A$ , obtenidos de las ecuaciones (2.8) y (2.10), respectivamente, se obtiene la ecuación de movimiento del oscilador simple sin amortiguamiento de un solo grado de libertad, en función del tiempo  $t$ , como se muestra a continuación:

$$y = y_0 \operatorname{cos} \omega t + \frac{v_0}{\omega} \operatorname{sen} \omega t \quad (2.11)$$

Al graficar esta expresión en la Figura 2.8, se obtiene la posición de la masa en cada instante de tiempo y se observa que el movimiento vibratorio del oscilador simple es armónico, por lo tanto, se trata de un movimiento periódico, que puede ser conceptualizado por una ecuación de seno o coseno de la misma frecuencia  $\omega$ .

La amplitud  $Amp$  es el desplazamiento máximo que alcanza la masa, y se expresa en la Figura 2.8.



**Figura 2.8:** Desplazamiento de la masa en el tiempo ante condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad. (Fuente: adaptada de Paz, 1992)

Se define entonces a  $\omega$  y a  $f$  como la frecuencia natural del sistema, reflejando la misma característica del movimiento, pero con diferentes unidades. Mientras que  $\omega$  posee unidades en [rad/s],  $f$  lo hace en ciclos por segundo [Hz]. Por su parte,  $T$  hace referencia al período natural del sistema, utilizando la variable tiempo en segundos [s], siendo sus expresiones (2.12), (2.13) y (2.14) respectivamente.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.12)$$

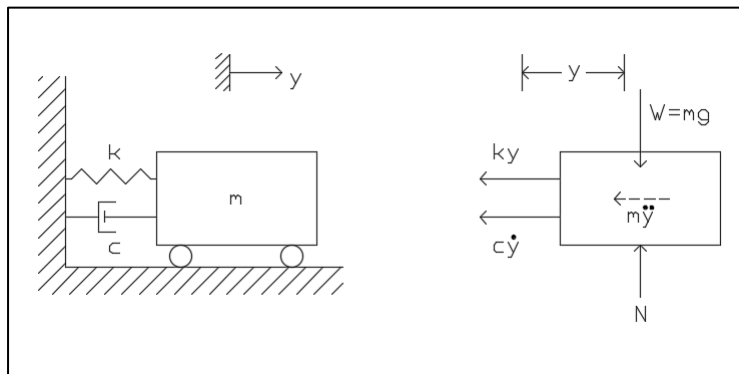
$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.13)$$

$$T = 2\pi/\omega \quad (2.14)$$

### 2.2.2 Sistema con amortiguación: vibración libre

Como se mencionó anteriormente, la amortiguación se encuentra presente en todos los sistemas. En este capítulo se tratarán sistemas con amortiguación viscosa, en donde las fuerzas de amortiguamiento se representan mediante una expresión matemática simple, debido a que, dichas fuerzas son proporcionales a la velocidad relativa entre sus extremos.

Se estudia entonces, un oscilador simple amortiguado de un solo grado de libertad, comprendido por una masa  $m$  que está unida a un resorte, representado por su constante  $k$ , y a un amortiguador de constante  $c$ . Al igual que en el caso anterior se representarán las fuerzas actuantes en un diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 2.9.



**Figura 2.9:** Diagrama cuerpo libre: sistema amortiguado (Fuente: adaptada de Paz, 1992)

La ecuación de equilibrio se expresa en la expresión (2.15):

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + k y = 0 \quad (2.15)$$

Donde ahora se agrega el producto  $c \times \dot{y}$  que representa la fuerza de amortiguamiento ejercida por el amortiguador. La ecuación (2.15) trata de una ecuación diferencial homogénea de segundo orden que tiene como solución la función exponencial  $y = C e^{pt}$ .

Aplicándola y factorizando la misma da como resultado la expresión (2.16), representando así, la ecuación característica del sistema.

$$m p^2 + c p + k = 0 \quad (2.16)$$

Dicha ecuación posee como solución dos raíces dadas por la siguiente expresión:

$$p_1 = p_2 = \frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (2.17)$$

Se llega a la expresión (2.18), la cual es la solución de la ecuación diferencial, donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes determinadas a partir de las condiciones iniciales del movimiento.

$$y(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} \quad (2.18)$$

De esta ecuación se desprenden tres importantes conceptos que dependen del signo que tome el radical bajo de la raíz de la ecuación (2.17). Los mismos se expondrán a continuación.

La *amortiguación crítica*  $c_{cr}$ , se obtiene cuando el radical de (2.17) es igual a cero. Este concepto se ilustra en la Figura 2.10, de donde se observa que la curva de  $\xi=1$  llega a cero rápidamente, lo que significa que la masa se detiene y no tendrá ninguna oscilación. Éste es el caso límite y quiere decir que cuando un sistema está críticamente amortiguado, éste posee la menor cantidad de amortiguación para la cual no se genera oscilación, logrando detener el movimiento de forma súbita, en un solo ciclo.

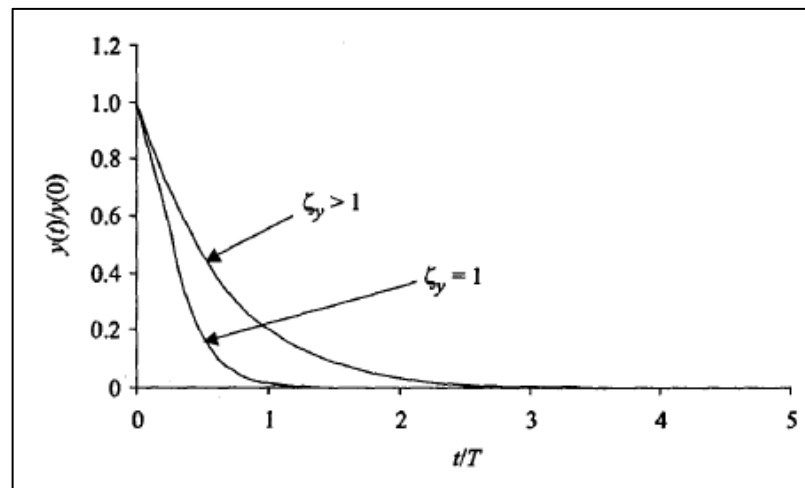
Se concluye entonces que la respuesta de vibración libre de un sistema críticamente amortiguado no muestra ninguna oscilación sobre la posición de deflexión cero, sino que el desplazamiento vuelve rápidamente a cero, dependiendo de su término de decaimiento exponencial.

Cuando el radical es positivo el sistema en estudio trata de un sistema *sobre-amortiguado*, donde la amortiguación del mismo es mayor a la amortiguación crítica. Esto quiere decir que su movimiento, al igual que el crítico, no es oscilatorio y su valor de desplazamiento decrece exponencialmente hasta hacerse cero como lo muestra la curva de  $\xi > 1$  en la Figura 2.10.

Se define entonces a  $\xi$  como la *razón de amortiguación* del sistema, la cual relaciona los valores  $c$  y  $c_{cr}$ , siendo  $c$  la amortiguación del sistema y  $c_{cr}$  amortiguación crítica. Esta relación se expresa en la siguiente ecuación:

$$\xi = c/c_{cr} \quad (2.19)$$

Para  $\xi = 1$  se trata de un sistema *críticamente amortiguado* y cuando  $\xi > 1$  es un *sistema sobre-amortiguado*. En la Figura 2.10 se observan los dos amortiguamientos descritos, diferenciándose el segundo por tener una curva más extensa, lo que significa que al sistema le toma más tiempo para regresar al punto de equilibrio.



**Figura 2.10:** Respuesta de un sistema críticamente amortiguado y sobre-amortiguado. (Fuente: extraída de Bathia, 2008).

Cuando el radical es negativo, se trata de un sistema *sub-amortiguado*, siendo la amortiguación del mismo menor que la amortiguación crítica ( $\xi < 1$ ). Esto representa un movimiento en el cual sí se presenta oscilación, pero la amplitud del movimiento decrece

exponencialmente con el tiempo, hasta hacerse cero, en iguales períodos de tiempo  $T_D$ , como se observa en la Figura 2.11.

Las raíces de la ecuación de movimiento son raíces conjugadas complejas y se resuelven utilizando las ecuaciones de Euler, las cuales relacionan funciones trigonométricas con funciones exponenciales, resultando:

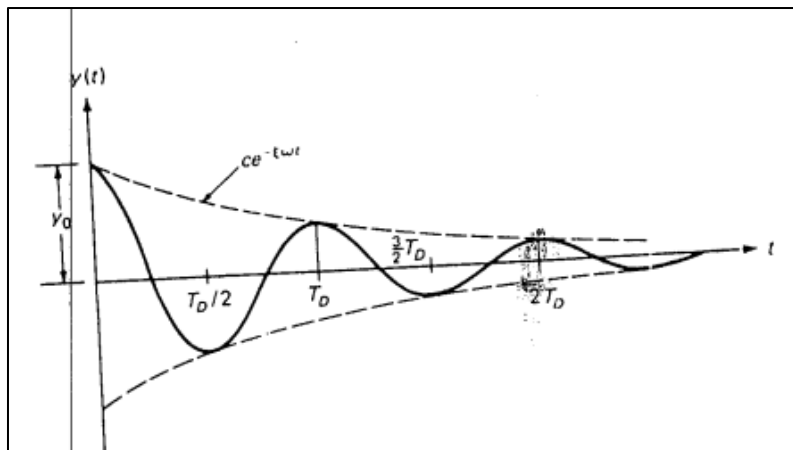
$$y(t) = e^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t} + (A \omega \cos(\omega_D t) - B \omega \sin(\omega_D t)) \quad (2.20)$$

Siendo A y B constantes redefinidas que dependen de las condiciones iniciales del movimiento, y  $\omega_D$  la frecuencia del sistema con amortiguación, que se expresa como:

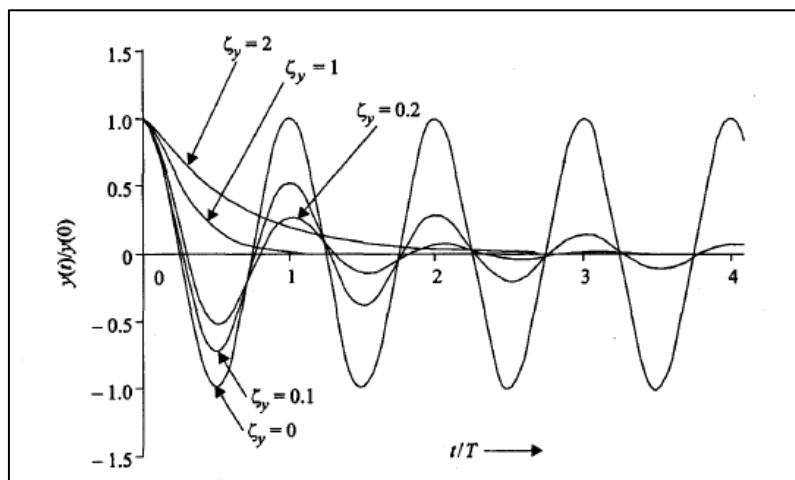
$$\omega_D = \omega \times \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.21)$$

A y B son calculadas a partir del reemplazo por las condiciones iniciales del movimiento  $y_0$  y  $v_0$ , obteniéndose:

$$y(t) = e^{-\xi \omega t} \times \left( y_0 \cos(\omega_D t) + \frac{v_0 + y_0}{\omega_D} \sin(\omega_D t) \right) \quad (2.22)$$



**Figura 2.11:** Vibración libre para un sistema sub-amortiguado (Fuente: extraída de Paz, 1992).



**Figura 2.12:** Vibración libre para sistemas sin amortiguación, sub y sobre amortiguado y críticamente amortiguado. (Fuente: extraída de Bathia, 2008).

Las estructuras reales poseen valores muy pequeños de amortiguación, tratándose de sistemas sub-amortiguados. Normalmente la relación de amortiguación  $\xi$  toma valores de un 2% a 20%. Tomándose un valor de 20%, que corresponde al mayor valor que se puede presentar en una estructura real, y reemplazándolo en la ecuación (2.21), resulta:

$$\omega_D = 0.98\omega \quad (2.23)$$

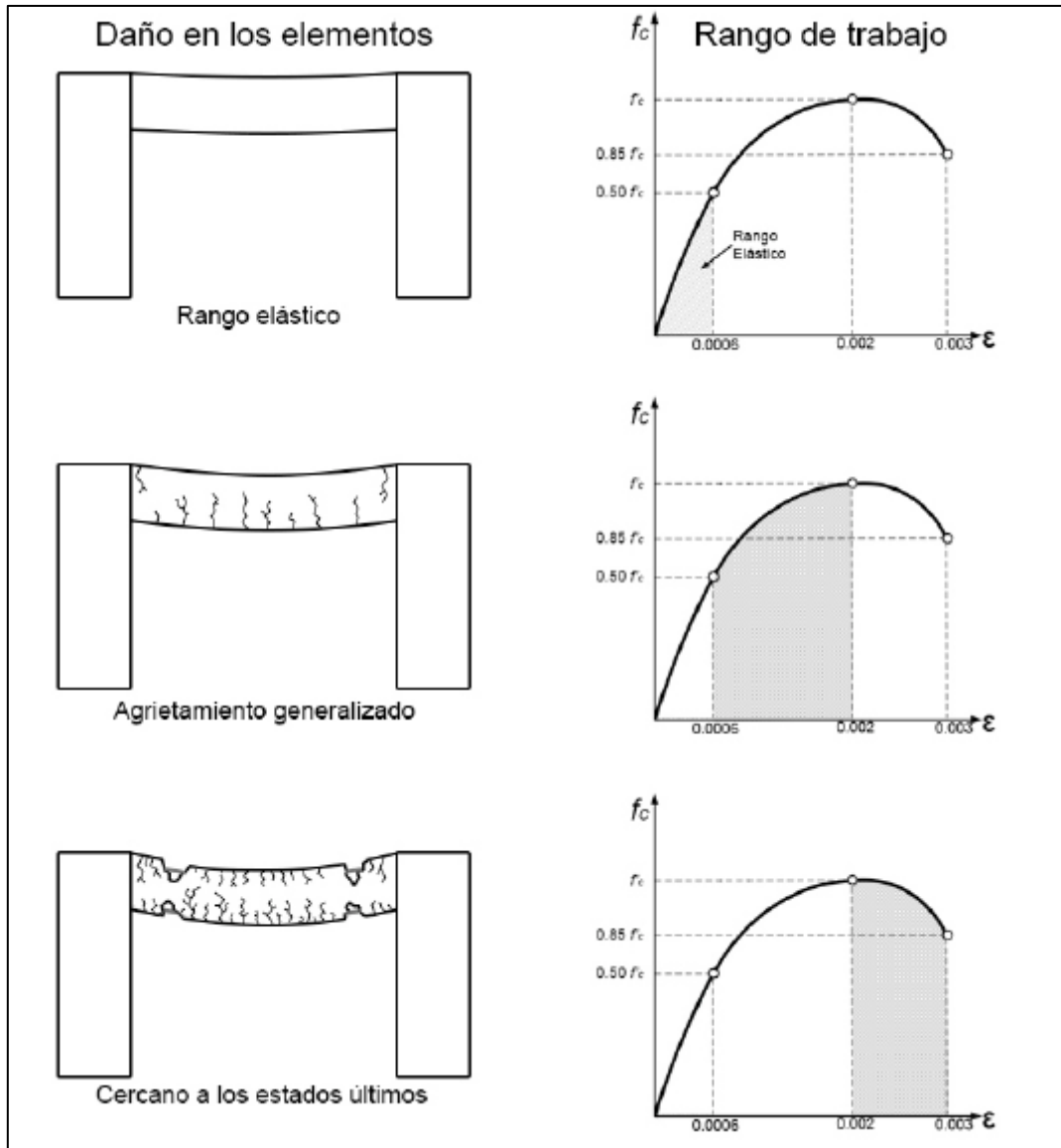
De esta ecuación se desprende una valiosa conclusión: la frecuencia natural amortiguada ( $\omega_D$ ) toma un valor que es aproximadamente igual a la frecuencia natural de un sistema sin amortiguación ( $\omega$ ), justificándose que en estructuras reales se emplee el criterio de tomar como frecuencia natural del sistema a la frecuencia natural del sistema sin amortiguación.

Se debe considerar, además, que la magnitud del amortiguamiento en el diseño de estructuras de hormigón, está condicionado por el daño admisible en los miembros de este material. Esto es debido a que la fricción generada entre las caras de las secciones agrietadas, producirá una transformación de energía cinética en energía térmica y sonora.

En la Tabla 2.1 se indica el nivel de daño en las vigas y dinteles, en función del amortiguamiento asociado a estos miembros. En la Figura 2.13 se ilustran los diferentes niveles de daños asociados al rango de trabajo del miembro de hormigón.

**Tabla 2.1:** Nivel de daño en elementos estructurales en función su de amortiguamiento (Fuente: extraída de Guanchez, 2019, Universidad de Carabobo)

Condición	Fracción de amortiguamiento crítico (%)
Esfuerzos menores a los admisibles, sin agrietamiento visible.	Entre 2 y 3
Agrietamiento generalizado y visible en elementos estructurales.	Entre 3 y 5
Cercano a los estados últimos de agotamiento resistente.	Entre 7 y 10



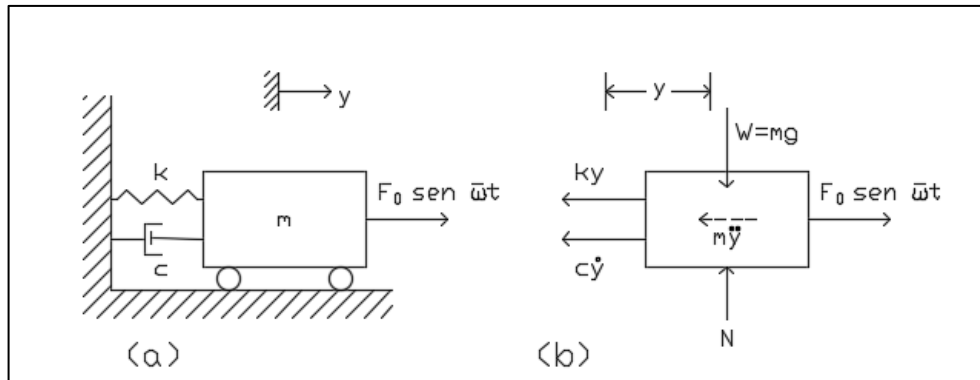
**Figura 2.13:** Niveles de daño en vigas, asociados a amortiguamiento. (Fuente: extraída de Guanchez, 2019, Universidad de Carabobo)

### 2.2.3 Sistema con amortiguación: vibración forzada

Un sistema puesto en movimiento por la aplicación de una excitación dependiente del tiempo, es un sistema que vibra en un estado de vibración forzada. Este es el caso de las cimentaciones de máquinas, las cuales generan una excitación interna a la estructura.

Se aplica al oscilador simple de un solo grado de libertad, una fuerza armónica  $F(t)$  dada por  $F_0 \text{sen}(\tilde{\omega}t)$ , siendo  $\tilde{\omega}$  la frecuencia en [rad/s] y  $F_0$  la amplitud máxima de la fuerza. Se esquematiza en la Figura 2.14 el diagrama de cuerpo libre, y se obtiene la expresión (2.24) a través del equilibrio de fuerzas actuantes sobre el oscilador:

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + k y = F_0 \text{sen}(\tilde{\omega}t) \quad (2.24)$$



**Figura 2.14:** a) Oscilador con amortiguación excitado armónicamente. b) Diagrama de cuerpo libre. (Fuente: adaptada de Paz, 1992)

La ecuación (2.24) hace referencia a una ecuación diferencial no homogénea de segundo orden, por lo tanto, su solución tiene dos componentes: una solución complementaria cuando la ecuación es igual a cero, y una solución particular.

La solución complementaria viene dada por la Ecuación (2.25), para el caso de un sistema sub-amortiguado.

$$y_c(t) = e^{-\varepsilon \omega t} \times (A \cos(\omega_D t) + B \text{ sen}(\omega_D t)) \quad (2.25)$$

La solución particular tiene la siguiente expresión:

$$y_p(t) = C_1 \text{ sen}(\tilde{\omega}t) + C_2 \cos(\tilde{\omega}t) \quad (2.26)$$

Utilizando las relaciones de Euler y operando posteriormente, se halla el valor de la solución particular en la expresión (2.27).

$$y_p = \frac{y_{st} \times \text{sen}(\tilde{\omega}t - \theta)}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\varepsilon r)^2}} \quad (2.27)$$

Siendo:

- $y_{st}$  el desplazamiento o flecha estática del resorte producido por  $F_0$ , si ésta se aplicara muy lentamente;  $y_{st} = F_0/k$
- $\varepsilon$  la razón de amortiguación del sistema;  $\varepsilon = c/c_{cr}$
- $r$  la razón de frecuencias;  $r = \tilde{\omega}/\omega$
- $\tan \theta = 2\varepsilon r / 1 - r^2$

Sumando las ecuaciones (2.25) y (2.27) se obtiene la respuesta total, donde las constantes de integración  $A$  y  $B$  serán calculadas en función de las condiciones iniciales del sistema:

$$y(t) = e^{-\varepsilon \omega t} \times (A \cos(\omega_D t) + B \text{ sen}(\omega_D t)) + \frac{y_{st} \times \text{sen}(\tilde{\omega}t - \theta)}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\varepsilon r)^2}} \quad (2.28)$$



En la ecuación anterior, el primer término es la respuesta transitoria, donde su factor exponencial denota que con el tiempo se hará cero, y el segundo término corresponde a la respuesta del movimiento permanente.

La amplitud del movimiento permanente está dada por:

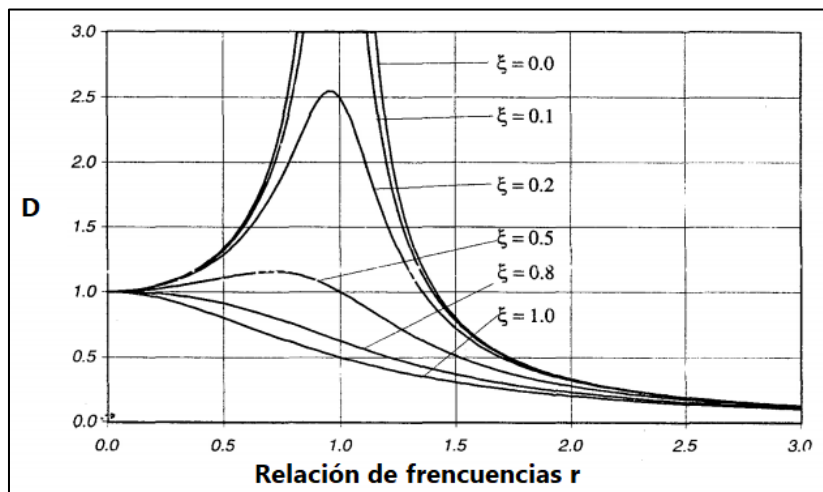
$$Y = \frac{F_0}{\sqrt{(k-m \tilde{\omega})^2 + (c \tilde{\omega})^2}} \quad (2.29)$$

Se define ahora el fenómeno de resonancia, que corresponde a la amplificación dinámica  $D$ , la cual es la razón entre la amplitud del movimiento permanente  $Y$  y la flecha estática del resorte producida por la fuerza armónica  $y_{st}$ :

$$D = \frac{Y}{y_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (2.30)$$

De la ecuación anterior se observa que cuando la razón de amortiguamiento es igual a cero, y la frecuencia del sistema es igual a la frecuencia de la excitación, la relación de frecuencias toma el valor de la unidad, quedando de esta forma el denominador igual a cero, por lo tanto, el valor de la amplificación dinámica  $D$  se hace infinito.

Esto quiere decir que cuando una estructura entra en resonancia, la frecuencia de ella y la frecuencia de la fuerza externa, son iguales, alcanzando valores de amplitudes muy grandes. En la Figura 2.15 se observan las distintas curvas de amplificación dinámica en función de la relación de frecuencias, con distintos valores de la razón de amortiguamiento.



**Figura 2.15:** Curvas de amplificación dinámica en función a la relación de frecuencias. (Fuente: extraída de Paz, 1992)

Cabe destacar que, debido a que los materiales y secciones utilizados en estructuras están diseñados con límites de deformación por resistencia y falla según las normativas vigentes, dichos materiales fallan antes de que se generen altas amplitudes causadas por resonancia, evitando el colapso instantáneo de la estructura.

## CAPÍTULO 3

### DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA Y PROCESO PRODUCTIVO

En el presente capítulo se definirá el principio de funcionamiento y los componentes de una máquina de impacto. Además, se mencionará el proceso de estampado que se realizará en la Empresa, junto con las características de la maquinaria a fundar.

Toda esta información es necesaria para realizar un correcto diseño de la cimentación de la prensa mecánica para forja por estampado a la Empresa Hidráulica San Francisco (HSF).

#### 3.1. GENERALIDADES

A partir del año 1930 aumentó la demanda de elementos estampados en caliente. Es por esta razón que se comenzó a utilizar un criterio diferente al proceso tradicional, el cual consistía en calentar una pieza y golpearla manualmente contra un yunque. Los nuevos procesos se basan en deformar el material de las piezas en caliente, mediante la utilización de prensas mecánicas que ejercen su acción en forma gradualmente creciente.

“La prensa mecánica ofrece la ventaja de realizar un número más elevado de piezas por hora. Se han encontrado datos en los que, gracias al empleo de estas máquinas, se lograron producciones hasta cuatro veces superiores respecto a las realizadas con los martinets”. (Rossi, 1971).

Otra ventaja que poseen estas prensas es la elaboración de piezas con mayor precisión, empleando mano de obra menos calificada, a diferencia de la operación de estampado en martinete, donde se requieren forjadores muy hábiles.

#### 3.2. NOCIONES BÁSICAS SOBRE LA FORJA

El término “forjadura” hace referencia a los diversos procedimientos mediante los cuales se imprime una fuerza a una masa de material metálico previamente calentado. En otras palabras, es el procedimiento de deformación plástica en caliente de los metales, realizado por cualquier medio.

“Un material metálico, previamente calentado a la temperatura de máxima plasticidad y sometido a la acción de fuerzas exteriores gradualmente crecientes o dinámicas, se deforma primero elásticamente y luego permanentemente, adoptando una nueva forma, que puede ser impuesta por un utilaje idóneo, previamente proyectado y calculado.

“Las partículas del material, cual numerosas bolitas, resbalan unas sobre otras, se desplazan y se comprimen, alineándose según un orden geométrico y disponiéndose bajo la forma de fibras, aptas para soportar mayores esfuerzos mecánicos. La deformación se produce en todos los sentidos y a volumen constante: se realiza entonces la fluidez del material”. (Rossi, 1971).

A pesar de ser un método antiguo, producir piezas metálicas mediante forja es un proceso que se sigue utilizando, ya que posee múltiples ventajas, tales como:

- Se obtienen piezas de máxima eficiencia: dichas piezas poseen mínimas dimensiones y máxima resistencia mecánica. Uno de los mejores ejemplos es el de los motores, los cuales están sometidos constantemente a esfuerzos de torsión, flexión, tracción, compresión y sollicitaciones compuestas.

- Economía del proceso: los elementos estampados en caliente poseen un sobrematerial mínimo sobre las superficies que se han de trabajar, facilitando el posterior mecanizado. En consecuencia, se consume menos horas de trabajo y desgaste de herramientas, al arrancar menor material.
- Ventajas técnicas: al obtenerse piezas que presentan una forma con dimensiones y sobrematerial constantes, se puede planificar la producción, y su posterior mecanizado de una manera más eficiente.

### 3.3. PROCEDIMIENTOS INDUSTRIALES DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN CALIENTE

Existen cinco procedimientos industriales para realizar la forja:

- Forjadura: este tipo de forja no se considera como un procedimiento rentable para la producción en serie, ya que requiere de mano de obra extremadamente calificada, al transformar lingotes de metal en objetos con formas complejas según un diseño. Aún si se utilizaran utilajes auxiliares, como martinets, seguiría siendo una forja libre, ya que el material tiene la posibilidad de fluir libremente sin estar vinculado a paredes cerradas.
- Estampado: este proceso se diferencia de la forja por el utilaje especial que emplea. El mismo es del tipo estampa, por lo que el material se deforma plásticamente en caliente en él y adopta su forma por la acción indirecta de la masa. Se obtiene entonces una pieza de forma bien definida, con dimensiones constantes y una superficie aproximadamente lisa y uniforme. Este tipo de proceso se ampliará en los siguientes párrafos del presente Capítulo, por tratarse del proceso empleado de la prensa a fundar.
- Recalcado: consiste en una operación de transformación mecánica, en la cual un trozo cilíndrico de barra aumenta su diámetro y reduce su longitud. Este tipo de proceso se utiliza en la industria de los sujetadores para formar cabezas de clavos, pernos y productos similares de ferretería.
- Electrorrecalcado: se utilizan máquinas electrorrecalcadoras. Este proceso difiere del resto, ya que el material no se calienta previamente, sino que alcanza la temperatura de forjado en la misma máquina.
- Extrusión: operación en la que se obliga al material caliente a fluir a través de las aberturas de paso previamente dispuestas.

### 3.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ESTAMPADO

Como se mencionó anteriormente, el estampado es un tipo de proceso por el cual se somete a un metal a una carga de compresión entre dos moldes de acero, denominados matrices o estampas, que puede realizarse en caliente o en frío.

La operación de estampado puede ejecutarse mediante la utilización de dos tipos de máquinas: del tipo martinete (en donde intervienen fuerzas dinámicas de uno o varios golpes, según la magnitud de la deformación a realizar y a la forma de la pieza) o del tipo prensa (en este caso, la pieza se obtiene por la acción de una fuerza estática que actúa durante más tiempo sobre la estampa).

Algunos ejemplos de piezas obtenidas son: llaves fijas, bielas de motores de combustión interna, ganchos, y asociados al presente Proyecto Final, codos a 45° y 90°, acoples tipo "T" y tipo cruz.

Para el caso del presente Proyecto Final, se considera un proceso de deformación plástica realizado en caliente, utilizando una prensa mecánica. Las operaciones que comprenderán el proceso de estampado para la forja de codos que adoptará HSF son las siguientes:

- Corte de material: Se cortan barras redondas laminadas de calidad SAE 1045 a una medida delimitada para cada tipo de codo, determinado por el área de Ingeniería de Procesos de la Empresa. De esta manera, se obtienen “tochos” los cuales hacen referencia a los recortes de las barras.
- Doblado del tocho: Para realizar este paso, se utilizan matrices de curvado que consisten en una hembra y un macho en forma de “V” que se colocan en la prensa, en donde se obtiene un tocho doblado a 45° o 90°, según especificaciones. Este proceso es realizado en frío.
- Calentamiento del tocho: se calienta el tocho previamente doblado, en un horno tipo mufla a una temperatura aproximada de 900°C.
- Conformado del codo: se coloca el tocho caliente en la matriz inferior, y se la golpea con la matriz superior. En este proceso, el material fluye en forma restringida, tomando la forma de ella. Este paso se puede repetir una o dos veces, en donde la cantidad de golpes es proporcional a la geometría del codo a realizar. A modo comparativo, no es lo mismo forjar un codo de diámetro 23 [mm] que un codo de diámetro 44 [mm].
- Rebabado: consiste en eliminar el material sobrante producto del conformado. Es un proceso realizado en frío, utilizando una máquina tipo balancín, con dos matrices (una hembra y un macho), encargados del corte de la rebaba.

### 3.5. DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA A CIMENTAR

Para el correcto diseño del cimiento de la prensa mecánica, diversos autores sugieren, en forma general, disponer de la siguiente información:

1. Componentes y configuración geométrica de la prensa.
2. Ubicación del centro de gravedad, en dirección horizontal y vertical.
3. Rangos de velocidad del equipo. Cargas estáticas de la máquina: suma de las masas de las partes estacionarias y giratorias.
4. Cargas dinámicas: generadas por la máquina o transferidas a la prensa por otras máquinas próximas a ella.
5. Fuerzas adicionales, si es que las hay, en condiciones de emergencia o falla de la prensa.

A continuación, se desarrollarán los principales ítems en forma teórica.

#### 3.5.1. Componentes de una prensa mecánica

Una prensa a fricción está compuesta por 11 elementos principales. Se listan en un orden que facilita la comprensión del principio de funcionamiento de dicha máquina.

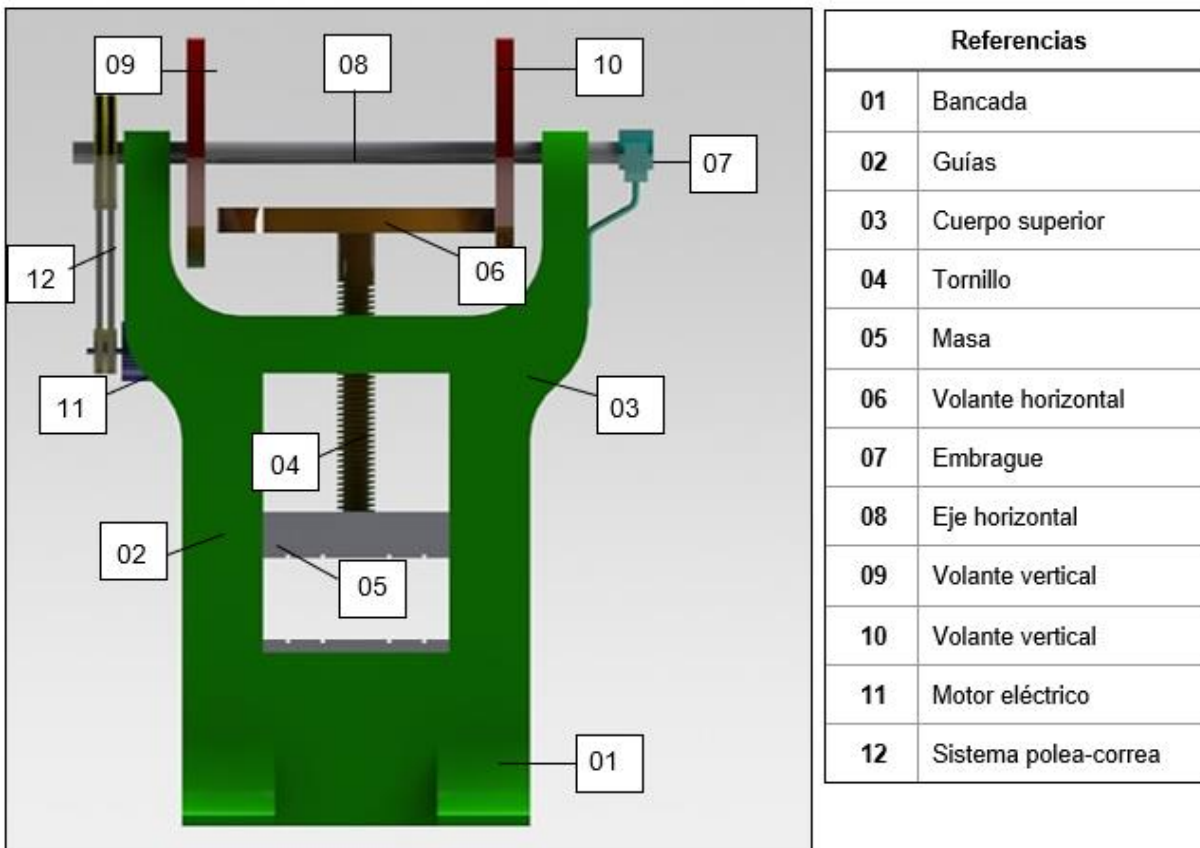
- Bancada o yunque: **(01)** corresponde al basamento de la máquina. Integrada a esta bancada, posee dos guías, donde se fija una de las matrices de forja.
- Cuerpo superior o marco: **(03)** contiene las guías **(02)** que posibilitan un único grado de libertad de la masa, el cual consiste en una traslación vertical.

- Masa: **(05)** es la vinculación entre el tornillo con la matriz superior.
- Tornillo: **(04)** es el encargado de transformar el movimiento giratorio de su eje vertical en una traslación vertical de la masa, a través de una rosca interna soportada por el cuerpo superior. Cuando el tornillo gira en sentido horario, la masa baja (sin girar, al estar vinculada a dicho tornillo), y cuando se invierte el sentido de giro, la masa sube. La dirección del sentido de giro se da a través de los volantes.
- Volantes: la prensa posee 3 volantes **(06, 09, 10)**. Dos de ellos giran con igual sentido, en torno a un eje horizontal **(08)**, el cual puede desplazarse horizontalmente, a través del embrague **(07)**. Un tercer eje, asociado al tornillo puede girar en torno al eje de dicho tornillo.

Se pueden presentar dos situaciones:

La primera situación ocurre cuando el eje horizontal se desplaza hacia un lado, "saliendo" de su posición de equilibrio. En ese instante, uno de los volantes del eje horizontal entra en contacto con el tercer volante **(06)**, provocándole a éste un movimiento de giro en un sentido, el cual se ve reflejado en el desplazamiento vertical de la masa. En contraposición, en la segunda situación el eje horizontal se desplaza hacia la otra dirección, por lo que provoca un movimiento de giro en sentido opuesto. Estas transmisiones de giros se generan por la fricción entre los volantes en contacto, lo que da origen al nombre de la máquina.

- Motor eléctrico: **(11)** encargado de generar el movimiento giratorio y transmitirlo al eje horizontal, a través de un sistema polea-correa **(12)**.



**Figura 3.1:** Componentes de prensa mecánica (Fuente: elaboración propia)

### 3.5.2. Configuración geométrica de la prensa

En la Tabla 3.1 se exponen las principales características geométricas de la prensa a fricción elegida para diseñar su fundación.

**Tabla 3.1:** Características geométricas de la prensa elegida. (Fuente: elaboración propia)

Información general		Características de operación		
<i>Equipo</i>	Prensa a fricción	<i>Peso</i>	18	ton
<i>Fabricante</i>	Stanko	<i>Fuerza presión máxima</i>	250	ton
<i>Empresa</i>	Maszyneria	<i>N° máx de golpes/min</i>	34	golpes/min
<i>Modelo</i>	F1734	<i>Energía efectiva mínima</i>	1250	kgcm
<i>Origen</i>	Rusia	<i>Potencia requerida total</i>	36	kW
<i>Año</i>	1985	<i>Carrera máxima de deslizamiento</i>	350	mm

Características geométricas				
Dimensiones máximas			Tamaño de bancada	
<i>Ancho</i>	3710	mm	<i>Derecha a izquierda</i>	670 mm
<i>Longitud</i>	1925	mm	<i>Frente hacia atrás</i>	750 mm
<i>Altura</i>	4450	mm	<i>Mínima distancia entre masa y bancada</i>	420 mm

### 3.5.3. Análisis de cargas estáticas

A continuación, se detallarán en forma general los tipos de cargas que actúan en una fundación de maquinaria. Posteriormente se analizarán cuáles son de aplicación en el diseño del presente Proyecto Final.

- Cargas muertas o permanentes: hacen referencia a las cargas gravitacionales debidas al peso del equipo, equipos auxiliares, tuberías y válvulas. El peso de los componentes del equipo es suministrado por el fabricante.
- Cargas vivas: producidas por el personal, herramientas, equipo de mantenimiento y materiales. Se consideran uniformemente distribuidas sobre las áreas de pisos o plataformas, o en áreas de acceso en los alrededores de la cimentación. El valor de estas cargas oscila entre 300 [kgf/m<sup>2</sup>] para personal hasta 1.200 [kgf/m<sup>2</sup>] para equipo de mantenimiento y materiales.
- Cargas normales de operación: hace referencia a torques que pueden desarrollarse por ciertas máquinas en la unión entre el mecanismo que produce el impulso y la maquinaria impulsada. Este es el caso de turbo-generadores, en donde el acople entre el rotor y el estator del generador pueden producir un torque igual en magnitud y en dirección opuesta a la máquina impulsada. Otros ejemplos de cargas de operación son: cargas por incremento térmico, cargas de vacío en condensadores, cargas de empuje axial y cargas de tuberías.
- Cargas especiales para cimentaciones: el Reporte ACI-351 recomienda considerar estas cargas en caso de contar con grandes máquinas y como método de control para limitar las deflexiones y las tensiones generadas. En caso de que no se proporcione información adecuada por parte del fabricante, diversos autores recomiendan utilizar las siguientes fuerzas, que son aditivas a las cargas gravitacionales:
  - Fuerza vertical, equivalente al 50% del peso total de la máquina.
  - Fuerza horizontal, en dirección transversal, equivalente al 25% del peso total de la máquina.

- Fuerza horizontal, en dirección longitudinal, equivalente al 10% del peso total de la máquina.

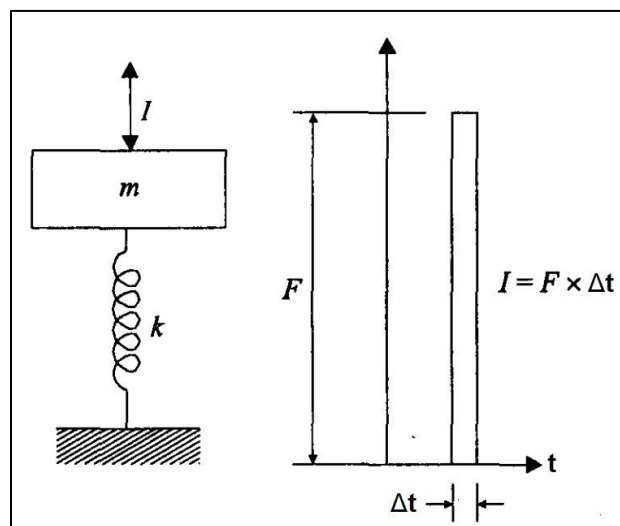
Estas fuerzas actúan en el baricentro del equipo, sin hacerlo simultáneamente. Son empleadas por el Reporte ACI-351 como coeficientes de mayorización o factores de seguridad, cuando no se cuenta con suficiente información de la máquina a cimentar.

- Cargas de construcción y mantenimiento: hace referencia a las cargas de levantamiento e instalación, pruebas hidrostáticas, o a cargas temporales que intervienen durante el proceso de instalación o mantenimiento del equipo. El ACI-351 recomienda como guía para estimar el efecto de cargas de construcción el Código ASCE/SEI 37.
- Cargas catastróficas de maquinaria: originadas por el mal funcionamiento del equipo, tales como cortocircuitos en el generador, desalineación o rotores arqueados en turbinas de vapor. Estas cargas están orientadas a equipos cuyos desperfectos produzcan consecuencias graves a la planta donde está emplazada, o a la población en general. Generalmente no se combinan con cargas sísmicas, por razones del tipo probabilístico.

### 3.5.4. Estimación de cargas dinámicas

Las prensas de forja utilizan una clase especial de fuerza dinámica, denominada carga impulsiva, la cual consiste en un único impulso de corta duración. El modo de operación de la prensa consiste en producir estos impulsos, aplicados como golpes repetidos a una frecuencia de operación  $\omega_o$ .

Para estas máquinas, la respuesta dinámica depende tanto de la fuerza de excitación dinámica como de su frecuencia. Por lo tanto, para el cálculo de amplitudes, es necesario considerar la frecuencia de impacto, es decir, el número de golpes por minuto que produce la máquina. La fuerza dinámica corresponde a la carga de impulso  $I$ , como se muestra en la Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Sistema sujeto a una carga impulsiva. (Fuente: extraída de Bathia, 2008)

Para conceptualizar la definición de impulso, se procederá a derivar la segunda Ley de Newton (Ec. 2.1 del Capítulo 2).

$$F = m \times \frac{dv}{dt} = mv \times \frac{d}{dt} \quad (3.1)$$

De esta forma, la segunda ley de Newton expresa que la fuerza neta que actúa sobre una partícula, es igual a la rapidez de cambio del producto de la masa por la velocidad de la partícula. Se llama a esta combinación, momento lineal o *momentum* de la partícula, el cual se representa con el símbolo  $\rho$ :

$$\rho = m \times v \quad (3.2)$$

La ecuación (3.2) indica que, a mayor masa y rapidez de una partícula, mayor magnitud de su momento lineal. Este momento es una cantidad vectorial que posee la misma dirección que la velocidad de la partícula.

Si se considera una partícula sobre la que actúa una fuerza neta constante durante un tiempo  $\Delta t$ , de  $t_1$  a  $t_2$ , el impulso de la fuerza neta, denotado con  $I$ , se define como el producto de la fuerza neta por el intervalo de tiempo:

$$I = F \times \Delta t \quad (3.3)$$

Si se analiza la ecuación anterior, se puede reescribir como:

$$I = (\rho_2 - \rho_1) \quad (3.4)$$

Lo que significa que el cambio del momento lineal de una partícula durante un intervalo de tiempo es igual al impulso de la fuerza neta que actúa sobre la partícula durante ese intervalo.

Dicho enunciado se cumple cuando la fuerza no es constante, por lo que este fundamento es relevante en el presente Proyecto Final. A continuación, se integran ambos miembros la segunda ley de Newton, entre los límites  $t_1$  a  $t_2$ :

$$\int_{t_1}^{t_2} F(dt) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\rho}{dt} (dt) = \int_{\rho_1}^{\rho_2} d\rho = \rho_2 - \rho_1 \quad (3.5)$$

La integral de la izquierda es, por definición, el impulso de la fuerza neta durante este intervalo, lo que resulta:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F (dt) \quad (3.6)$$

Relacionando la expresión (3.6) con el presente Proyecto Final, la fuerza dinámica aplicada se modela como un impulso dado por:

$$I = \int_0^T F (dt) \quad (3.7)$$

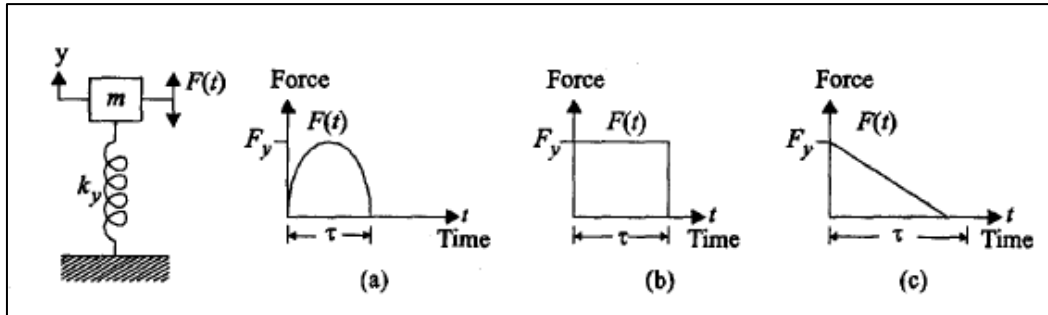
Donde finalmente se obtiene:

$$I = F \times \tau \quad (3.8)$$



Esta carga impulsiva  $F(t)$  se aplica a la masa, es decir, el pulso aplicado tiene una amplitud de fuerza máxima de  $F_y$  y una duración de pulso  $\tau$ , en donde:

$$\tau = \frac{\pi}{\omega} \quad (3.9)$$



**Figura 3.3:** Diversos pulsos de corta duración. (a) Pulso sinusoidal. (b) Pulso rectangular. (c) Pulso triangular. (Fuente: extraída de Bathia, 2008)

En el caso de que el fabricante del equipo dinámico no provea un historial de datos de variación de la fuerza en el tiempo, el impulso puede estimarse como:

$$I = m_o \times v'_o \text{ [Ns]} \quad (3.10)$$

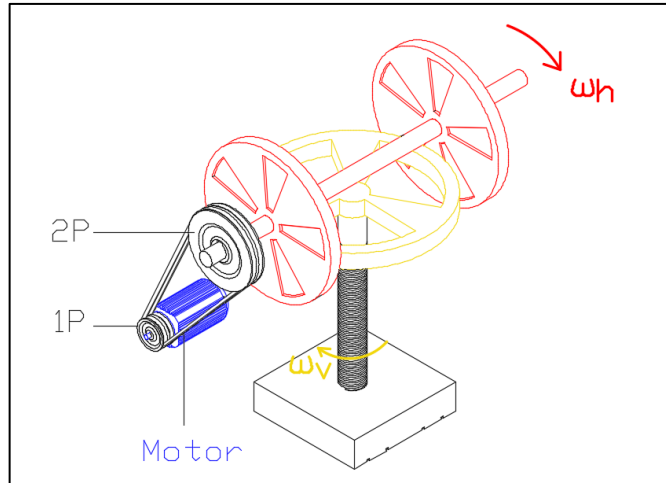
Si se analiza la Figura 3.2 y la ecuación (3.10), se concluye que la carga impulsiva puede ser modelada como una masa  $m_o$  que cae desde una altura  $h$ , en caída libre, donde  $v'_o$  hace referencia a la velocidad antes del impacto de dicha masa  $m_o$ , como lo expresa la ecuación (3.11):

$$v'_o = \sqrt{2 \times g \times h} \quad (3.11)$$

Producto del análisis de la ecuación (3.11), se decide no considerar el valor de la aceleración de la gravedad “ $g$ ” y utilizar, en cambio, una aceleración “ $a$ ” propia de las características de funcionamiento de una prensa a fricción. La fundamentación de esta elección se justificará a continuación.

Como se estudió a lo largo de este Capítulo, el marco de la prensa posee guías que permiten desplazar verticalmente la masa solidaria al tornillo. Este tornillo se desplaza a través de un paso de varios milímetros a una velocidad determinada, que al impactar transfiere su energía cinética al resto de los componentes del equipo, incluida la cimentación.

Para calcular la aceleración “ $a$ ” se realizará una serie de consideraciones. La primera consideración es el modo de operación de la prensa. Como se analizó en el apartado 3.5.1, el motor eléctrico genera el movimiento giratorio y lo transmite al eje horizontal a través de un sistema polea-correa. Este eje horizontal tendrá entonces una velocidad angular horizontal  $\omega_h$ . Cuando uno de los volantes de dicho eje entra en contacto con el volante del eje vertical, le imprime a éste una velocidad angular vertical  $\omega_v$ . Esta situación se puede observar en la Figura 3.4.



**Figura 3.4:** Modo de operación de una prensa a fricción: velocidades angulares. (Fuente: elaboración propia)

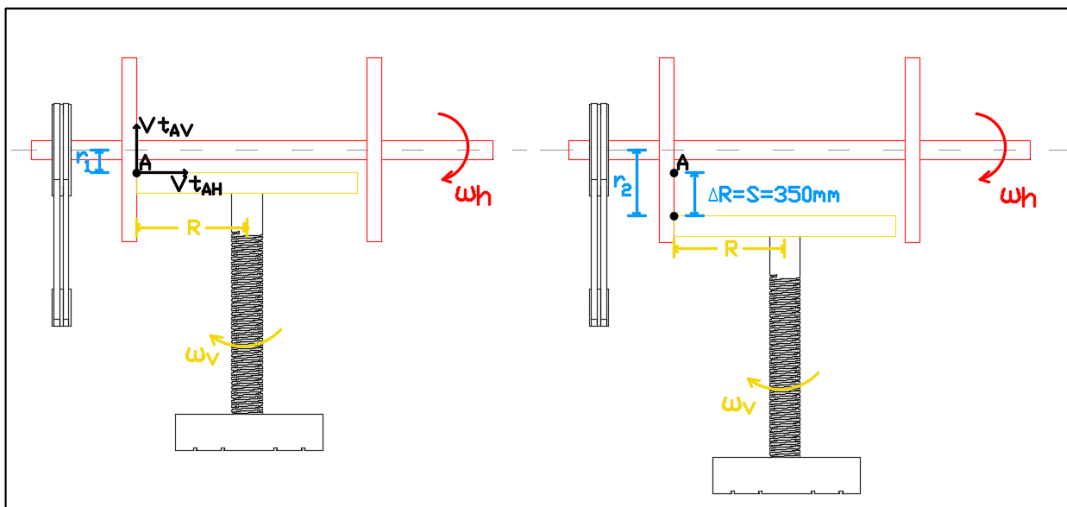
Existe una relación entre ambas velocidades angulares. Debido a que la prensa actúa por fricción, y analizando el punto "A" de la Figura 3.5, se evidencia que en dicho punto de contacto debe existir una igualdad de velocidades tangenciales respecto a los ejes de rotación vertical  $V_{tAV}$  y horizontal  $V_{tAH}$  para asegurar una correcta transmisión de velocidades angulares. Esto es:

$$V_{tAV} = V_{tAH} \quad (3.12)$$

Recordando que la velocidad tangencial es igual al producto de su frecuencia por el radio, reemplazando valores se obtiene que:

$$\omega_v \times R = \omega_h \times r_1 \quad (3.13)$$

De la ecuación (3.13) se deduce una importante conclusión: debido a que, tanto la velocidad angular del eje horizontal  $\omega_h$  como el radio  $R$  (correspondiente al radio del volante horizontal) son valores constantes, para que se cumpla la igualdad de términos de esta ecuación, si el valor de  $r_1$  aumenta, el valor de  $\omega_v$  también debe hacerlo. Lo anterior da como resultado que, a medida que la masa  $m_o$  baja, ésta se acelera, en orden de mantener constante dicha relación de igualdad.



**Figura 3.5:** Modo de operación de una prensa a fricción: punto de contacto "A". (Fuente: elaboración propia)

Analizando la Figura 3.5, esta variación de  $r_1$  a  $r_2$  está influenciada por el paso del tornillo. Si se considera una situación inicial, con un radio  $r_1$ , para un paso de tornillo constante “ $P$ ”, al producirse una vuelta  $\omega_v$ , se pasará de una distancia  $r_1$  a una distancia  $r_2$ , la cual será igual al radio inicial más el paso del tornillo ( $r_1+P$ ). Este aumento, de  $r_1$  a  $r_2$ , provoca que  $\omega_v$  aumente, como se mencionó anteriormente y en la Ec. (3.13). Esto provoca que, a medida que la masa baja, su velocidad angular  $\omega_v$  aumenta uniformemente.

La situación anterior justifica el hecho que, si se mantiene un paso de tornillo constante, al aumentar gradualmente el número de vueltas  $\omega_v$  ocasionado por el cambio en el radio  $r_n$ , la masa se acelera. Se concluye finalmente que el movimiento que describe el proceso de operación de la prensa a fricción corresponde a un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado.

La segunda consideración que se realizará consiste en suponer que la variación del radio  $\Delta R$  (es decir, el cambio de  $r_1$  a  $r_2$  mientras la masa baja) corresponde a la carrera máxima de deslizamiento “ $S$ ”. En otras palabras, el tiempo en que la máquina demora en pasar de un punto muerto superior a un punto muerto inferior recorriendo 350 [mm] es el mismo tiempo en el que cambia el radio de  $r_1$  a  $r_2$ .

La tercera consideración contemplará el cálculo de la velocidad angular del eje horizontal  $\omega_h$ . Como se mencionó anteriormente en el apartado 3.2, este eje posee en uno de sus extremos un sistema polea-correa, conectado a un motor eléctrico. Luego de analizar las prensas mecánicas en el mercado y consultar con ingenieros electromecánicos, se llega a la conclusión de que el número de revoluciones estándar de un motor para dicho equipo es de 1500 [rpm], con una relación de poleas 2:1.

Con esta relación de poleas se utiliza el mismo principio de la Ec. (3.13), para calcular la velocidad angular horizontal  $\omega_h$ , en donde:

$$Vt_{motor} = Vt_{polea} \quad (3.14)$$

Reemplazando por valores conocidos se obtiene que:

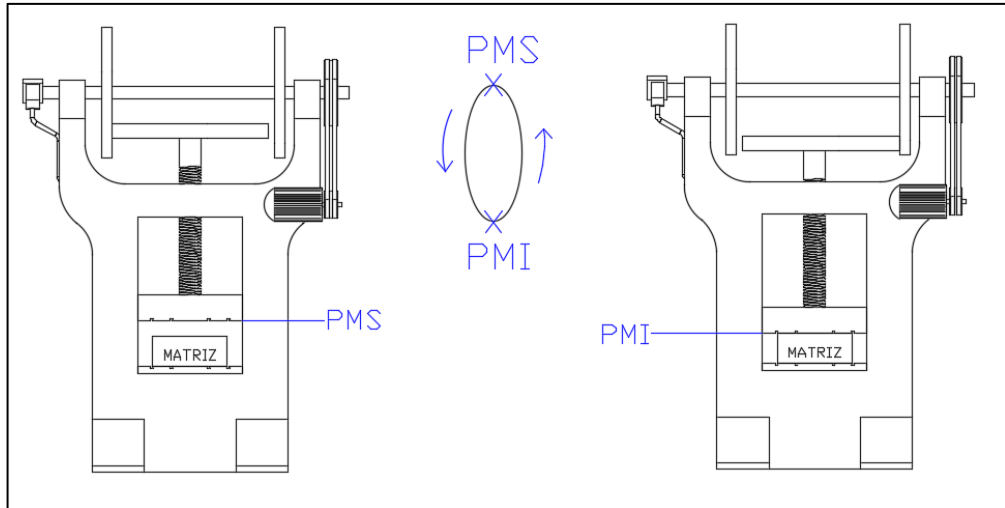
$$\omega_{motor} \times r = \omega_{polea} \times 2r \quad (3.15)$$

La velocidad angular horizontal que se utilizará en los cálculos posteriores posee un valor de:

$$\omega_{polea} = \omega_h = \frac{\omega_{motor}}{2} \rightarrow \omega_h = 750 \text{ rpm} \quad (3.16)$$

Por otra parte, debido a que un ciclo completo comprende la acción en donde la masa  $m_o$  cae, impacta en la pieza y vuelve a subir, se decide considerar medio ciclo de este proceso, es decir, se contemplará únicamente el tiempo  $t$  en que la masa cae e impacta en la pieza a forjar.

Se indica en la Figura 3.6 que el estado inicial de operación ocurre en el punto muerto superior (PMS) en donde la velocidad inicial es cero. A continuación, la masa baja de forma acelerada y golpea la matriz ubicada sobre la bancada, es decir, el punto muerto inferior (PMI) y vuelve a subir.



**Figura 3.6:** Estados de operación de la prensa. (Fuente: elaboración propia)

Todo este ciclo se realiza, acorde a los datos de la Tabla 3.1, 34 veces por minuto. Se considerará medio ciclo, es decir, el recorrido donde la masa baja y golpea a la pieza. Es por ello que se realiza la siguiente deducción:

$$\text{si se realizan 34 golpes en un minuto} \rightarrow 1/2 \text{ golpe tarda } 0,015 \text{ min} \rightarrow t = 0,9 \text{ s} \quad (3.17)$$

Aplicando la ecuación de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, considerando que la velocidad inicial es cero (PMS), se obtiene:

$$y_f = y_o + v_o \times t + \frac{1}{2} \times a \times t^2 \quad (3.18)$$

Reescribiendo la ecuación y reemplazando por los valores obtenidos, el valor de la aceleración es:

$$a = \frac{y_f - y_o}{\frac{1}{2} \times t^2} \rightarrow a = \frac{S}{0,5 t^2} \rightarrow a = 864 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2} = 0,86 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (3.19)$$

Con el valor calculado de la aceleración, y considerando que la altura de caída  $h$  es la carrera máxima del tornillo  $S$ , se reemplaza en la ecuación (3.11) y se obtiene la velocidad de caída:

$$v_o' = \sqrt{2 \times a \times S} \rightarrow v_o' = 0,78 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.20)$$

Para poder utilizar la Ec. (3.10), primero se debe calcular el valor de la masa  $m_o$ . Se considera que esta masa que impacta sobre el tocho a forjar es la sumatoria de la masa propia del tornillo más la masa de la matriz superior. A falta de datos específicos, se considera que generalmente dicha matriz superior posee las mismas dimensiones de la bancada. Conociéndose el valor del peso específico del acero, se calcula la masa total de la siguiente forma:

$$m_o = \text{masa del tornillo} + \text{masa matriz} \quad (3.21)$$

$$m_o = (\gamma_{ac} \times \frac{\pi \times D^2}{4} \times L_l) + (\gamma_{ac} \times L_b \times B_b \times H_b)$$

$$m_o = 1.255,9 \text{ [kg]}$$

A continuación, se reemplaza el valor obtenido de  $m_o$  y  $v_o'$  en la ecuación (3.10) y se obtiene el valor del impulso  $I$ :

$$I = m_o \times v_o' \rightarrow I = 979,6 \left[ \frac{\text{kg} \times \text{m}}{\text{s}} \right] \quad (3.22)$$

Por último, para obtener el valor de la fuerza dinámica  $F$ , se utilizará la expresión tomada del libro *"Foundation for Industrial Machines, K. Batia, 2008"*, en donde se relaciona dicho impulso con la frecuencia natural del sistema,  $\omega$ . Recordando del Capítulo 2, la ecuación (2.12) enuncia que esta frecuencia es igual a:

$$\omega = \sqrt{\frac{ky}{m}} \text{ [rad/s]} \quad (3.23)$$

Una vez conocido el valor de esta frecuencia, acción de cálculo que se realizará en el Capítulo 5, se obtiene fácilmente el valor de la fuerza dinámica debido al impulso:

$$F = I \times \omega \text{ [N]} \quad (3.24)$$

## CAPÍTULO 4

# PROPIEDADES DEL SUELO PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES DE EQUIPOS VIBRATORIOS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Como se mencionó oportunamente en los capítulos anteriores, toda estructura se encuentra soportada por algún tipo de cimentación, ya sea superficial o profunda. A su vez, estas cargas sumadas al peso propio del cimiento, son transmitidas hacia el suelo o roca subyacente. En consecuencia, las tensiones del suelo resultantes se suman a las que existen actualmente en la masa terrestre, debidos a su peso propio y su historia geológica.

En referencia a la selección del tipo de cimentación a realizar para una estructura, la misma depende de factores como: función de la cimentación, cargas que debe soportar y condiciones de subsuelo, en adición a factores económicos. En relación a este capítulo, las condiciones del subsuelo se determinan a partir de su exploración, la cual consiste en un proceso de identificación de las capas de depósitos que subyacen a la fundación propuesta y obtención de las características de dichas capas.

La información que se obtenga del estudio de suelos permitirá resolver distintos aspectos del proyecto a ejecutar, como ser: selección del tipo y profundidad de cimentación, profundidad del nivel freático, capacidad de carga de la fundación, asentamiento probable, determinación de suelos expansivos, entre otros.

A modo de introducción, a partir de 1925 con la publicación del libro “Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage” (“*Mecánica de movimiento de tierras en física del suelo*”) de Karl Terzaghi se dio inicio a la disciplina de Mecánica de Suelos dentro de la Ingeniería Civil, lo que condujo a un rápido progreso de estudios teóricos y experimentales. La mayoría de estos estudios se enfocaron a la determinación del comportamiento del suelo en condiciones de carga estática.

Sin embargo, hace tan sólo 50 años que comenzó el estudio en profundidad de la dinámica de suelos, debido a diversos factores como: aparición de nuevos tipos de maquinaria, actividad minera, requisitos de defensa y acciones sísmicas, de viento y de olas en estructuras.

Como se verá a continuación, mientras que la estática del suelo “es la aplicación de la ciencia física que se ocupa del estudio de las propiedades físicas del suelo y el comportamiento de las masas de suelos sometidos a diferentes tipos de fuerzas” (Braja Das, 2015), la dinámica del suelo es la rama de la mecánica del suelo que se ocupa del comportamiento del mismo bajo carga dinámica.

A fin de obtener análisis racionales y procedimientos de diseño para estos problemas, se debe tener una noción del comportamiento del suelo bajo condiciones de carga tanto estáticas como dinámicas. Es por ello que, para elaborar un diseño satisfactorio de una base de un equipo vibratorio, es de vital importancia un análisis dinámico del suelo. Por esta razón, en el presente Capítulo se describirán las propiedades mecánicas estáticas y dinámicas del suelo que permitirán el posterior modelado de la estructura del suelo, para el diseño de la cimentación para una prensa mecánica de 250 toneladas de impacto.

## 4.2. MECÁNICA ESTÁTICA DE SUELOS

La palabra *suelo* hace referencia a un material heterogéneo que contiene partículas orgánicas e inorgánicas con una organización definida, y posee propiedades que varían según la dirección de estudio. Puede definirse como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta en partículas sólidas, con gas y agua en los espacios vacíos.

En el presente Proyecto Final, el suelo será utilizado como cimiento, por lo tanto, es muy importante el estudio de la forma del apoyo, la transmisión de cargas de la estructura al suelo, el estudio de su deformabilidad y la resistencia de éste.

Dentro de la mecánica de suelos convencional, el objetivo principal es establecer las características físicas del suelo, para determinar si el suelo a fundar se encuentra en condiciones para recibir la fundación y transmitir de manera segura las cargas que vienen de ella.

### 4.2.1. Origen del suelo

Cada depósito de suelo presenta características geo-mecánicas únicas que dependen de su origen. La primera fase del origen del suelo es la erosión de las rocas, que puede ser física o química.

La erosión física trata de la reducción de la roca a fragmentos progresivamente más pequeños, sin alterar sus características químicas. Los agentes que intervienen en este proceso son el agua, el aire, la temperatura y actúan solos o en combinación. Este tipo de proceso genera suelos granulares, como lo son gravas, arenas y limos.

Por otra parte, la erosión química consiste en procesos de hidratación, hidrólisis, oxidación o disolución, que dan como resultado suelos de diferente composición química que la de la roca original. Dentro de este grupo, se destaca el proceso de hidrólisis de los silicatos, mediante el cual se generan las arcillas y en consecuencia, se obtienen sus características plásticas.

Una vez que se ha formado el suelo mediante el proceso de erosión, se pueden presentar dos situaciones: depositarse en el lugar donde se formó o ser transportado y sedimentado hacia otros lugares. Debido a esto, se generan dos tipos de suelos: suelos residuales, los cuales hacen referencia a suelos que no sufren transporte y preservan características de la roca de origen, y suelos transportados.

Tanto los suelos sedimentados como los transportados dependen de un medio o agente de transporte los cuales, a su vez, pueden actuar solos o combinados. A continuación, se clasifican los tipos de suelos generados según el agente de transporte:

- Suelo aluvial o fluvial: depósito de suelos generados por corrientes de agua.
- Suelo glacial: depósitos de suelos generados por la acción de glaciares.
- Suelo eólico: depósitos de suelos generados por el viento, son suelos de tipo loess y médanos.
- Suelo coluvial: depósitos de suelos generados por el transporte por gravedad, en la ladera de las montañas.

Según el medio de transporte se obtienen distintos tamaños y distribución de partículas del suelo, al igual que la forma y textura de las mismas. Por ejemplo, los suelos eólicos son suelos uniformes, mientras que los aluviales son suelos que presentan más heterogeneidad en sus tamaños.

Posteriormente a las fases descritas, en los suelos pueden producirse una serie de procesos secundarios que modifican las propiedades del mismo, siendo los más importantes el proceso de consolidación y el de cementación.

El proceso de consolidación consiste en el acercamiento de las partículas del suelo debido a las cargas a las que están sometidas, a lo largo del tiempo. Esto genera un aumento de la compacidad y de consistencia en el depósito. El proceso de consolidación clasifica a los suelos en suelos sobreconsolidados, los cuales son suelos que han sido sometidos a presiones mayores a las que actualmente actúan sobre él, o en suelos normalmente consolidados.

Por otra parte, el proceso de cementación es un proceso que le brinda mayor cohesión al suelo, donde el agente cementante, que normalmente son carbonatos, permite la unión de partículas de diferentes tamaños. Este proceso le otorga al suelo mayor resistencia al esfuerzo cortante.

#### 4.2.2. Tipos de suelos

Las partículas que conforman el suelo varían en un amplio rango de tamaños y permiten la clasificación de ellos en suelos gruesos y suelos finos.

Los suelos gruesos hacen referencia a gravas y arenas. Su principal característica es su granulometría o la distribución de sus granos, la cual revela las características físicas y mecánicas del suelo. Los suelos finos son los limos y las arcillas, y sus propiedades mecánicas e hidráulicas dependen de la estructura de las partículas, la capacidad de adsorción de agua y de su historia geológica. En la Tabla 4.1 se muestra la clasificación de los suelos según el tamaño de partículas.

**Tabla 4.1:** Escala de tamaños de partículas de suelo (Fuente: extraída de Bathia, 2008)

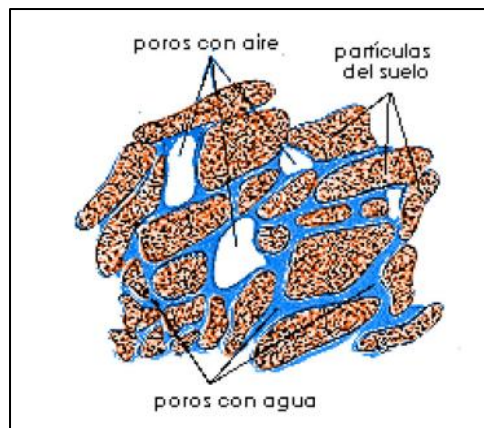
Denominación	Tamaño (mm)	
	60	
GRAVA (G)	Gruesa	20
	Media	6
	Fina	2
ARENA (S)	Gruesa	0.6
	Media	0.2
	Fina	0.06
LIMO (M)	Grueso	0.02
	Media	0.006
	Fina	0.002
ARCILLA (C)		



### 4.2.3. Partes constituyentes del suelo

El suelo está formado por tres fases: sólida, líquida y gaseosa, como se observa en la Figura 4.1. La fase sólida está formada por las partículas minerales del suelo y se considera también el agua adsorbida; la fase líquida está constituida por el agua libre y la fase gaseosa principalmente es aire. Estas dos últimas fases en conjunto comprenden el volumen de vacíos, mientras que la fase sólida, el volumen de sólidos.

Cuando los vacíos se encuentran ocupados en su totalidad por agua, el suelo se encuentra totalmente saturado, caso contrario, si los vacíos están ocupados por aire, se encuentra totalmente seco. Un suelo parcialmente saturado o parcialmente seco, es un caso intermedio, y se presenta cuando los poros están ocupados por agua y aire.



**Figura 4.1:** Partes constituyentes del suelo. (Fuente: extraída de Brady, 1984)

Las relaciones entre las fases, los volúmenes y pesos, permiten obtener las propiedades de los suelos. Se describirán brevemente las relaciones que son de interés para el diseño de una cimentación.

#### Relaciones volumétricas

- **Índice de vacíos ( $e$ ):** es la relación entre el volumen de vacíos  $V_v$  y el volumen de sólidos  $V_s$ , de una masa de suelo. Se expresa en decimal y es una medida de la compresibilidad del suelo.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (4.1)$$

- **Porosidad ( $n$ ):** es la relación entre el volumen de vacíos  $V_v$ , sin tomar en cuenta el aire o agua que los ocupan, y el volumen total  $V$ , de una masa de suelo. Se expresa en porcentaje o en decimal.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (4.2)$$

- **Grado de saturación (%S):** es la relación del volumen de agua  $V_w$  y el volumen de vacíos  $V_v$ . Indica el porcentaje del volumen de vacíos que están llenos de agua.

$$\%S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (4.3)$$

### Relaciones gravimétricas

- **Peso específico o unitario  $\gamma$ :** es la relación entre la masa del suelo y el volumen que ocupa.

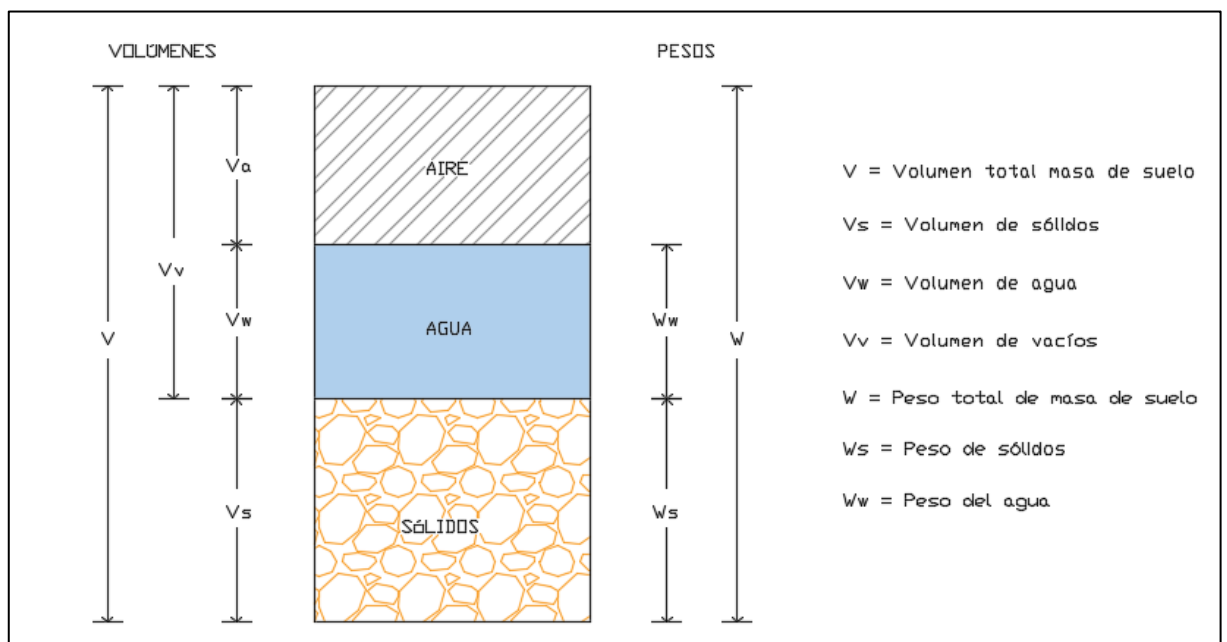
$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (4.4)$$

- **Humedad (%H):** es la relación entre el peso del agua contenida en el suelo, y el peso de los sólidos, de la masa del suelo.

$$\%H = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (4.5)$$

- **Gravedad específica:** es la comparación entre peso unitario de la fase sólida de la masa del suelo y el peso específico del agua  $\gamma_w$ . Es un valor adimensional comprendido entre 2,50 y 2,70.

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \times \gamma_w} \quad (4.6)$$



**Figura 4.2:** Relaciones y partes constituyentes del suelo. (Fuente: adaptada de Braja Das, 2015)

#### 4.2.4. Parámetros de identificación de suelos

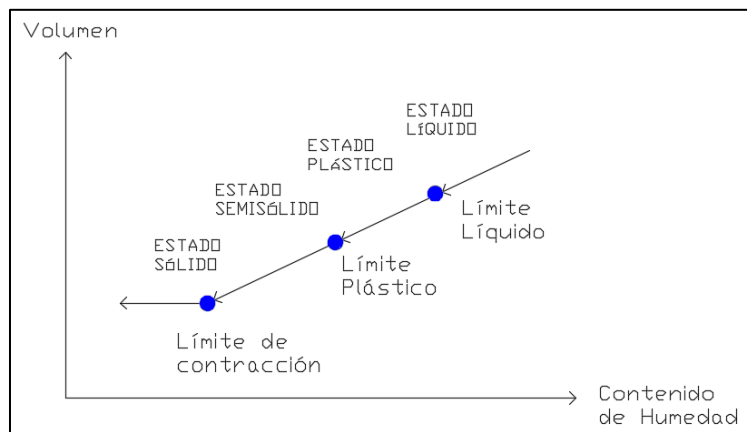
Los parámetros de identificación de los suelos son las características que dependen de la naturaleza de las partículas del suelo. Los más importantes son la granulometría y la plasticidad y ambos permiten describir el comportamiento de la masa de suelo y su posterior clasificación. Para determinarlos no son necesarias muestras inalteradas de suelo, sino muestras representativas.

La granulometría es una clasificación descriptiva del suelo que se emplea para determinar el tamaño y distribución de las partículas del mismo. Para suelos gruesos, se emplea el ensayo de tamizado o cribado, y en el caso de suelos finos (partículas que pasan el tamiz IRAM 75 micrones (N° 200)), se utiliza el ensayo de sedimentación.

A partir de la granulometría se puede obtener la curva granulométrica, que indica, para cada diámetro de partícula D, el porcentaje en peso de partículas menores que D. Se representa en escala logarítmica de tamaños.

La plasticidad es la propiedad del suelo por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin disgregarse ni agrietarse. Esta propiedad es debido a la presencia de arcillas y varía según el porcentaje de humedad natural de la masa del suelo.

Los suelos arcillosos admiten agua de forma progresiva, lo que genera que las partículas se alejen unas de otras, hasta llegar a una suspensión cada vez más diluida. De esta forma, un suelo arcilloso presenta todos los estados de consistencia, desde un sólido frágil, pasando por un sólido plástico amasable, hasta llegar a estado líquido. En la Figura 4.3 se muestra la variación de volumen respecto al contenido de humedad.



**Figura 4.3:** Variación del volumen en función al contenido de humedad. (Fuente: elaboración propia adaptada de Braja Das, 2015)

La plasticidad se cuantifica mediante los límites de Atterberg. Estos límites se definen como el contenido de humedad para la cual un suelo arcilloso presenta determinada consistencia:

- *Límite líquido (LL):* es el contenido de humedad por encima del cual el suelo se comporta como un líquido viscoso, y por debajo, como un material plástico. Se determina con el ensayo normalizado con la cuchara de Casagrande.
- *Límite plástico (LP):* contenido de humedad que separa el estado semisólido y plástico. El suelo puede moldearse sin agrietarse. Se determina mediante el ensayo normalizado.
- *Límite de contracción (LC):* es el contenido de humedad en el cual el suelo alcanza el mínimo volumen al secarse, pasando del estado semisólido al sólido; es la contracción del suelo por pérdida de humedad.
- *Índice de plasticidad (IP):* es el rango de humedad en el cual el suelo se comporta como un material plástico. Por lo tanto, es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

$$IP = LL - LP \tag{4.7}$$

- Índice de liquidez (IL): Indica la consistencia de un suelo.

$$IL = \frac{W_w - LP}{IP} \quad (4.8)$$

A continuación, en la Tabla 4.2 se muestran diferentes tipos de suelo, en función al límite líquido e índice de plasticidad, mencionados anteriormente.

**Tabla 4.2:** Características del suelo en función de IP y IL. (Fuente: elaboración propia adaptada de Braja Das, 2015)

TIPO SUELO	IP
SUELO NO PLÁSTICO	0-5
SUELO LIGERAMENTE PLÁSTICO	5-15
SUELO MEDIANAMENTE PLÁSTICO	15-40
SUELO ALTAMENTE PLÁSTICO	< 40
ESTADO SUELO	IL
PLÁSTICO	0-1
LIQUIDO	> 1
SEMISÓLIDO □ SÓLIDO	< 0

} IL = 1 → %H = LL  
IL = 0 → %H = LP

#### 4.2.5. Clasificación de suelos

Existen diversos sistemas de clasificación de suelos que se realizan en base a los parámetros de identificación. El más general y utilizado, es el sistema norteamericano S.U.C.S. (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), basado en la propuesta inicial de Casagrande.

La clasificación de suelos se divide principalmente en suelos gruesos y suelos finos. Los suelos gruesos son las gravas (G) y las arenas (S). Los suelos finos son los limos inorgánicos (M), las arcillas inorgánicas (C) y los limos y arcillas orgánicas (O).

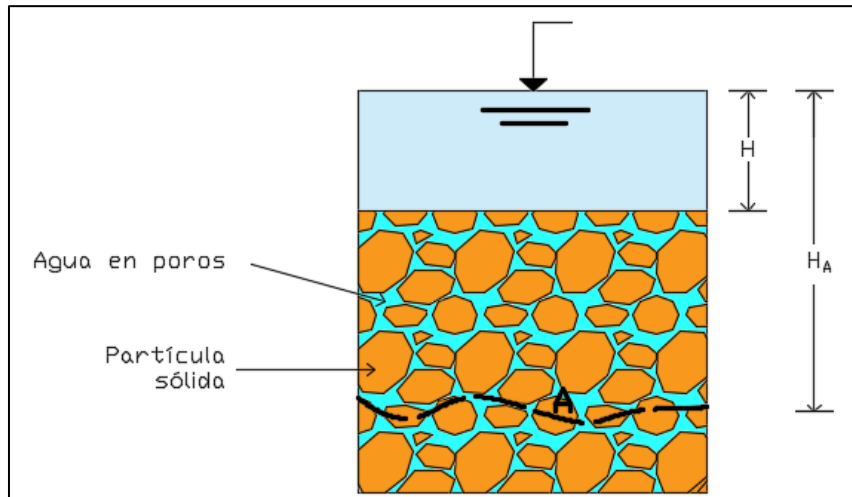
Los suelos gruesos son aquellos retenidos por el tamiz IRAM 75 micrones (N° 200), y los finos aquellos que pasan a través del mismo. Un suelo se considera *grueso* si más del 50% en peso de las partículas que lo componen quedan retenidas en dicho tamiz, y se considera *fino* si más del 50% lo atraviesa.

Los suelos gruesos, gravas (G) y arenas (S) se subdividen en suelos bien graduados (W) y mal graduados (P), en base al contenido de finos que contengan. Si la cantidad de finos son no plásticos se utiliza la letra (M) y si son plásticos la letra (C).

Los suelos finos, limos (M), arcillas (C) y orgánicos (O), se subdividen según su límite líquido en suelos de baja o media compresibilidad (L) y suelos de alta compresibilidad (H). Los suelos con turba forman un grupo independiente denotado por las letras (Pt).

#### 4.2.6. Esfuerzos en el suelo

Los suelos son sistema multifase donde, para un volumen dado, las partículas sólidas se distribuyen al azar. El esfuerzo total en un suelo es la suma del esfuerzo realizado por el agua intersticial ( $\mu$ ) que ocupa los espacios vacíos actuando con igual intensidad en todas las direcciones, y el esfuerzo generado por el contacto entre las partículas sólidas del esqueleto del suelo ( $\sigma'$ ).



**Figura 4.4:** Análisis de esfuerzos en corte transversal de masa de suelo. (Fuente: adaptada de Braja Das, 2015)

El principio de esfuerzo efectivo fue postulado por primera vez por Karl Terzaghi, en 1923 y propone que: “En cualquier punto de una masa de suelo saturado, el esfuerzo total en cualquier dirección es igual a la suma algebraica del esfuerzo efectivo en esa dirección y la presión intersticial”. Se denota con la ecuación (4.9) expresada a continuación:

$$\sigma = \sigma' + \mu \quad (4.9)$$

Siendo:

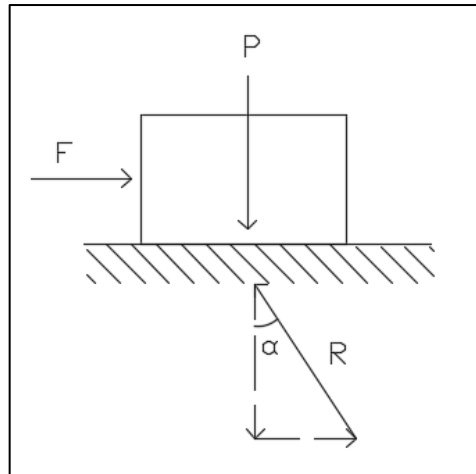
- $\sigma$  = Esfuerzo efectivo total [ton/m<sup>2</sup>]
- $\sigma'$  = Esfuerzo efectivo [ton/m<sup>2</sup>]
- $\mu$  = Presión de poros [ton/m<sup>2</sup>]

Se define al bulbo de presiones como la zona del suelo donde se producen incrementos de carga vertical considerables por efecto de una carga aplicada en superficie. Es una representación gráfica compuesta por isobaras, las cuales son curvas que unen los puntos de un mismo valor de presión, representando la distribución del incremento de esfuerzo en una masa de suelo.

Para cualquier profundidad el mayor incremento de esfuerzo tiene lugar por debajo del centro del área cargada. La profundidad hasta la cual el incremento es significativo se denomina zona de influencia y está relacionada con el ancho del tipo de área cargada.

#### 4.2.7. Resistencia al esfuerzo cortante

La resistencia a tracción que presentan los suelos es prácticamente nula. Es por esta razón que la misma hace referencia a la resistencia al corte, estudiándose sus deformaciones, las cuales implican un deslizamiento relativo o rodadura entre partículas. En otras palabras, es la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para soportar un deslizamiento a lo largo de cualquier plano, como se observa en la Figura 4.5.



**Figura 4.5:** Fuerzas y Resistencia interna en masa de suelo. (Fuente: adaptada de Braja Das, 2015)

La resistencia a corte está compuesta por la resistencia a fricción y la resistencia cohesiva. Éstas se representan a través de los siguientes parámetros:

- Cohesión ( $c$ ): es la adherencia entre partículas del suelo debido a las fuerzas de atracción intermoleculares entre ellas. Constituye una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo.
- Ángulo de fricción ( $\Phi$ ): corresponde a la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que existe entre las superficies de contacto de las partículas.

Ambos parámetros son determinados en el laboratorio con el ensayo de corte directo y el ensayo de corte triaxial.

#### *Teoría de falla Mohr-Coulomb*

La resistencia al esfuerzo cortante de los suelos viene representada por la teoría de falla de Mohr-Coulomb. Se utiliza la teoría de resistencia de materiales, la cual enuncia que la resistencia de un suelo se define en función de los esfuerzos efectivos desarrollados en el máximo de la curva esfuerzo-deformación.

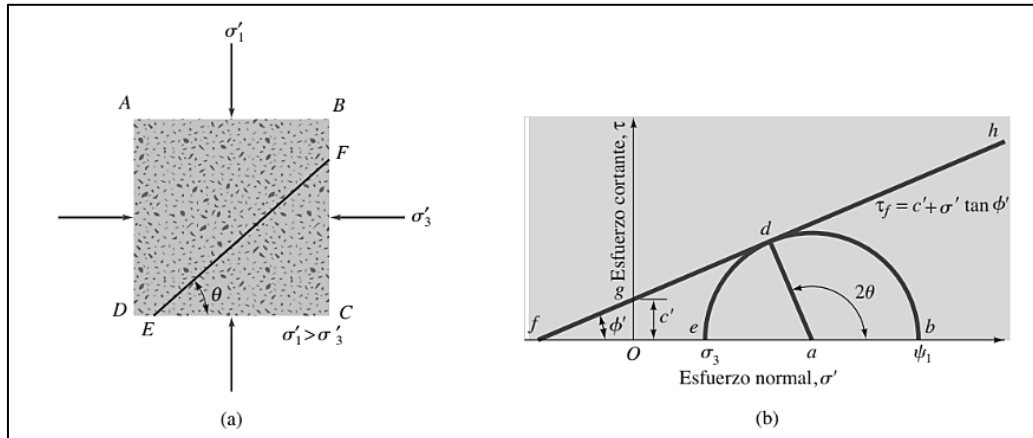
La representación de los esfuerzos se realiza mediante el círculo de Mohr y representa el lugar geométrico de todos los pares de esfuerzos a los que está sometido un elemento del suelo en sus planos internos.

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \times \operatorname{tg} \Phi' \quad (4.10)$$

Siendo:

- $\tau$  = Esfuerzo de resistencia al corte
- $\sigma$  = Esfuerzo normal total

- $\mu$  = Presión de poros
- $c'$  = Cohesión efectiva
- $\phi'$  = ángulo de fricción efectiva



**Figura 4.6:** a) *Inclinación del plano de falla en el suelo con respecto al plano principal mayor.* b) *Envolvente de falla definida por la ecuación (4.10).* (Fuente: extraída de Braja Das, 2015)

### 4.3. DINÁMICA DE SUELOS

Como se ha evidenciado durante el desarrollo del presente Proyecto Final, existen diversos problemas en la práctica de la Ingeniería Civil que requieren el conocimiento de las propiedades de los suelos sometidos a cargas dinámicas. Estos problemas incluyen la capacidad de carga dinámica de las cimentaciones, la respuesta de éstas sometidas a cargas cíclicas, la interacción de la estructura del suelo durante la propagación de las ondas de tensión, entre otros.

En condiciones estáticas, la masa combinada de una máquina y su base ejerce presión sobre el suelo y éste a su vez se deforma. En condiciones dinámicas, la máquina ejerce fuerzas dinámicas en el suelo a través de la cimentación y, bajo la influencia de éstas, la base interactúa con el suelo activando la interacción dinámica de la estructura del suelo, lo que influye significativamente en la respuesta dinámica del sistema de cimentación de la máquina.

El diseño de una cimentación que está sujeta a cargas dinámicas requiere que se determinen los parámetros dinámicos de la masa de suelo en donde se apoyará. Estos datos nunca son de un valor único, debido a que existen factores que los afectan. En consecuencia, la cuantificación de su influencia es una tarea compleja.

Para determinarlos, se encuentra disponible una amplia gama de pruebas de laboratorio y técnicas de campo, cada una con sus propias limitaciones y ventajas. Mientras que algunas de estas pruebas se desarrollan específicamente para medir las propiedades de suelos cargados dinámicamente, otras son versiones modificadas de las pruebas utilizadas en el dominio de la mecánica de suelos tradicional. Además, existen métodos que resultan adecuados para un rango de deformación pequeño, a diferencia de otros que se utilizan para un rango de deformación grande. Como principal desventaja, la mayoría de estos equipos son muy costosos y requieren una formación especial para utilizar e interpretar los resultados.

En definitiva, cabe destacar que el comportamiento del suelo en una amplia gama de deformaciones no es lineal y en el proceso de descarga sigue una trayectoria de tensión-deformación que forma un bucle de histéresis.

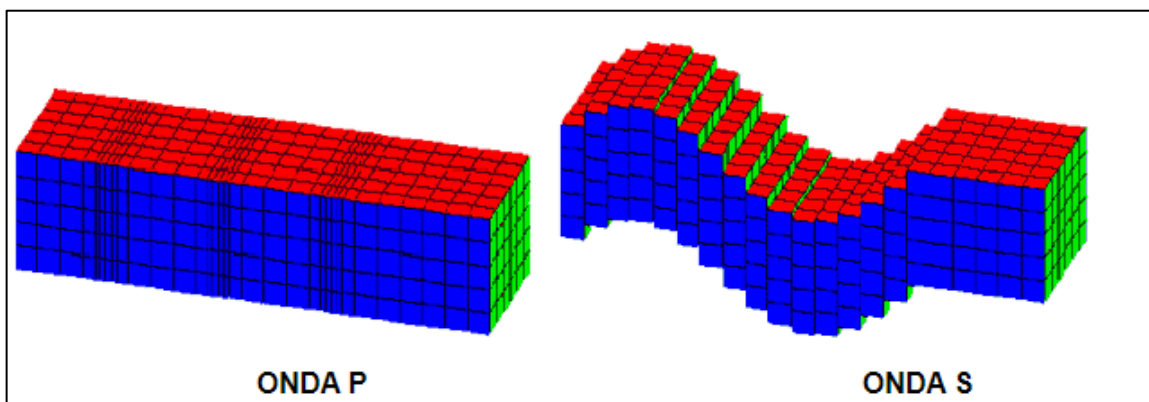
De todo lo anterior, se puede apreciar que la dinámica de suelos es un área interdisciplinaria y requiere conocimientos en el campo de la teoría de vibraciones, principios de propagación de ondas, comportamiento del suelo en condiciones dinámicas o cíclicas, y métodos numéricos para encontrar soluciones apropiadas para problemas de interés práctico, en adición a los conceptos obtenidos de la mecánica tradicional de suelos.

El presente apartado del Capítulo está dedicado a describir los principales parámetros y definiciones que se deben tener en cuenta para poder evaluar la interacción de la estructura del suelo, necesarios para el modelo y cálculo de la fundación, el cual se realizará en los siguientes capítulos. Además, se desarrollarán correlaciones para obtener, partiendo de propiedades estáticas, parámetros dinámicos de gran interés.

#### 4.3.1. Teoría de ondas de corte

El principio básico que subyace al diseño de la base de la máquina, radica en que las fuerzas dinámicas del equipo se transmiten al suelo a través de la misma, de manera tal que se eliminan todo tipo de efectos nocivos. En otras palabras, el contenido energético de las fuerzas dinámicas se transmite al suelo a través de la cimentación. La energía viaja en forma de ondas en todas direcciones en el suelo y la mayor parte se absorbe en el suelo mismo.

Para entender este fenómeno se recurre a la “Teoría de Ondas Sísmicas”, donde estas ondas se clasifican en ondas de cuerpo y ondas de superficie. En cuanto a las ondas de cuerpo, las mismas se propagan por el interior de la tierra y se subclasifican en principales (o longitudinales “P”) y secundarias (o transversales “S”). Mientras que las ondas principales viajan en dirección paralela a la acción sísmica generando compresión contra el terreno en forma similar a la propagación del sonido, las ondas secundarias poseen un movimiento perpendicular a la dirección de la acción sísmica, propagando ondas de cizalla.

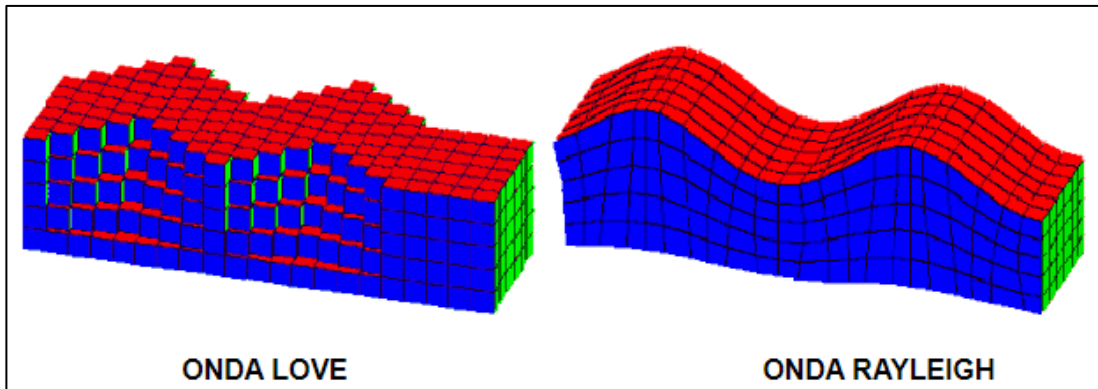


**Figura 4.7:** Ondas primarias u ondas P (izq.), ondas secundarias u ondas S (der.). (Fuente: extraída de Anon., Universidad de Cataluña, Departamento de Tecnología de la Construcción, recuperado de

[https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/ondas\\_s%EDsmicas.htm](https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/ondas_s%EDsmicas.htm))

Por otra parte, las ondas de superficie hacen referencia a ondas que se propagan por las capas más superficiales de la Tierra, decreciendo su amplitud con la profundidad. Son las que generan importantes daños sobre estructuras. Se subclasifican en ondas de Rayleigh, las cuales poseen un comportamiento perfectamente elíptico sobre la superficie y ondas Love, similares a las ondas S, sólo que ocurren en el plano superficial de la Tierra.





**Figura 4.8:** Ondas Love (izq.), ondas Rayleigh (der.). (Fuente: extraída de Universidad de Cataluña, Departamento de Tecnología de la Construcción, recuperado de [https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/ondas\\_s%EDsmicas.htm](https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/ondas_s%EDsmicas.htm))

En resumen, las ondas P o primarias se propagan con mayor velocidad que las ondas S, y en cualquier tipo de material. Es por ello que, cuando ocurre un sismo, se perciben primero las ondas P, luego las ondas S y finalmente las ondas superficiales.

La importancia de conocer los tipos de ondas radica en tener presente su comportamiento típico, el cual afecta el terreno e inciden en la cimentación. Además, es útil para calibrar el valor de módulo de corte dinámico  $G'$ , concepto que se explicará en el próximo apartado.

A fin de obtener valores de velocidades de ondas de corte, necesarias para la obtención de parámetros dinámicos del suelo, existen ensayos geofísicos de caracterización del terreno. Estos ensayos se utilizan en proyectos de gran envergadura que justifiquen el costo de realización de los mismos, en donde se necesiten valores precisos para poder modelar cimentaciones de maquinaria compleja, como por ejemplo: turbogeneradores de vapor. Los métodos más utilizados a nivel mundial son:

- Método de orificios cruzados (Cross-hole), de fondo de pozo (Down-hole) y método del hoyo (Up-hole).
- Ensayo de penetración sísmica (SCPT) y de refracción sísmica.
- Análisis espectral de ondas superficiales (SASW), análisis multicanal de ondas superficiales (MASW).
- Método de microtremor de refracción (ReMi).

Una discusión detallada de los métodos anteriormente mencionados se encuentra fuera del alcance de este Proyecto Final; para obtener detalles específicos, Bowless en su libro "*Foundation Analysis and Design*" (1996), recomienda consultar a los autores Fang y Stokoe et al.

En proyectos de menor envergadura y en relación al presente Proyecto Final, cuando no se pueda afrontar los gastos de estos ensayos o cuando se deba calcular cimentaciones para máquinas más simples, se utilizan ecuaciones que correlacionan la velocidad de ondas de corte  $V_s$  con el número de golpes de los ensayos SPT.

A fin de repasar conceptos, el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) consiste en obtener muestras de suelo mediante la hincada de un muestreador, dejando caer un martillo en caída libre de 63,6 [kg] desde una altura de 76 [cm]. El objetivo de la prueba es conocer el número de golpes necesarios para introducir el muestreador 45 [cm] en 3 intervalos de 15 [cm], tomando el número de golpes para hincar los 30 [cm] finales como valor " $N$ ", el cual representa la resistencia del material muestreado.

El valor “N” depende del tipo de suelo, el nivel de confinamiento y la densidad del terreno, pero también está influenciado por el procedimiento de realización del ensayo y del equipo. De acuerdo con lo anterior, el valor de resistencia “N” debe corregirse en función de la energía aplicada al inicio del ensayo y su disipación en torno a la toma de muestras en el suelo circundante. La siguiente expresión tomada de Braja Das corrige este valor al 60% de la energía:

$$N_{60} = \frac{N \times \eta_H \times \eta_B \times \eta_S \times \eta_R}{60} \quad (4.11)$$

Donde:

- $N_{60}$  = número de penetración estándar corregido para condiciones de campo
- $N$  = número de penetración medido
- $\eta_H$  = eficiencia del martillo (%),  $\eta_B$  = corrección para el diámetro de la perforación
- $\eta_S$  = corrección del muestreador,  $\eta_R$  = corrección para la longitud de la varilla

Con base en las recomendaciones de Braja Das, las variaciones de  $\eta_H$ ,  $\eta_B$ ,  $\eta_S$  y  $\eta_R$  se resumen en las siguientes tablas.

**Tabla 4.3:** Variación de  $\eta_H$ . (Fuente: adaptada de Braja Das, 2015)

País	Tipo de martillo	Lanzamiento del martillo	$\eta_H$
Estados Unidos	Anillos	Cuerda y polea	45
	Seguridad	Cuerda y polea	60
Argentina	Anillos	Cuerda y polea	45
China	Anillos	Cuerda y polea	50

**Tabla 4.4:** Variación de  $\eta_B$ . (Fuente: adaptada de Braja Das, 2015)

Diámetro de la perforación (mm)	$\eta_B$
60-120	1,0
150	1,05
200	1,15

**Tabla 4.5:** Variación de  $\eta_S$ . (Fuente: adaptada de Braja Das, 2015)

Variable	$\eta_S$
Muestreador estándar	1,0
Con revestimiento para arena densa y arcilla	0,8
Con revestimiento para arena suelta	0,9

**Tabla 4.6:** Variación de  $\eta_R$ . (Fuente: adaptada de Braja Das, 2015)

Longitud de la varilla (m)	$\eta_R$
>10	1,0
6-10	0,95
4-6	0,85
0-4	0,75

En conclusión, el valor de  $N_{60}$  indica que, para estimar parámetros dinámicos no se trabaja con los valores de NSPT obtenidos en campo, sino que este número es afectado por coeficientes de corrección.

Existe otra postura entre diversos autores. Guanchez recomienda estimar este coeficiente de corrección de energía con un valor de 0,70, obteniendo la siguiente expresión:

$$N_{60} = C_n \times NSPT \quad (4.12)$$

En donde:

- $C_n$ : coeficiente de corrección de energía incidente del 60%. Usualmente se estima 0,70.
- $NSPT$ : número de golpes ensayo SPT obtenido en campo.

Retomando la correlación entre ensayo SPT y velocidades de ondas de corte, existe diversa bibliografía en donde se suministran diferentes ecuaciones para estimar dicha velocidad. Como se mencionó anteriormente, en el presente Proyecto Final se utilizarán las recomendaciones de Bowless, quien basa sus investigaciones en las realizadas por Schmertmann, quien postula lo siguiente:

$$V_s = 10 \text{ a } 20 N_{60} [m/s] \quad (4.13)$$

#### 4.3.2. Parámetros dinámicos del suelo

La amplificación del movimiento en el suelo está determinada por las propiedades dinámicas del suelo. Entre ellas, las más importantes son el módulo de corte  $G'$  y la razón de amortiguamiento  $\xi$ . Mientras que la primera permite obtener una correcta aproximación a la rigidez del suelo, la segunda propiedad muestra la capacidad que tiene el suelo para disipar la energía. Otras propiedades dinámicas que se mencionarán son la densidad  $\rho$  y el módulo de Poisson  $\mu$ , pero éstas poseen menor influencia.

##### 4.3.2.1 Módulo de Poisson

Es la relación de las deformaciones laterales y las transversales, cuando el material se encuentra sometido a una carga de compresión. Es un parámetro difícil de obtener en laboratorio, sumado al costo del ensayo, por lo que sólo es justificable realizarlo cuando el proyecto es de gran envergadura. Debido a estas razones, a continuación, se nombrarán las dos principales correlaciones que diversos autores recomiendan para estimarlo.

El primer método de correlación consiste en utilizar la siguiente tabla del Ingeniero Joseph Bowless, en donde se obtienen diferentes rangos de  $\mu$  según el tipo de suelo en estudio.

**Tabla 4.7:** Rangos de valor de módulo de Poisson (Fuente: adaptada de Bowless, 1996).

Material	Relación de Poisson
Arcilla saturada	0,40 – 0,50
Arcilla no saturada	0,10 – 0,30
Limos	0,30 – 0,35
Rocas	0,10 – 0,40
Concreto	0,15

El segundo método implica utilizar el Reporte ACI 351, proveniente del Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute). En particular, el ACI 351-35 del año 2004 es un informe que presenta a los profesionales los diversos diseños criterios, métodos y procedimientos de análisis, diseño y construcción aplicada a cimentaciones para equipos dinámicos. En el apéndice A de dicho Reporte se presentan rangos de módulo de Poisson, resumidos en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8:** Rangos de valor de módulo de Poisson (Fuente: adaptada de ACI 351, Apéndice A).

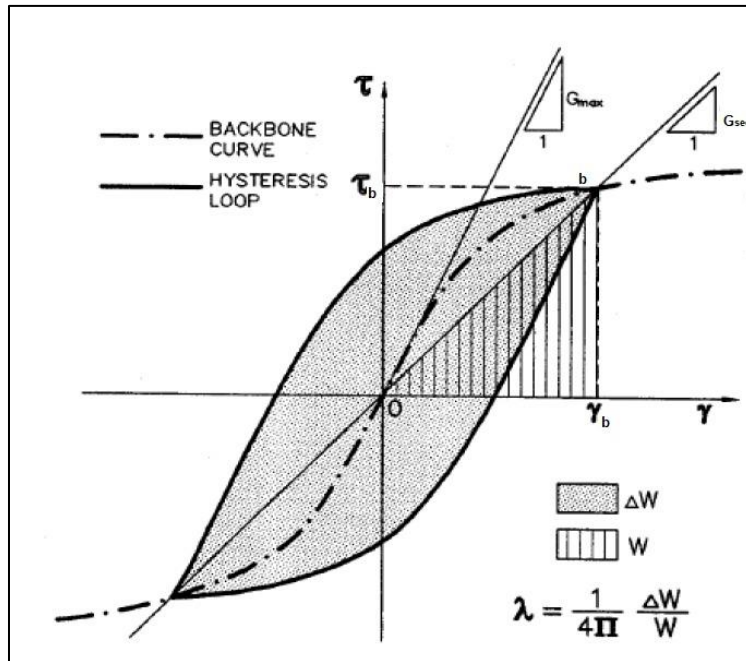
Material	Relación de Poisson
Suelos granulares sin cohesión (drenaje libre)	0,25 – 0,40
Suelos cohesivos (impermeables)	0,33 – 0,50
Suelos completamente saturados bajo NF	0,48 – 0,50

A modo de resumen, diversos autores sugieren estimar un  $\mu$  de 0,33 para suelos no cohesivos y 0,40 para suelos cohesivos.

#### 4.3.2.2 Módulo dinámico a corte $G'$

El módulo de corte dinámico  $G'$  es el parámetro más importante que influye en el comportamiento dinámico del sistema máquina-cimentación-suelo. Representa la medida de la dureza del material. Este módulo se define como la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado de la Figura 4.9.

Una muestra típica de suelo sometida a una carga cíclica, tal y como sería una situada bajo la superficie del terreno lejos de estructuras adyacentes, manifestará una curva de histéresis como se muestra en la Figura 4.9.



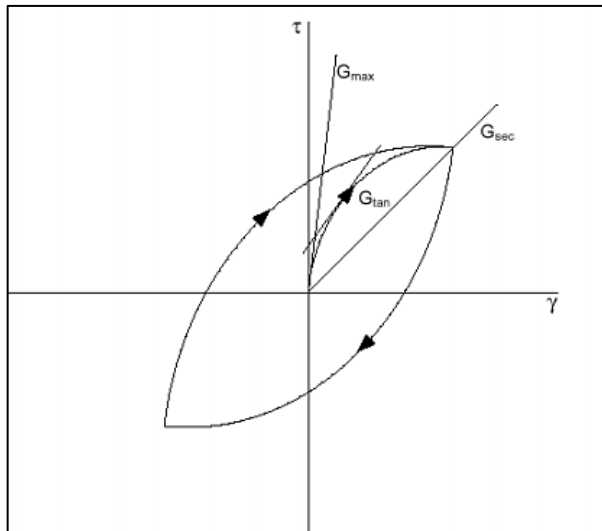
**Figura 4.9:** Bucle de histéresis para un ciclo de carga que muestra  $G_{max}$ ,  $G$  y  $D$ . (Fuente: extraída de Guanchez, 2019. Aspectos sismo-geotécnicos considerados en el diseño de cimentaciones. Recuperado de <https://www.prontubeam.com/>)

El módulo  $G'$  surge de la pendiente de la curva esfuerzo cortante  $\tau$  (eje  $y$ ) vs. deformación unitaria  $\gamma$  (eje  $x$ ). En esta curva se representa un lazo de histéresis, que refleja un comportamiento histerético del suelo, el cual, al aplicar condiciones de carga y descarga se produce un lazo de histéresis típico o "loop". Si conectamos los puntos centrales de dicho lazo, estos puntos determinan una curva con forma de columna vertebral o "backbone", representada como la línea punteada en la Figura 4.9. La pendiente en el origen de esta curva representa al mayor valor del módulo de corte  $G_{m\acute{a}x}$ .

De aquí se deriva una importante conclusión: la pendiente que representa  $G_{m\acute{a}x}$  ocurre cuando se considera una deformación unitaria pequeña, implicando que el valor de  $G'$ , varía según la magnitud de la deformación. En consecuencia, cuanto menor es la deformación, mayor es el módulo de cizallamiento dinámico.

En función de la posición en donde se evalúa la pendiente, y según se ilustra en la Figura 4.10, se distinguen 3 módulos de corte: máximo ( $G_{m\acute{a}x}$ ), tangente ( $G_{tan}$ ), y secante ( $G_{sec}$ ). Como se mencionó anteriormente, el módulo de corte máximo se calcula como el valor de la pendiente de la recta tangente en el punto inicial de la curva mientras que el módulo de corte tangente es el valor de la pendiente en un punto de la curva. Por último, el módulo de corte secante se calcula como la pendiente de la recta secante a la curva de histéresis.

Se observa que este módulo varía con la amplitud de deformación por corte cíclica, por lo que, a bajas amplitudes de deformación, el módulo de  $G_{sec}$  es alto; disminuyendo a medida que se incrementa la amplitud de deformación.



**Figura 4.10:** Curva de histéresis deformación de corte  $\gamma$ -tensión de corte  $\tau$ , y definición del módulo de corte máximo ( $G_{max}$ ), tangente ( $G_{tan}$ ) y secante ( $G_{sec}$ ). La tensión  $\tau$  se expresa en [kPa] y la deformación  $\gamma$  es adimensional y se expresa en [%]. (Fuente: extraída de Guanchez, 2019. Aspectos sismo-geotécnicos considerados en el diseño de cimentaciones. Recuperado de <https://www.prontubeam.com/>)

Relacionando estos conceptos al tema del presente Proyecto Final, al inicio de la vibración, el sistema suelo-cimentación experimentará un  $G_{m\acute{a}x}$  que se irá degradando a medida que aumenta la deformación unitaria. En condiciones de operación de maquinaria, se estará trabajando con un  $G_{sec}$ .

Para poder modelar el sistema suelo-cimentación-máquina en el siguiente capítulo, se deberán obtener los valores de diseño de módulo  $G_{m\acute{a}x}$ . Existen diferentes métodos para lograrlo:

- a) Medidas de campo de la velocidad de ondas de corte.
- b) Ensayos de laboratorio sobre muestras de suelo.
- c) Correlación con otras propiedades del suelo.

El primer método es el que proporciona valores de  $G_{m\acute{a}x}$  más exactos. Esto implica medir la velocidad de ondas de corte, utilizando uno de los ensayos enunciados en el apartado anterior.

El segundo método es considerado menos exacto que el anterior, ya que existe la posibilidad de perturbación del muestreo de suelo. El ensayo más común es el método de la columna resonante, en donde una muestra cilíndrica de suelo es ubicada en un dispositivo que genera vibraciones torsionales. Esta prueba se realiza según la Norma ASTM D4015, en donde la muestra de suelo se excita a diferentes frecuencias hasta que se determina la frecuencia de resonancia y el módulo de corte dinámico  $G_{m\acute{a}x}$  se calcula en base a esta frecuencia de resonancia.

Por último, el tercer método utiliza correlaciones empíricas para estimar el  $G_{m\acute{a}x}$  del suelo. Es el menos exacto, debido a que depende de otros parámetros del suelo. Además, a diferencia de los métodos anteriores, se obtiene como resultado un rango de valores posibles y no un único valor. Es por esta razón que el Código ACI 351 recomienda utilizarlo como valor de diseño preliminar en grandes proyectos o para diseñar fundaciones con pequeñas cargas dinámicas.

Siguiendo la recomendación de diversos autores, el presente Proyecto Final utilizará este último método, en donde se correlacionarán los valores de ondas de corte para obtener los valores de  $G_{m\acute{a}x}$ .

Como se mencionó en el apartado anterior, en una masa de suelo elástica y homogénea sometida a un esfuerzo dinámico en un punto cercano a la superficie, surgirán tres ondas elásticas que viajarán a diferentes velocidades. Estas son: Onda de compresión (o P), Onda cortante (o S, la cual normalmente es la onda de interés) y Onda de superficie (o Rayleigh).

Bowless determinó que las velocidades de las ondas de compresión y de corte están relacionadas con las constantes elásticas dinámicas del suelo, de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad.

$$\text{Onda de compresión } V_c = \sqrt{\frac{E_s (1-\mu)}{\rho (1+\pi)(1-2\mu)}} \quad (4.14)$$

$$\text{Onda de corte } V_s = \sqrt{\frac{G'}{\rho}} \quad (4.15)$$

Debido a que la mayoría de las pruebas geofísicas inducen deformaciones por corte inferiores a 0,0003%, y relacionando el concepto de que, a menor deformación, mayor módulo  $G'$ , las velocidades de ondas de corte pueden ser utilizadas para estimar  $G_{m\acute{a}x}$ . Operando algebraicamente la ecuación 4.15 se obtiene:

$$G' = \rho \times V_s^2 \quad (4.16)$$

Diversos autores recomiendan ajustar el valor de  $G'$  obtenido, para considerar el efecto de la deformación unitaria del suelo. En sismos, por ejemplo, normalmente se emplea un valor de  $G_{m\acute{a}x}$  afectado por un coeficiente de reducción de entre 0,30 y 0,50 debido al efecto de disipación de energía que va a experimentar el terreno. Este valor indica que, en vez de diseñar una base con un módulo de corte máximo, se va a trabajar con el 30% de él.

Este coeficiente de reducción se aplica por razones de seguridad. A mayores valores de  $G'$ , mayor rigidez dinámica, lo que lleva a una amplitud de vibración pequeña. En cambio, si se consideran menores valores de  $G'$ , se obtendrá una amplitud de vibración mayor, lo que constituye el caso más desfavorable, y se estará entonces, desde el lado de la seguridad.

Según el ingeniero Edison Guanchez de la Universidad Politécnica de Cataluña, se recomienda utilizar valores de 0,30 a 0,45 para equipos con alta vibración y 0,45 a 0,50 para equipos de baja vibración.

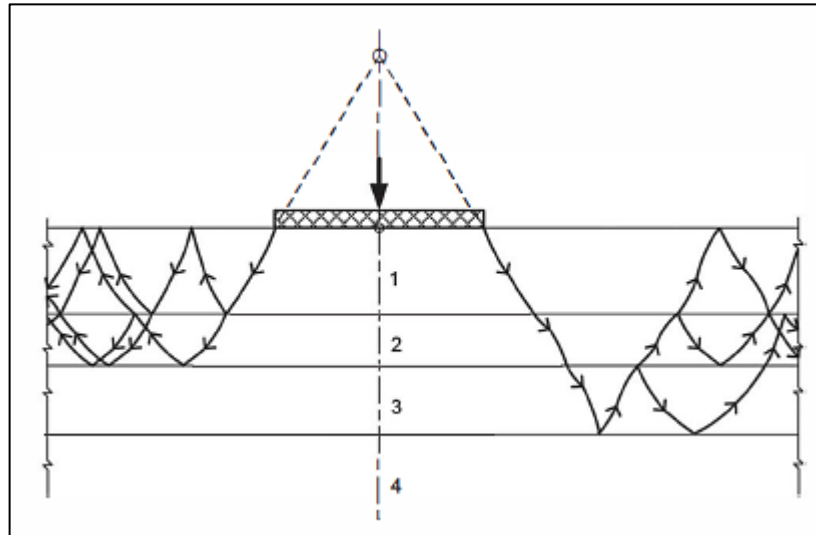
### 4.3.3. Amortiguamiento en Suelos

La razón de amortiguamiento expresa la capacidad del material para disipar la energía. El suelo manifiesta amortiguamiento que se traduce en beneficios o perjuicios sobre el sistema, por lo que se deberá calibrar si esta cantidad de amortiguamiento es la apropiada para garantizar el adecuado funcionamiento entre el suelo y la cimentación.

El amortiguamiento del suelo posee dos componentes:

- Amortiguamiento por radiación o geométrica: consiste en la disipación de ondas elásticas en las cercanías del cimiento. Dicho de otra manera, representa una medida de la energía irradiada desde la base hacia el suelo.

Estas ondas se propagan continuamente alejándose de la estructura, como se muestra en la Figura 4.11. Por lo tanto, la energía transportada por las ondas se disipa o pierde en el medio, dando lugar a la atenuación de la vibración (es decir, amortiguamiento). En resumen, el término "amortiguación por radiación" se utiliza para caracterizar un mecanismo en el que la energía parece perderse debido a la propagación de ondas. A diferencia de la amortiguación de material, la amortiguación de radiación depende de la frecuencia.



**Figura 4.11:** Propagación de ondas de radiación. (Fuente: extraída ACI 351-3R, 2018)

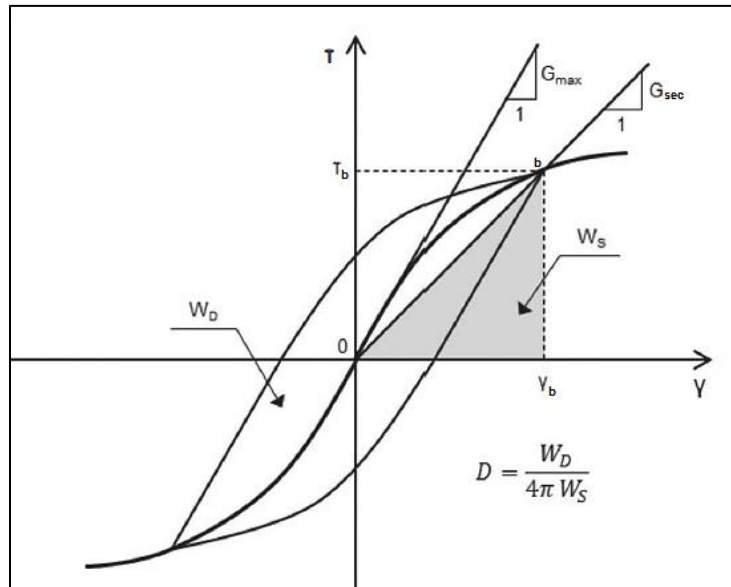
- Amortiguamiento del material: hace referencia al amortiguamiento del suelo propiamente dicho, referido al comportamiento histerético del material, calculado como el área encerrada bajo la curva de un ciclo de histéresis. Este concepto es muy importante, ya que ofrece una medida de la capacidad de disipación o pérdida de energía del material, que sirve como amortiguador al sistema.

Diversos autores coinciden en que la amortiguación geométrica es de menor importancia que el amortiguamiento propio del material, por lo que, de ahora en adelante, cuando se mencione amortiguamiento se considerará sólo el amortiguamiento del material y no el de radiación.

La relación de amortiguación del material  $D$  representa la energía disipada por el suelo durante las vibraciones inducidas por el sistema máquina-cimentación. Los mecanismos que contribuyen a la amortiguación del material son la fricción entre las partículas del suelo, los efectos de la velocidad de deformación y el comportamiento no lineal del suelo.

Analizando la Figura 4.12, la medida del lazo de histéresis refleja el amortiguamiento en suelos. A medida que el área de la curva sea mayor, existe una mayor capacidad de disipación de energía. A mayor capacidad de disipación, el amortiguamiento del material es mayor.





**Figura 4.12:** Lazo de histéresis. (Fuente: extraída ACI 351-3R, 2018)

Para calcular el amortiguamiento del material o histerético, se debe determinar el área del triángulo, mediante la siguiente ecuación:

$$\xi = D = \frac{W_D}{4\pi \times W_S} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{A_{\text{lazo}}}{G_{\text{Sec}} \times \gamma^2} \quad (4.17)$$

Donde  $W_D$  es la energía disipada en un ciclo de carga y  $W_S$  es la máxima energía de deformación almacenada durante el ciclo. El área dentro del bucle de histéresis es  $W_D$  y el área del triángulo es  $W_S$ .  $A_{\text{lazo}}$  es el área del lazo del ciclo de histéresis.

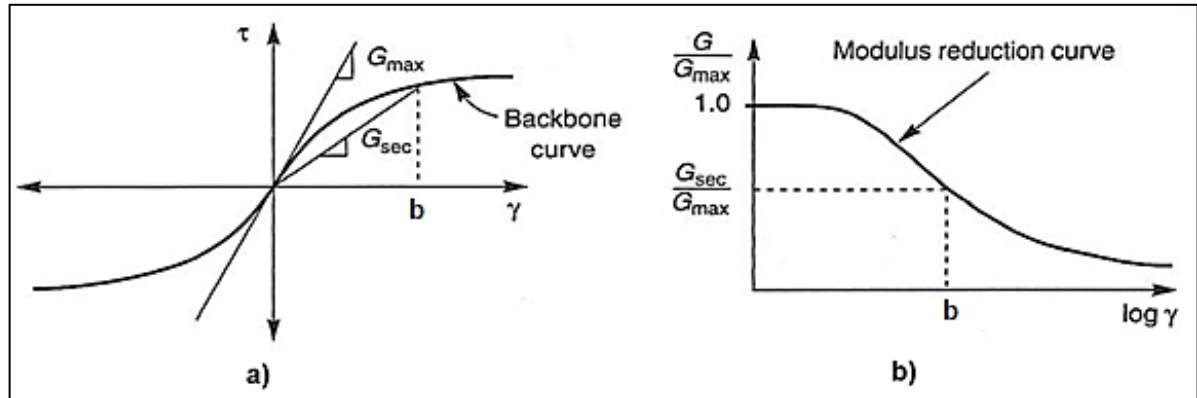
Según Guanchez, en la práctica, se utilizan valores de  $\xi$  que oscilan entre 5 y 10%, o bien, la siguiente tabla de los investigadores Stewart y Campanella.

**Tabla 4.9:** Rangos de valor del coeficiente de amortiguamiento (Fuente: adaptada de Edison Guanchez, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2019)

Tipo de suelo	Stewart y Campanella (%)	Otros (%)
Arcilla	1,00 a 5,00	1,70 a 7,00
Limos	-	2,50
Aluviales	-	3.50 a 12,00
Arena	0,50 a 2,00	1,70 a 6,00

#### 4.3.4. Comportamiento típico referido a rigidez y amortiguamiento en suelos

A continuación, se explicarán los procesos que ocurren en el terreno cuando se aplican cargas vibratorias en relación al proceso de degradación del suelo.



**Figura 4.13.** a) Curva Tipo Backbone que muestra variación típica de  $G_{sec}$  con la deformación por corte (izq.). b) Curva típica de reducción de módulo  $G/G_{max}$  (der). (Fuente: extraída de Guanchez, 2019. Aspectos sísmo-geotécnicos considerados en el diseño de cimentaciones. Recuperado de <https://www.prontubeam.com/>)

La Figura 4.13.a) muestra la curva o backbone presentada anteriormente, la cual representa el comportamiento histerético del suelo. En ella se puede notar que la pendiente de la misma para pequeñas deformaciones se denomina  $G_{máx}$  y para deformaciones unitarias mayores, se denomina  $G_{sec}$ .

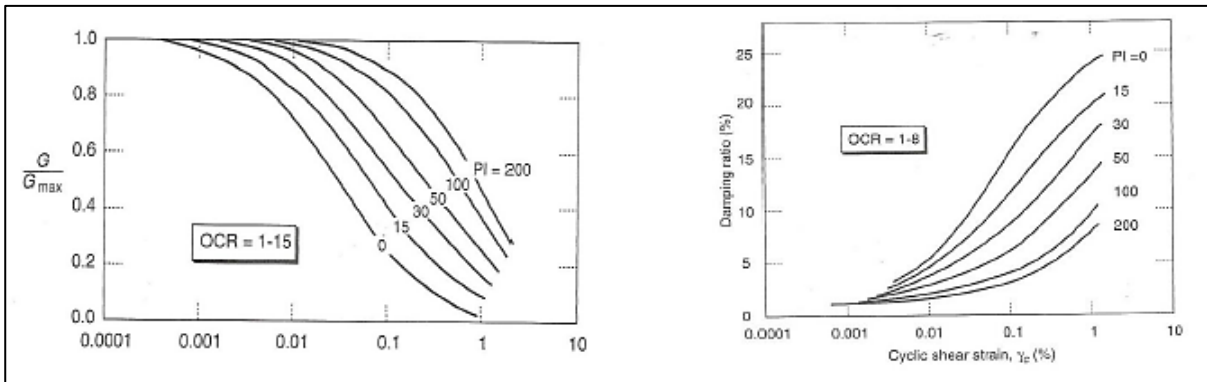
Al inicio de la vibración, la condición de rigidez dinámica se aproxima a  $G_{máx}$ , por lo que,  $G/G_{máx} = 1$ , como se muestra en la Figura 4.13.b). Si se analiza el punto  $b$  en ambas curvas, por ejemplo, se evidencia que a medida que ocurre el proceso vibratorio, comienzan a incrementarse las deformaciones unitarias, por ende, se inicia un proceso de degradación del material de forma tal que, a diferentes ciclos de histéresis, se modificará la relación  $G/G_{máx}$  hasta que se obtiene la relación  $G_{sec}/G_{máx}$ .

Todo lo mencionado anteriormente hace referencia al comportamiento típico de cualquier cimiento sometido a vibraciones, y ocurre tanto en bases sometidas a cargas sísmicas como en bases sometidas a vibraciones de equipos.

Es por ello que, diversos autores utilizan una relación  $G/G_{máx}$  entre 0,25 a 0,50, en la práctica de diseño de bases. Esto quiere decir que, si se emplea un valor de 0,25,  $G_{sec}$  será igual al 25% del valor de  $G_{máx}$ , por lo que existiría un proceso de degradación del módulo cortante dinámico  $G'$  del 75%.

Por otra parte, existen investigaciones, como la que realizaron los Ingenieros Vucetic y Dobry para la Asociación Americana de Ingenieros Civiles, en donde se llegó a la conclusión de que, dependiendo del índice de plasticidad  $IP$  del material existirá un comportamiento de degradación diferente, lo que se traduce en una razón de amortiguamiento diferente. En la Figura 4.14 (izq.) se relaciona la deformación unitaria (deformación por corte límite cíclica lineal) vs. la reducción de módulo  $G/G_{máx}$ , según el índice de plasticidad del suelo  $IP$ .

Si se analizan las curvas, para una deformación unitaria de 0,10, considerando que el material posee un índice de plasticidad igual a cero se obtiene una relación de  $G/G_{máx}$  de 0,25; mientras que, para la misma deformación, si el material posee un  $IP$  del 50% dicha relación será de 0,70. Esto indica que, según la plasticidad del suelo, el proceso de degradación varía notablemente, traduciéndose en la respuesta del terreno, que a su vez se ve reflejada en el amortiguamiento.



**Figura 4.14:** Curvas de reducción de módulo  $G/G_{max}$  para suelos de grano fino con diferente plasticidad. (Fuente: extraída de Guanche, 2019. Aspectos sísmo-geotécnicos considerados en el diseño de cimentaciones. Recuperado de <https://www.prontubeam.com/>)

“Estas curvas muestran que la deformación por corte límite cíclica lineal es mayor para suelos de elevada plasticidad que para suelos de baja plasticidad. Esta característica es extremadamente importante debido a que puede influenciar fuertemente la forma en la que un depósito amplificaría o atenuaría los movimientos sísmicos. El comportamiento de la reducción del módulo de corte está influenciado de igual forma por la presión de confinamiento efectiva, particularmente en suelos de baja plasticidad. La deformación por corte límite cíclica lineal es mayor para altas presiones de confinamiento efectivas que a bajas presiones de confinamiento efectivas”. (Guanchez, 2019)

Por otro lado, la gráfica de la Figura 4.14 (der.) relaciona la deformación unitaria vs. el amortiguamiento del suelo. Analizando las curvas para la misma deformación unitaria, con un valor de 0,10, un suelo con índice de plasticidad igual a cero, arroja como resultado una razón de amortiguamiento del 15%, mientras que un material con un  $IP$  del 50% tendrá una razón de amortiguamiento del 5%.

Se concluye entonces que, para una misma amplitud de deformación cíclica, a menor plasticidad, mayor razón de amortiguamiento. Por ejemplo, los materiales arenosos, los cuales poseen baja plasticidad, tienden a manifestar razones de amortiguamiento mayores que los que poseen elevada plasticidad. A su vez, se puede extrapolar este significado con la deformación del terreno, donde, a mayor degradación de un suelo, mayor razón de amortiguamiento del mismo.

Como conclusión final, toda la información expuesta es de gran utilidad para poder analizar, en función al tipo de suelo que se tenga como dato al momento de calcular la base de un equipo vibratorio, cómo se produce el proceso de degradación durante la acción dinámica.

En la práctica se utiliza convencionalmente un porcentaje de amortiguamiento del 5%.

# CAPÍTULO 5

## TEORÍA DEL DISEÑO DE CIMENTACIÓN DE EQUIPO DINÁMICO

### 5.1. GENERALIDADES

El diseño dinámico de cimientos tiene por objetivo determinar un sistema de suelo-cimiento que soporte satisfactoriamente el equipo o la maquinaria (Richart et.al, 1970). El criterio de diseño se basa en obtener la respuesta dinámica del sistema, limitando los valores de amplitudes producidas por las vibraciones de las fuerzas de excitación aplicadas. Estas amplitudes deben encontrarse dentro de los límites aceptables, según los distintos criterios de control de desplazamientos.

Así mismo, la cimentación debe contar con la capacidad suficiente para resistir las cargas estáticas, verificando que no se superen las tensiones admisibles del suelo, y no se produzcan deformaciones en él.

“Desde hace décadas, diversos investigadores y científicos han estudiado y publicado distintos modelos de análisis con un amplio espectro de soluciones, contribuyendo al entendimiento del comportamiento de cimentaciones sometidas a bajas amplitudes de vibración”. (Herrera Castiblanco, 2017).

En el estudio de los desplazamientos generados por vibraciones verticales, Fratelli menciona que Eric Reissner fue el primer investigador que proporcionó una solución analítica aproximada, la cual fue ampliada y ajustada posteriormente. Su teoría considera que el efecto que el suelo ejerce sobre las vibraciones verticales de los cimientos, puede asumirse como el de un conjunto de resortes perfectamente elásticos y sin peso, representado por un factor de amortiguamiento.

“A partir de estos conceptos, se pueden determinar las características dinámicas de respuesta del suelo, las cuales dependen del módulo de elasticidad transversal, la relación de Poisson, la densidad del suelo, la masa de la base, la amplitud de fuerza de excitación y la forma de distribución de presiones de contacto”. (Fratelli, 1995)

“Aunque actualmente, todas las teorías emplean la hipótesis en donde el suelo es un semi-espacio homogéneo e isótropo, son pocos los suelos que pueden considerarse como tales, dado que el módulo de elasticidad de él varía con la profundidad. Progresivamente se dieron de manera inmediata soluciones para fundaciones apoyadas directamente sobre la superficie o embebidas en un suelo estratificado en capas horizontales gracias al empleo de formulaciones discretas y de computadoras”. (Herrera Castiblanco, 2017).

Un análisis convencional, empleando sólo una relación de masas del sistema suelo-cimiento conduce a un dimensionamiento conservador e ineficiente, ya que no se considera la naturaleza real de las cargas. Del mismo modo, un diseño utilizando el método de una carga estática equivalente (el cual consta en la amplificación de la carga estática por un factor de seguridad dinámico obtenido empíricamente), lleva al mismo resultado.

El método de diseño que se emplea en el presente Proyecto Final es el Método de Análisis Dinámico o Método de Análisis de Vibraciones, el cual modela una cimentación rígida en un semi-espacio elástico homogéneo, a través de un sistema de parámetros agrupados, compuesto por una masa agrupada unida a un resorte y a un amortiguador.

“Este método es consecuencia de profundos estudios de diversos investigadores, quienes, en una primera instancia, modelaron fundaciones en un semiespacio elástico y, posteriormente extendieron sus teorías. Se fundamenta en la teoría lineal de la elasticidad y considera al suelo como un medio semi-infinito, homogéneo, isotrópico y elástico. Además, se encuentra caracterizado por su módulo de corte  $G$  y su relación de Poisson  $\mu$ ”. (Richart et al., 1970).

Los métodos de interés son el Modelo de Richart y el Modelo de Veletsos y Verbic; ambos se encuentran recopilados en el Reporte ACI-351 3R-2018. El primer método se desarrolla a través de modelos de parámetros agrupados en donde la rigidez y el amortiguamiento se representan como constantes.

El segundo, se desarrolla a través de expresiones empíricas aproximadas muy precisas, para obtener, a partir de una cimentación de base circular rígida, los valores de rigidez y de amortiguamiento como funciones de la frecuencia adimensional, es decir, los valores de la impedancia dinámica. Ambos métodos se discutirán en los próximos apartados del Capítulo.

Por último, se mencionarán criterios y recomendaciones para el diseño de maquinaria, expuestos por María G. Fratelli en su libro “*Suelos, Fundaciones y Muros*” (1993) y, por Victor P. Ivanoff en “*Cálculos y proyectos de cimientos para máquinas*” (1963). Estos son:

- La correcta transmisión de esfuerzos desde la máquina hacia la base, se logra a través de una vinculación rígida, mediante el uso de pernos de anclaje, los cuales deberán contar con recubrimiento de espesor mínimo de 10 [cm].
- En bases de máquinas de impacto no se acepta ninguna excentricidad, por lo que, el centro de gravedad de la máquina y la base deben coincidir con el eje del mecanismo de percusión. De esta forma, se logra que las vibraciones producidas en el cimiento sean sólo verticales.
- Los cimientos del tipo bloque, resultan ser los únicos indicados para soportar máquinas de choque o impacto.
- El fondo del cimiento deberá apoyarse en suelo seco y adecuadamente compactado. Se emplazará, al menos, a una distancia de 50 [cm] del nivel freático (de ser necesario se utilizará bombeo mecánico).
- Para evitar perturbaciones en el funcionamiento de los demás equipos y en las construcciones circundantes, deberán respetarse distancias mínimas de emplazamiento entre la base a diseñar y las demás cimentaciones. La distancia mínima será de 30 [cm] desde la base más profunda, y la separación horizontal mínima es de 60 [cm], o el doble del valor del desnivel entre las superficies de apoyo de las bases.

## **5.2. PRE-DIMENSIONADO: DISEÑO GEOMÉTRICO**

El diseño de una cimentación para maquinaria comienza con la determinación de sus dimensiones. Se utilizará el Método de la Relación de masas y las recomendaciones del Reporte ACI-351.3R-2018 para una fundación tipo bloque.

### **5.2.1. Método de Relación de Masas**

El método de la relación de masas, como su nombre lo indica, relaciona la masa del equipo con la del cimiento de hormigón armado.

El procedimiento consiste en suministrar suficiente masa a la base, de forma que las vibraciones indeseables sean absorbidas por el hormigón y se disipen a través del amortiguamiento histérico y por radiación del suelo.

La relación de masas a emplear para el pre-dimensionado de la base, depende del tipo de equipo y si se trata de una fundación superficial o profunda. En la Tabla 5.1 se exponen las relaciones.

**Tabla 5.1:** Relación de masas para equipos reciprocantes y rotativos, según el tipo de fundación.  
(Fuente: elaboración propia).

<b>Tipo de fundación</b>	<b>Equipo</b>	<b>Relación de Masas</b>
<i>Superficial</i>	Rotativo	3:1
	Reciprocante	5:1
<i>Profunda</i>	Rotativo	2,5:1
	Reciprocante	4:1

La finalidad de este procedimiento consiste en garantizar que la frecuencia del suelo-cimiento no se acople con la frecuencia de vibración propia de la máquina, evitando así el fenómeno de resonancia, en orden de poder controlar las amplitudes, sin generar daños al equipo y problemas a los operarios.

Como no es posible modificar la velocidad de operación del equipo, se debe variar la frecuencia del cimiento. Para esto, deberá reducirse o aumentarse la masa del mismo. Por ejemplo, para una determinada área en planta, la frecuencia disminuye cuando se incrementa la altura del cimiento.

### **5.2.2. Recomendaciones Geométricas ACI-351**

El Reporte ACI-351.3R-2018 establece consideraciones geométricas para una cimentación superficial tipo bloque. Estas son:

- La resultante de presiones sobre el cimiento debe ubicarse sobre el tercio medio (núcleo de central de compresión), para evitar el levantamiento.
- El ancho mínimo del cimiento debe ser 1,5 veces la distancia vertical que existe entre el eje del equipo al fondo de la cimentación.
- La distancia entre el centro de gravedad de todo el sistema y el centro geométrico de la fundación debe ser menor al 5% de la menor dimensión en planta del cimiento.
- El espesor mínimo recomendado es el mayor entre:
  - 1/5 de la menor dimensión en planta.
  - 1/10 de la mayor dimensión en planta.
  - 0,60 [m].
- El espesor de la base no debe ser menor a 0,60 [m], o lo requerido por los pernos del equipo.
- El tope de la cimentación debe ser de 0,20 [m] a 0,30 [m] por encima del nivel de piso acabado.

- La fundación será rígida si se cumple la expresión (5.1):

$$h \geq 0,60 + \frac{L}{30} \quad (5.1)$$

Siendo:

- h: el alto de la cimentación.
- L el largo o la mayor dimensión en planta del cimiento [m].

### 5.3. DISEÑO A CARGAS ESTÁTICAS

Al igual que en el diseño dinámico, existen diversas posturas acerca del diseño a cargas estáticas. Varios autores no tienen en cuenta ningún análisis estático en el diseño de una base para equipos dinámicos, por lo que proceden únicamente a realizar un pre-dimensionado seguido inmediatamente por el cálculo de la misma, según métodos dinámicos.

En cambio, otros autores se basan en conceptos de Mecánica de Suelos para comprobar la estabilidad general de una base. Esto implica que se deba verificar:

- 1) Si existe vuelco sobre su punta.
- 2) Si existen fallas de deslizamiento a lo largo de su base.
- 3) Si existen fallas en la capacidad de carga.

Debido a la configuración geométrica y a las características de operación de la máquina elegida, en una prensa mecánica existe una única carga vertical centrada, representada por la caída de la masa sobre la bancada de la prensa. Se evidencia entonces que no existen fuerzas horizontales o verticales adicionales, ni fuerzas de desbalanceo que inciten momentos rotacionales o de torsión (como sucede en equipos rotativos o reciprocantes) que a su vez provoquen momentos de vuelco o efectos de deslizamiento sobre la cimentación a diseñar.

Es por esta razón que el presente Proyecto Final contemplará únicamente el tercer ítem, es decir, verificar que la tensión de trabajo no supere la tensión admisible del terreno.

#### 5.3.1. Verificación de la capacidad de carga

Los siguientes contenidos teóricos se basan en el libro de Fratelli: “*Suelos, fundaciones y muros*” (1993).

Debido a que una masa de suelo no soporta tracciones, pero sí compresiones y esfuerzos cortantes, su capacidad resistente se encuentra íntimamente asociada a su capacidad de soportar dichos esfuerzos. Es por ello que, a medida que la magnitud de las compresiones aumenta, ocurre la falla por corte en alguna superficie interna del suelo.

Se define entonces como *capacidad portante* a aquel estado tensional límite que soporta, más allá del cual se produce la falla por corte del mismo. Es por esta razón que es de gran importancia determinar dicha capacidad, para asegurar la estabilidad del suelo donde se apoyará la base del equipo vibratorio.

A su vez, se denomina *tensión máxima*  $\sigma_{\text{máx}}$  al esfuerzo máximo que determina el límite más allá del cual se produce dicha falla por corte. Sin embargo, el análisis de las fundaciones se basa en el valor de los esfuerzos admisibles  $\sigma_{\text{adm}}$  que son los que el suelo soporta sin excesivos asentamientos y sin fallar por corte, definiendo así la capacidad portante de diseño, por lo que:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{FS} \quad (5.2)$$

En donde el valor del factor de seguridad (FS) varía entre 2,5 para suelos granulares a 3 para suelos cohesivos.

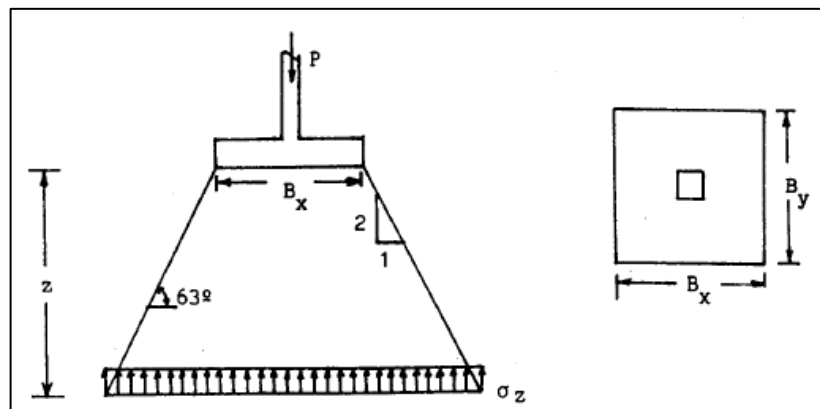
En el presente Proyecto Final, el valor de la tensión admisible del terreno  $\sigma_{adm}$  es proporcionado por el Estudio de Suelos del Anexo A, por lo que sólo resta calcular la tensión de trabajo  $\sigma_z$  a la que está siendo sometido el suelo por acción de la base.

En resumen, verificar la capacidad de carga del suelo equivale a verificar que la tensión de trabajo no supere dicha tensión admisible. Este concepto es mencionado por otras bibliografías como "verificación al hundimiento". Se debe cumplir entonces que:

$$\sigma_z \leq \sigma_{adm} \quad (5.3)$$

El método que se utilizará para estimar el esfuerzo de trabajo o esfuerzo normal vertical en la masa de suelo  $\sigma_z$  se basa en suponer que:

- La carga se encuentra uniformemente distribuida.
- Los esfuerzos dentro de la masa se transmiten como una pirámide truncada, cuyas aristas poseen pendientes entre 1:1 y 2:1.
- La magnitud de los esfuerzos se reduce con la profundidad.
- Fuera de los límites de la pirámide se supone que las presiones debidas a las sobrecargas se desprecian.
- La distribución de  $\sigma_z$  se supone uniforme en el área total de cada plano horizontal contenido dentro de la pirámide de esfuerzos.



**Figura 5.1:** Distribución de esfuerzos en una masa de suelo. (Fuente: extraída de Fratelli, 1993)

La Figura 5.1 muestra la distribución supuesta de los esfuerzos con pendiente 2:1, según la cual el esfuerzo promedio a una profundidad  $z$  dentro del volumen de la pirámide se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma_z = \frac{P}{(B_x+z) \times (B_y+z)} = \frac{W_{m\acute{a}q} + W_{bloque}}{(B_x+z) \times (B_y+z)} \quad (5.4)$$



Siendo:

- $z$ : distancia vertical medida a partir de la base de fundación.
- $B_x$  y  $B_y$ : lados de la base.
- $W_{máq}$  y  $W_{bloque}$ : peso de la máquina y del bloque de cimentación respectivamente.

## 5.4. DISEÑO A CARGAS DINÁMICAS

### 5.4.1. Criterios de Diseño

El objetivo del diseño dinámico de una cimentación de máquina es la determinación de un sistema cimiento-suelo capaz de soportar satisfactoriamente al equipo que sostiene. Esto implica considerar al sistema como un modelo equivalente, concepto que se ampliará en el apartado 5.4.2.

En el procedimiento de diseño se obtiene la respuesta dinámica del sistema. Posteriormente, se analiza si la misma cumple con las condiciones y criterios de diseño elegidos. Es común que antes de obtener un diseño óptimo, se deban desarrollar correcciones sucesivas en el diseño.

Richart et. al. (1970) elaboraron una guía donde enumeran criterios que pueden ser considerados en el diseño de una cimentación cargada dinámicamente. (Figura 5.2)

I) Consideraciones funcionales de la instalación
A. Modos de falla y objetivos de diseño
B. Causas del fracaso
C. Entorno operacional total
D. Costo inicial y su relación con el artículo A
E. Costo de mantenimiento
F. Costo de reemplazo
II) Consideraciones de diseño para instalaciones en las que el equipo produce fuerzas de excitación
A. Capacidad de carga estática
B. Asentamiento estático
C. Capacidad de carga: estática - cargas dinámicas
D. Asentamiento: Estático - Cargas dinámicas repetidas
E. Condiciones dinámicas limitantes
1. Amplitud de vibración a la frecuencia de funcionamiento.
2. Velocidad
3. Aceleración
F. Posibles modos de vibración – efectos de acoplamiento
G. Fallos por fatiga
1. Componentes de la máquina
2. conexiones
3. Estructura de apoyo
H. Exigencias ambientales
1. Efectos fisiológicos en las personas
2. Efectos psicológicos en las personas
3. Equipo sensible cercano
4. Resonancia de componentes estructurales
III) Consideraciones de diseño para la instalación de equipos sensibles
A. Limitación de las amplitudes de desplazamiento, velocidad o aceleración
B. Vibraciones ambientales
C. Posibles cambios en las vibraciones ambientales
1. por construcción
2. por equipo nuevo
D. Aislamiento de cimientos
E. Aislamiento local de máquinas individuales

**Figura 5.2:** Lista de verificación de los criterios de diseño. (Fuente: adaptada de Richart et. al., 1970).

Los criterios de diseño más divulgados, son aquellos en donde la respuesta dinámica de la cimentación se expresa en función de amplitudes de vibración, referidas a desplazamientos, velocidades o aceleraciones, alrededor y sobre la base.

De esta forma, se busca cuantificar y caracterizar la severidad de las vibraciones obtenidas en el diseño de la cimentación, de forma que no presenten un riesgo para el personal o el equipo.

#### **5.4.1.1. Relación de frecuencias**

La relación de frecuencias, en la actualidad es el método más utilizado y aceptado internacionalmente. En el mismo se relaciona la frecuencia de operación respecto a la frecuencia natural del suelo-cimiento.

Para la verificación del mismo, es requisito indispensable que se cumpla que la frecuencia natural esté entre un 20 a un 30% fuera de la velocidad de operación. En consecuencia, la frecuencia natural del sistema suelo-cimentación debe encontrarse fuera del límite de 0,80 a 1,20 veces la frecuencia de operación del equipo.

Si existiese potencial de resonancia, es decir que la relación de frecuencias sea cercana al valor de la unidad, se deberán ajustar las dimensiones del cimiento, aumentando o disminuyendo las mismas.

El uso exclusivo del criterio de la relación de frecuencias para evaluar la cimentación, puede llevar a diseños erróneos, ya que es posible que, aun verificándose este criterio, existan problemas de vibraciones, incluso cuando no exista riesgo de resonancia.

#### **5.4.1.2. Desempeño ante vibraciones**

Como se mencionó anteriormente, el diseño de cimientos para máquinas se basa en limitar las amplitudes de las vibraciones producidas por las fuerzas de excitación. Para esto, se emplea en el presente Proyecto Final el Control de Amplitudes de Desplazamientos, donde las limitaciones de las mismas, están basadas en amplitudes picos, medidas en [Mills] (0,001[in]) o en milímetros [mm].

Ivanoff indica utilizar los valores de amplitudes admisibles de Barkan, los cuales propuso como resultado de numerosos ensayos de martillos mecánicos, que posteriormente fueron introducidos en las Especificaciones Técnicas Rusas del año 1962. Las mismas establecían que el valor de la amplitud  $A$ , obtenida como respuesta dinámica, debe ser menor o igual al valor de las amplitudes admisibles  $A_{adm}$ , por lo tanto:

$$A \leq A_{adm} \quad (5.5)$$

Donde  $A_{adm}$  adquiere un valor que varía de 1,00 [mm] hasta 1,20 [mm].

Por otra parte, el Reporte ACI-351.3R-2018 menciona los siguientes criterios de evaluación de amplitudes de desplazamientos:

- El criterio de Blake (1964) modificado por Arya, O'Neill y Pincus (1979).
- La Gráfica de Severidad de Vibración de Maquinaria de Baxter y Bernhard (1967).
- La Gráfica de Reiher-Meister (1931), modificada por Richart (1962).

Dichas gráficas se muestran en la Figura 5.3, Figura 5.4 y Figura 5.5, respectivamente. Todas se emplean de la misma forma: se ingresa con la amplitud del sistema, obtenida a través de la respuesta dinámica y con el valor de la frecuencia de operación del equipo, para corroborar las condiciones de diseño obtenidas.

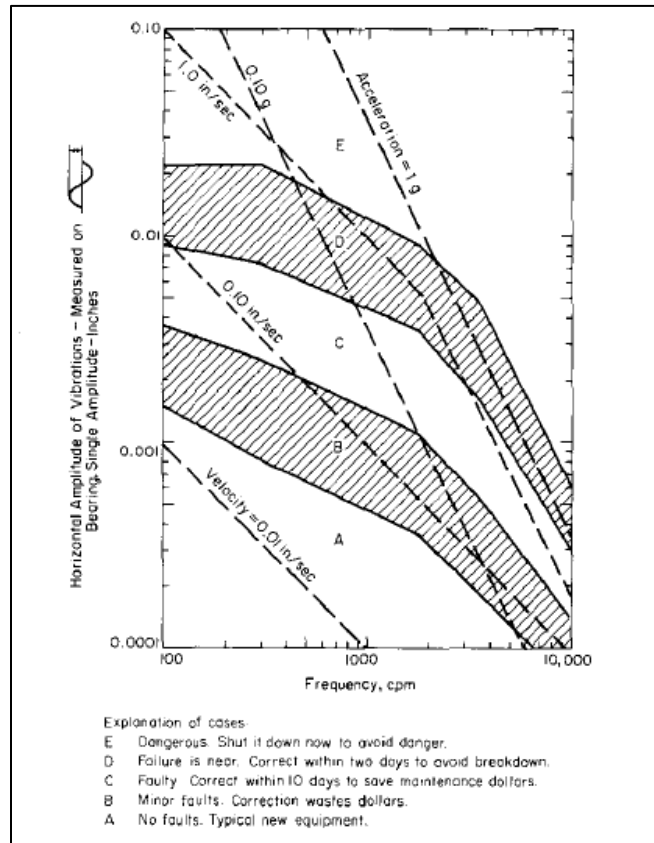


Figura 5.3: Gráfico para control de amplitudes, criterio de Blake, modificado Arya, O'Neill y Pincus. (Fuente: extraída de Richart et. al., 1970).

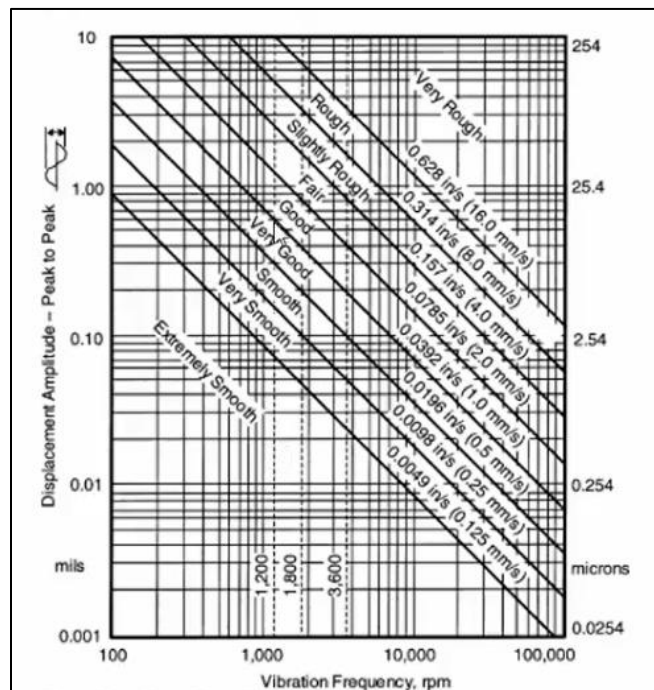
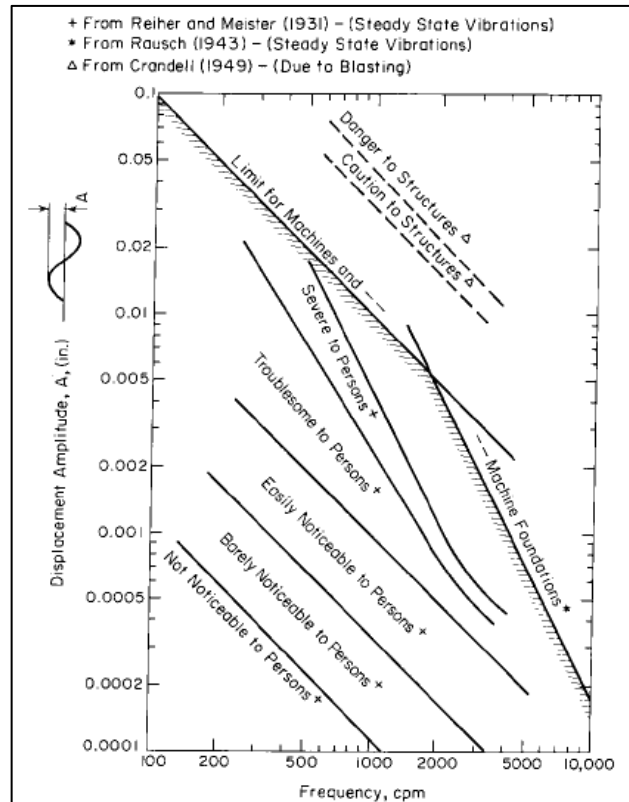


Figura 5.4: Gráfica de Severidad de Vibración de Maquinaria de Baxter y Bernhard. (Fuente: extraída de Richart et. al., 1970).



**Figura 5.5:** Gráfica de Reisher-Meister, modificada por Richart. (Fuente: extraída de Richart et. al., 1970).

No existe un criterio universal adoptado para la verificación de amplitudes, por lo que diversos autores recomiendan emplear el Criterio de Blake cuando el diseño de la cimentación posee requerimientos específicos. El mismo se basa en mantener la amplitud de vibración dentro de límites aceptables para el equipo.

Este método se desarrolló para maquinaria rotativa, y puede utilizarse para establecer las amplitudes permisibles de movimiento para una velocidad de operación dada. Los valores de amplitud están referidos a los movimientos horizontales, medidos en el soporte del equipo. La Figura 5.3 muestra un diagrama de Amplitud vs. Frecuencia, donde el mismo se divide en las categorías de desempeño de la A hasta la E, que se describen a continuación:

- A: equipo sin defectos, típico de equipo nuevo.
- B: equipo con defectos menores, corrección implica desperdicio de dinero.
- C: equipo defectuoso, corrección en menos de 10 días para evitar gastos de mantenimiento.
- D: equipo con falla próxima, debe corregirse dentro de 2 días para evitar daños.
- E: equipo peligroso, debe salir inmediatamente de funcionamiento.

Con la introducción del uso del factor de servicio propuesto por Blake, empleado como un coeficiente de mayorización, el gráfico, puede emplearse para evaluar el rendimiento de una amplia gama de equipos. La elección del factor de servicio depende del tipo de máquina y de la condición de anclaje en la cimentación. En la Tabla 5.2 se muestran los valores de los factores de servicio.

**Tabla 5.2:** Factores de servicio. (Fuente: extraída de Richart et. al., 1970).

Tipo de Equipo	Equipo anclado	Equipo no anclado
Bomba centrífuga de una etapa, motor eléctrico, ventilador	1,00	0,40
Equipo típico de procesamiento químico, no crítico	1,00	0,40
Turbina, turbogenerador, compresor centrífugo	1,60	0,80
Centrífuga, eje rígido; bomba centrífuga multi-etapa	2,00	0,80
Equipo diverso, características desconocidas	2,00	0,80
Centrífuga, suspendida en el eje, en el eje cerca de la canasta	0,50	0,20
Centrífuga, suspendida con eslabones, suspendida	0,30	0,10

Tanto el criterio de Severidad de Vibración de Maquinarias (Figura 5.4), como el criterio de Blake, están basados en el funcionamiento de un equipo rotativo. Se ingresa a la gráfica de igual manera: se obtiene la amplitud del sistema y se corrobora en el área en que se encuentra el diseño.

La gráfica de la Figura 5.5 de Reiher - Meister, modificada por Richart, clasifica las zonas en función a la percepción de las personas u operarios. La misma muestra cinco curvas que limitan las zonas para diferentes sensibilidades de respuesta de las personas, que van desde "no perceptible" a "severa". Estas categorías son para personas de pie y sometidas a vibraciones verticales.

El límite entre "no perceptible" y "apenas perceptible" se define mediante una línea que representa una velocidad máxima de aproximadamente 0,01 [pulg/s] o 0,000254 [m/s]. La línea que divide las zonas de "fácilmente perceptible" y "problemático" representa una velocidad máxima de 0,10 [pulg/s] o 0,00254 [m/s].

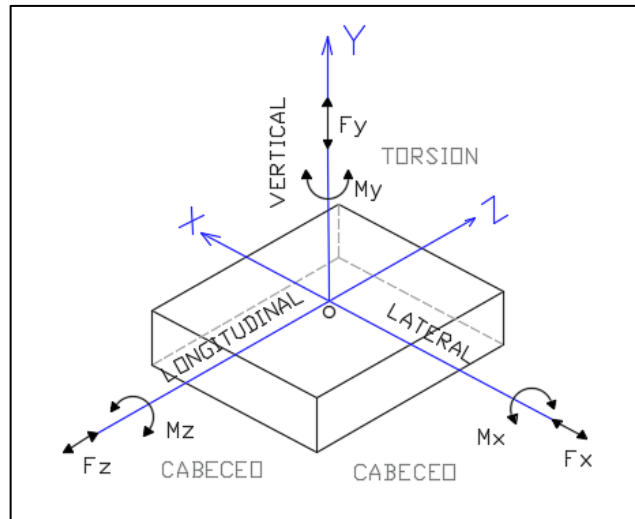
La envolvente descrita por la línea sombreada "límite para máquinas y cimientos de máquinas" indica un límite para la seguridad y no un límite para el funcionamiento satisfactorio de las máquinas.

El límite sombreado para las máquinas se compone de dos líneas rectas. Por debajo de aproximadamente 2000 ciclos/min, este límite representa una velocidad máxima de 10 [pulg/s] o 0,254 [m/s] y por encima de 2000 ciclos/min corresponde a una aceleración máxima de 0,5g.

Por último, esta gráfica contiene dos curvas para indicar condiciones dinámicas limitantes asociadas con explosiones. La línea en el límite inferior de la zona "precaución a las estructuras" corresponde a una velocidad máxima de 3 [m/s].

#### 5.4.2. Modelo matemático

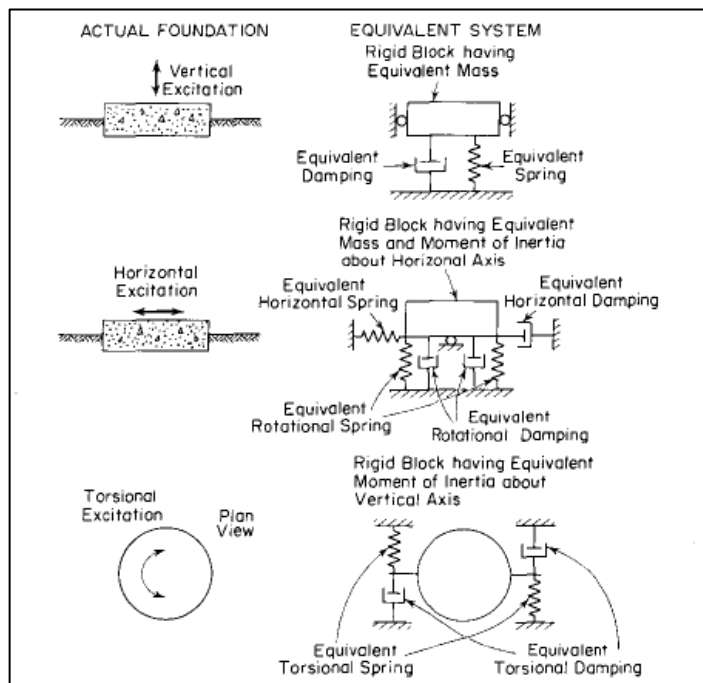
Un cimiento rígido tipo bloque, en función de las fuerzas dinámicas que actúen sobre él, puede presentar hasta seis grados de libertad, es decir, seis modos de vibración. Existen tres modos traslacionales (desplazamiento vertical, lateral, y longitudinal) y tres modos rotacionales (torsión, cabeceo en el eje x, y cabeceo en el eje z), como se observa en la Figura 5.6.



**Figura 5.6:** Modos de vibración de un bloque de cimentación. (Fuente: adaptada de ACI 351, 2018).

“Los modos de vibración pueden ocurrir simultáneamente o presentarse de forma individual en distintos tiempos. Tanto la traslación a lo largo del eje vertical como la rotación en este eje, son independientes de cualquier otro movimiento, mientras que los movimientos en los demás ejes (x, z), la traslación y la rotación actúan juntos, denominados modos acoplados”. (Prakash 1981).

Como se mencionó anteriormente, el modelo matemático a emplear corresponde a un sistema de parámetros agrupados, constituido por una masa agrupada unida a un resorte y a un amortiguador. En la Figura 5.7 se evidencia que todos los modos de vibración pueden representarse mediante estos parámetros.



**Figura 5.7:** Fundación representada por sistema amortiguado de parámetros agrupados, sometida a esfuerzos dinámicos: vertical, horizontal y torsional. (Fuente: extraída de Richart et. al., 1970).

La masa agrupada se emplea en modos de vibración traslacional. La misma integra la masa del cimientado y la masa del equipo, y en algunos casos, una porción de masa de suelo circundante. Su comportamiento depende de la naturaleza del resorte y del amortiguador. En caso de modos de vibración rotacionales, se debe emplear el momento de inercia de la masa agrupada.

El resorte se representa con la constante de rigidez y hace referencia a la reacción del suelo que se encuentra debajo de la base. Cada modo de vibración inducirá una condición específica en el suelo, los cuales se mencionan en la Tabla 5.3.

**Tabla 5.3:** Esfuerzos producidos en el suelo, según el modo de vibración de la base. (Fuente: Maldonado Pacheco, Figueroa Tapia, (2020). Diseño de la cimentación de una bomba centrífuga horizontal empleando el método del semiespacio elástico. Tesis de grado. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa).

Modo de vibración	Esfuerzo
Vertical	Compresión uniforme
Horizontal	Cortante uniforme
Balaceo	Compresión no uniforme
Torsión	Cortante no uniforme

### 5.4.3. Modelo de Richart

Este modelo, propuesto por Richart en el año 1970, contempla un sistema de un solo grado de libertad (1GL) con los parámetros de rigidez y amortiguamiento independientes de la frecuencia, para un cimientado circular rígido ubicado sobre un semiespacio elástico homogéneo.

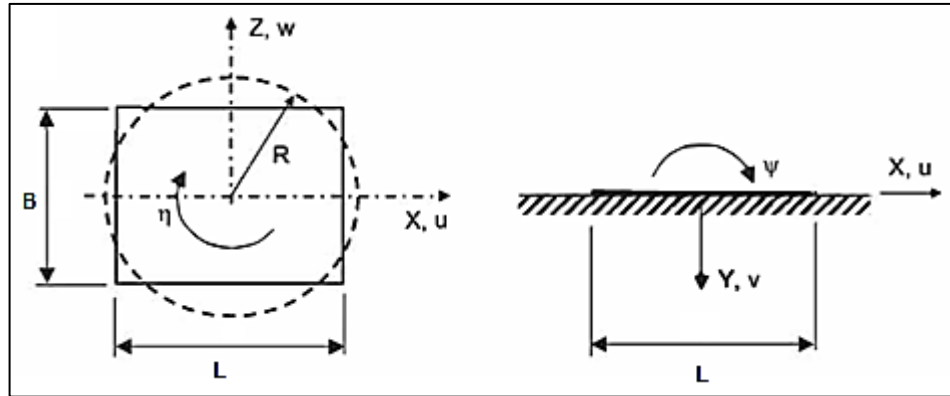
Es utilizado para dimensionar bases que soporten equipos de bajas frecuencias de operación. El Reglamento ACI 351.3R-2018 recomienda su uso cuando el valor de la frecuencia adimensional  $a_0$  de Reissner, expresada por la ecuación (5.6), está comprendida entre:  $0 < a_0 < 1$ .

$$a_0 = \omega \times r_0 \sqrt{\frac{\rho}{G}} = \frac{\omega \times r_0}{v_s} \quad (5.6)$$

Donde:

- $a_0$ : Frecuencia adimensional.
- $\omega$ : Frecuencia angular de la fuerza dinámica.
- $r_0$ : Radio de área circular de cimentación.
- $v_s$ : Velocidad de propagación de ondas de corte en el suelo.

Para el análisis de un cimientado rectangular sometido a una carga dinámica, implica considerar a dicho elemento como una cimentación circular, con propiedades equivalentes, como se indica en la Figura 5.8. El radio equivalente R es el mismo para las tres direcciones de traslación y, es diferente para cada dirección de rotación.



**Figura 5.8:** Cimentación circular equivalente. (Fuente: extraída de ACI-351, 2018).

En la ecuación (5.7) se determina el radio equivalente para el movimiento de traslación. Los radios equivalentes del movimiento de Balanceo y de Torsión se expresan en las Ecuaciones (5.8), (5.9) y (5.10) respectivamente.

Traslación 
$$r_{y,x,z} = \sqrt{\frac{L \times B}{\pi}} \quad (5.7)$$

Cabeceo, paralelo a dirección L 
$$r_{\psi} = \sqrt[4]{\frac{L \times B^3}{3 \times \pi}} \quad (5.8)$$

Cabeceo, paralelo a dirección B 
$$r_{\psi} = \sqrt[4]{\frac{B \times L^3}{3 \times \pi}} \quad (5.9)$$

Torsión 
$$r_{\eta} = \sqrt[4]{\frac{L \times B \times (L^2 + B^2)}{6 \times \pi}} \quad (5.10)$$

Estas equivalencias permiten cálculos precisos para cimientos cuadrados y rectangulares de relación  $L/B \leq 2$ . Por encima de ese valor, la precisión del análisis disminuye.

En el caso de un análisis aproximado a bajas frecuencias, la teoría establece que puede emplearse la constante de rigidez estática. Las constantes de rigidez empleadas en este método se expresan con las ecuaciones (5.11), (5.12), (5.13) y (5.14), a continuación.

Vertical (Dirección Y) 
$$k_y = \frac{4 \times G \times r_y}{(1 - \mu)} \quad (5.11)$$

Horizontal (Dirección X y Z) 
$$k_{x,z} = \frac{32 (1 - \mu) \times G \times r_{x,z}}{(7 - 8 \times \mu)} \quad (5.12)$$



Cabeceo (Respecto de X y Z) 
$$k_{\psi} = \frac{8 \times G \times r_{\psi}^3}{3 \times (1-\mu)} \quad (5.13)$$

Torsión (Respecto de Y) 
$$k_{\eta} = \frac{16 \times G \times r_{\eta}^3}{3} \quad (5.14)$$

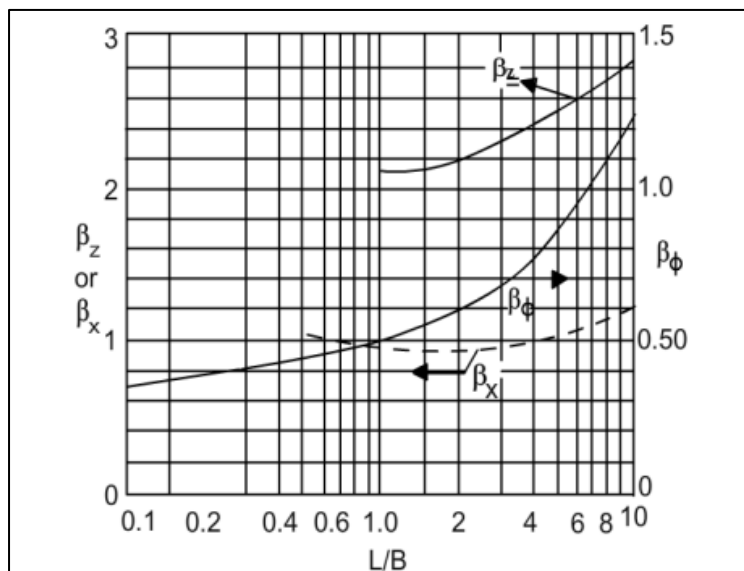
En el caso que una cimentación posea una relación de lados  $L/B > 2$ , deberán emplearse las constantes de rigidez de las expresiones (5.15), (5.16) y (5.17).

Vertical (Dirección Y) 
$$k_y = \frac{G}{(1-\mu)} \times \beta_y \sqrt{L \times B} \quad (5.15)$$

Horizontal (Dirección X, Z) 
$$k_{x,z} = 4 \times (1-\mu) \times G \times \beta_{x,z} \sqrt{L \times B} \quad (5.16)$$

Cabeceo (Respecto de X, Z) 
$$k_{\psi} = \frac{G}{(1-\mu)} \times \beta_{\psi} \times 8 \times L \times B^2 \quad (5.17)$$

Donde  $\beta$  es un coeficiente de forma, dependiente del modo de vibración. Estos coeficientes son propuestos por Richart, Hall y Wood (1970), y se obtienen del gráfico de la Figura 5.9.



**Figura 5.9:** Valores sugeridos del coeficiente de forma  $\beta$ . (Fuente: extraída de Richart et. al., 1970)

Al igual que los valores de rigidez, los valores de amortiguamiento se estudiaron para una cimentación rígida de sección circular. La relación de amortiguamiento  $D_i$ , para las  $i$  direcciones de estudio, se expresan en las Ecuaciones (5.18), (5.19), (5.20) y (5.21).

$$\text{Vertical (Dirección Y)} \quad D_y = \frac{0,425}{\sqrt{M_y}} \quad (5.18)$$

$$\text{Horizontal (Dirección X y Z)} \quad D_{x,z} = \frac{0,288}{\sqrt{M_{x,z}}} \quad (5.19)$$

$$\text{Cabeceo (Respecto de X y Z)} \quad D_\psi = \frac{0,150}{(1+B_\psi)\sqrt{M_\psi}} \quad (5.20)$$

$$\text{Torsión (Respecto de Y)} \quad D_\eta = \frac{0,500}{(1+2M_\eta)} \quad (5.21)$$

Donde M es la relación de masa. La misma se calcula para cada dirección, con el empleo de las expresiones (5.22), (5.23), (5.24) y (5.25).

$$\text{Vertical (Dirección Y)} \quad M_y = \frac{(1-\mu)}{4} \times \frac{m}{\rho \times r_y^3} \quad (5.22)$$

$$\text{Horizontal (Dirección X y Z)} \quad M_{x,z} = \frac{(7-8\mu)}{32 \times (1-\mu)} \times \frac{m}{\rho \times r_{x,z}^3} \quad (5.23)$$

$$\text{Cabeceo (Respecto de X y Z)} \quad M_\psi = \frac{3(1-\mu)}{8} \times \frac{I_\psi}{\rho \times r_\psi^5} \quad (5.24)$$

$$\text{Torsión (Respecto de Y)} \quad M_\eta = \frac{I_\eta}{\rho \times r_\eta^5} \quad (5.25)$$

Donde:

- $m$ : masa de equipo-cimiento.
- $\rho$ : densidad masa de suelo.
- $\mu$ : relación de Poisson.
- $I$ : momento de inercia de la masa equipo-cimiento.
- $r_i$ : radio equivalente según dirección.

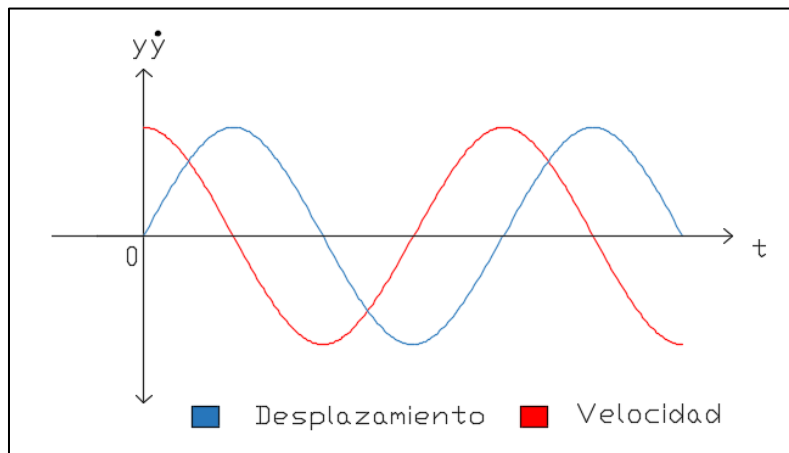
#### 5.4.4. Impedancia Dinámica

Según el Reporte ACI 351.3R-2018, la *impedancia* es la respuesta de vibración de una base infinitamente rígida apoyada en el suelo, la cual se encuentra sometida a un esfuerzo dinámico. Es la razón entre la reacción del suelo (R) y la deformación armónica del suelo de apoyo (U).

$$S = \frac{R(t)}{U(t)} \quad (5.26)$$

La ecuación de movimiento para un sistema amortiguado con vibración forzada, es la expresada por la ecuación (2.24) del Capítulo 2. En dicha ecuación, se denota que la componente de amortiguamiento está relacionada con la velocidad  $c\dot{y}$  y la componente de rigidez con el desplazamiento  $ky$ .

De lo mencionado en el Capítulo 2, se evidencia que cuando la velocidad es máxima, el desplazamiento es cero, y cuando el desplazamiento es máximo la velocidad es cero, concluyendo que existe una diferencia de fases de  $90^\circ$  entre la velocidad y el desplazamiento del sistema suelo-cimiento, como lo ilustra la Figura 5.10.



**Figura 5.10:** Gráfica de desplazamiento / velocidad vs tiempo – Diferencia de fases. (Fuente: elaboración propia).

Es por esto que la impedancia se expresa con una función compleja, ya que matemáticamente la notación en números complejos permite englobar en una única ecuación la información de magnitud y fase.

La impedancia se expresa en la ecuación (5.27) y relaciona la rigidez dinámica del sistema (parte real) con el amortiguamiento (parte imaginaria):

$$S_i^* = k_i + (c_i \omega) i \quad (5.27)$$

Donde:

- $k_i$ : rigidez dinámica.
- $\omega$ : frecuencia angular de operación.
- $c_i$ : amortiguamiento del material (amortiguamiento por radiación e histerético del suelo).

Se define a la *rigidez dinámica* como la fuerza restauradora total generada por un depósito de suelo. La misma corresponde a la sumatoria de la fuerza elástica y la fuerza de inercia de la masa del mismo.

Si el desplazamiento varía armónicamente, en ausencia de amortiguación, se obtiene como resultado que la rigidez dinámica es:

$$k_i = k_{st} - m \times \omega^2 \quad (5.28)$$

El suelo manifestará entonces, parámetros de rigidez que son dependientes de la frecuencia del equipo. Las características y la magnitud de este efecto de frecuencia dependen de distintos factores como el tamaño de la geometría de la cimentación, el modo de vibración, las capas del suelo, entre otros.

El amortiguador de la Figura 5.7, se representa como un amortiguador viscoso, el cual produce fuerzas proporcionales a la velocidad de vibración  $\dot{y}$  de la masa. La magnitud de la fuerza de amortiguamiento se da por la ecuación (2.24). En el caso de las vibraciones armónicas, la fuerza de amortiguamiento viscoso en función del tiempo es:

$$c\dot{y} = -c y_0 \omega \text{sen } \omega t \quad (5.29)$$

La ecuación (5.29) demuestra que la amplitud de la fuerza de amortiguación viscosa es proporcional a la frecuencia. Ambos coeficientes son dependientes de la frecuencia de vibración  $\omega$  del equipo. Esto indica que, para distintos valores de operación del equipo a cimentar, se obtienen distintos valores de coeficientes de rigidez y de amortiguamiento.

#### 5.4.5. Modelo de Veletsos y Verbic

Veletsos y Verbic determinaron expresiones analíticas complejas, dependientes de la frecuencia de operación, la relación de Poisson del suelo, y el amortiguamiento del cimiento, como resultado de relacionar un medio visco-elástico con modelos de rigidez amortiguada.

La respuesta de una cimentación rígida sometida a cargas dinámicas, se obtiene empleando el concepto de impedancia, definida en el apartado 5.4.4. Veletsos y Verbic proponen analizar el sistema suelo-cimiento considerando dos soluciones:

- Solución A: se obtienen funciones de impedancia donde no se considera a la cimentación enterrada, sino simplemente apoyada en el suelo.
- Solución B: se obtienen funciones de impedancia donde se considera que parte de la cimentación se encuentra enterrada en el suelo.

Los valores de impedancia se componen de la rigidez dinámica y amortiguamiento. Éstos se obtienen de analizar dos casos:

- Caso 1: Cálculo de valores de rigidez dinámica  $k_i$  y amortiguamiento  $c_i$ , sin considerar el amortiguamiento del material.
- Caso 2: Cálculo de los valores de rigidez dinámica ajustada ( $k_i^{\text{ajustado}}$ ) y amortiguamiento ajustado ( $c_i^{\text{ajustado}}$ ) considerando el aporte de amortiguación del material. Se determinan a partir de los valores obtenidos anteriormente.

La impedancia total del sistema, para cada dirección  $i$  de vibración, corresponde a la suma de los coeficientes de rigidez dinámica y de amortiguamiento ajustados de las soluciones A y B. A continuación, se exponen las fórmulas empleadas para este método.

##### 5.4.5.1. Caso 1 – Solución A

Las funciones de impedancia se expresan en las Ecuaciones (5.30), (5.33), (5.34) y (5.37), donde la parte real es la rigidez dinámica ( $kA_i$ ) y la parte compleja el amortiguamiento ( $cA_i$ ) del sistema.

Los términos principales de las funciones de impedancia, sin considerar el embebido de la cimentación, corresponden con la rigidez estática de la base para la vibración en esa dirección.

Para la vibración vertical, oscilante y de torsión, estos términos son los mismos que se presentan en el modelo de Richart. Para el movimiento horizontal, existe una pequeña diferencia debido a los supuestos sobre la rigidez de la cimentación. (ACI 351.3R-2018)

Los valores de los coeficientes  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $b_1$  y  $b_2$  son valores sugeridos por Veletsos (1971) y dependen de la relación de Poisson  $\mu$ , excepto los valores de  $b_1$  y  $b_2$ . Se expresan en la Tabla 5.4.

Impedancia Vertical	$S_{A_y}^* = \frac{4 G r_y}{(1 - \mu)} \left[ (1 - X_y - \gamma_3 a_0^2) + i a_0 (\gamma_4 + \psi_y) \right]$	(5.30)
------------------------	---	--------

$$X_y = \frac{\gamma_1 (\gamma_2 \times a_0)^2}{1 + (\gamma_2 \times a_0)^2} \quad (5.31)$$

$$\psi_y = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (\gamma_2 \times a_0)^2}{1 + (\gamma_2 \times a_0)^2} \quad (5.32)$$

Impedancia Horizontal	$S_{A_{x,z}}^* = \frac{8 G r_{x,z}}{(1 - \mu)} [1 + i a_0 \alpha_1]$	(5.33)
--------------------------	--	--------

Impedancia al Cabeceo	$S_{A_\psi}^* = \frac{8 G r_\psi^3}{3 \times (1 - \mu)} \left[ (1 - X_\psi - \beta_3 a_0^2) + i a_0 \psi_\psi \right]$	(5.34)
--------------------------	--	--------

$$X_\psi = \frac{\beta_1 (\beta_2 \times a_0)^2}{1 + (\beta_2 \times a_0)^2} \quad (5.35)$$

$$\psi_\psi = \frac{\beta_1 \beta_2 (\beta_2 \times a_0)^2}{1 + (\beta_2 \times a_0)^2} \quad (5.36)$$

Impedancia Torsional	$S_{A_\eta}^* = \frac{16 G r_\eta^3}{3} [A + i a_0 B]$	(5.37)
-------------------------	--	--------

$$A = 1 - \frac{b_1 (b_2 \times a_0)^2}{1 + (b_2 \times a_0)^2} \quad (5.38)$$

$$B = \frac{b_1 b_2 (b_2 \times a_0)^2}{1 + (b_2 \times a_0)^2} \quad (5.39)$$

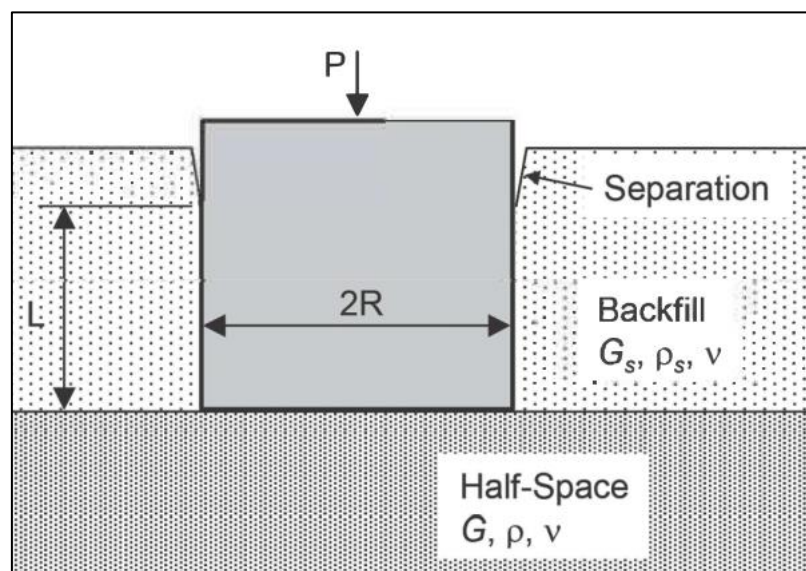
**Tabla 5.4:** Valores de coeficientes para cálculo de Impedancia. (Fuente: extraída de Veletsos, 1971)

	$\mu = 0$	$\mu = 0,33$	$\mu = 0,45$	$\mu = 0,50$
$\alpha_1$	0,775	0,650	0,600	0,600
$\beta_1$	0,525	0,500	0,450	0,400
$\beta_2$	0,800	0,800	0,800	0,800
$\beta_3$	0,000	0,000	0,023	0,027
$\gamma_1$	0,250	0,350	-	0,000
$\gamma_2$	1,000	0,800	-	0,000
$\gamma_3$	0,000	0,000	-	0,170
$\gamma_4$	0,850	0,750	-	0,850
$b_1$	0,425	0,425	0,425	0,425
$b_2$	0,687	0,687	0,687	0,687

#### 5.4.5.2. Caso 1 – Solución B

Habitualmente las cimentaciones no descansan directamente sobre el suelo, sino que las mismas se encuentran parcialmente enterradas. Diversos autores han desarrollado estudios que han demostrado que el embebido de la cimentación en el suelo, aumenta la rigidez y, en mayor medida, el amortiguamiento.

El Reporte ACI 351.3R-2018, recomienda que la profundidad de empotramiento efectiva debe ser menor a la cota de fundación, es decir, la profundidad de emplazamiento de la misma. Esto se debe a que, en la superficie de la base, el suelo se separa de ella debido a la falta de presión de confinamiento en la superficie, como lo ilustra la Figura 5.11.



**Figura 5.11:** Esquema de cimentación empotrada en el suelo. (Fuente: adaptada de ACI 351-3R, 2018).

De igual forma que la analogía de la base circular empleada anteriormente, las ecuaciones que describen la resistencia lateral para un cilindro embebido son las expresiones (5.40), (5.41), (5.42) y (5.43), donde de igual manera que en el apartado anterior, la parte real corresponde a la rigidez dinámica ( $k_B$ ) y la parte compleja, al amortiguamiento ( $c_{B_i}$ ) del sistema.

$$\begin{array}{l} \text{Impedancia} \\ \text{Vertical} \end{array} \quad S_{B_y}^* = G_s \times L_{emb} \times [S_{y1} + i a_0 S_{y2}] \quad (5.40)$$

$$\begin{array}{l} \text{Impedancia} \\ \text{Horizontal} \end{array} \quad S_{B_{x,z}}^* = G_s \times L_{emb} \times [S_{u1} + i a_0 S_{u2}] \quad (5.41)$$

$$\begin{array}{l} \text{Impedancia} \\ \text{al Cabeceo} \end{array} \quad S_{B_\psi}^* = G_s \times r_\psi^2 \times L_{emb} \times [S_{\psi1} + i a_0 S_{\psi2}] \quad (5.42)$$

$$\begin{array}{l} \text{Impedancia} \\ \text{Torsional} \end{array} \quad S_{B_\eta}^* = G_s \times r_\eta^2 \times L_{emb} \times [S_{\eta1} + i a_0 S_{\eta2}] \quad (5.43)$$

En las expresiones anteriores, el módulo de corte dinámico  $G_s$  es el del suelo lateral y puede tratarse de un suelo de relleno. Los parámetros adimensionales  $S_{i1}$  y  $S_{i2}$  se relacionan con la rigidez dinámica y el amortiguamiento, parte real e imaginaria respectivamente.

Dichos parámetros dependen de la frecuencia adimensional  $a_0$  y del amortiguamiento del material del que está compuesto el suelo lateral. En la tabla 5.6 se expresan los valores de  $S_i$  que son válidos para valores de  $0,5 < a_0 < 1,5$ , y de  $0,25 < \mu < 0,40$ .

**Tabla 5.5:** Parámetros de rigidez y amortiguamiento ( $D=0$ ). (Fuente: extraída de ACI 351, 2018).

Vibración	Suelo	Coeficiente Lateral	
Horizontal	Cohesivo	$S_{u1} = 4,10$	$S_{u2} = 10,60$
	Granular	$S_{u1} = 4,00$	$S_{u2} = 9,10$
Cabeceo	Cohesivo	$S_{\psi1} = 2,50$	$S_{\psi2} = 1,80$
	Granular	$S_{\psi1} = 2,50$	$S_{\psi2} = 1,80$
Torsión	Cohesivo	$S_{\eta1} = 10,20$	$S_{\eta2} = 5,4$
	Granular	$S_{\eta1} = 10,20$	$S_{\eta2} = 5,4$
Vertical	Cohesivo	$S_{y1} = 2,70$	$S_{y2} = 6,70$
	Granular	$S_{y1} = 2,70$	$S_{y2} = 6,70$

### 5.4.5.3. Caso 2 – Solución A Y B

Una vez que se han determinado los coeficientes de rigidez y amortiguamiento, se determinan ahora los parámetros de rigidez dinámica ajustada y amortiguamiento ajustado para la solución A ( $k_{A_i}^{ajustada}$  y  $c_{A_i}^{ajustado}$ ) y la solución B ( $k_{B_i}^{ajustada}$  y  $c_{B_i}^{ajustado}$ ), teniendo en cuenta el aporte del cimientto al considerar el amortiguamiento interno del material.

Para ello se emplean las Ecuaciones (5.44) y (5.45), en ambas soluciones, para cada dirección de vibración.

$$\begin{array}{l} \text{Rigidez} \\ \text{Ajustada} \end{array} \quad k_i^{\text{ajustada}} = k_i - [2 \times \beta \times c_i \times \omega] \quad (5.44)$$

$$\begin{array}{l} \text{Amortiguamiento} \\ \text{Ajustado} \end{array} \quad c_i^{\text{ajustado}} = c_i + \left[ 2 \times \beta \times \frac{k_i}{\omega} \right] \quad (5.45)$$

Donde  $\beta$  es la fracción de amortiguamiento previamente definida en el Capítulo 4.

#### 5.4.5.4. Impedancia total

El método de Veletsos y Verbic establece que la impedancia total ( $k_i^{\text{total}}$  y  $c_i^{\text{total}}$ ) del sistema en cada dirección de movimiento se obtiene sumando los valores ajustados obtenidos en el Caso 2, de la solución A y B, respectivamente:

$$\begin{array}{l} \text{Rigidez} \\ \text{Dinámica Total} \end{array} \quad k_i^{\text{total}} = k_{A_i}^{\text{ajustada}} + k_{B_i}^{\text{ajustada}} \quad (5.46)$$

$$\begin{array}{l} \text{Amortiguamiento} \\ \text{Total} \end{array} \quad c_i^{\text{total}} = c_{A_i}^{\text{ajustado}} + c_{B_i}^{\text{ajustado}} \quad (5.47)$$

#### 5.4.6. Amplitudes del Sistema

De lo estudiado en el Capítulo 2, la ecuación (2.27) expresa la solución particular para determinar la amplitud de deformación de un sistema amortiguado sometido a cargas armónicas. Reescribiéndola se obtiene la expresión (5.48):

$$y(t) = \frac{F}{k_i^{\text{total}}} \times M \times \text{sen}(\omega t) \quad (5.48)$$

Donde:

- $F$ : fuerza dinámica ejercida por la máquina a cimentar, definida en el Capítulo 3.
- $k_i^{\text{total}}$ : rigidez dinámica del sistema.
- $M$ : factor dinámico de amplificación.

La amplitud será máxima cuando la función seno vale 1. Reemplazando en la expresión (5.48) y renombrándola por  $A$ , nos queda:

$$y_{\text{máx}}(t) = A = \frac{F}{k_i^{\text{total}}} \times M \quad (5.49)$$

El factor de amplificación dinámico  $M$ , se definió en el capítulo 2 con la letra  $D$ , en la expresión (2.30). De ahora en adelante, será denominado con la letra  $M$ :

$$D = M = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (5.50)$$



Donde:

- $\xi$  es la razón de amortiguamiento para un movimiento con fuerza excitadora interior.

$$\xi = \frac{c_i^{total}}{2 \times \sqrt{k_i^{total} \times \frac{W}{g}}} \quad (5.51)$$

- $r$  es la razón de frecuencias:

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (5.52)$$

- $\omega_n$  es la frecuencia natural de la cimentación:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_i^{total}}{\frac{W}{g}}} \quad (5.53)$$

Donde:

- $\omega$ : es la frecuencia de operación del equipo.
- $W$ : corresponde a la masa total agrupada (cimiento y equipo) en toneladas.
- $g$ : hace referencia a la aceleración por gravedad.

#### 5.4.7. Fuerza transmitida al cimiento

La fuerza dinámica del equipo, transmitida a la base, se transfiere a través del resorte y del amortiguador. Por lo tanto, la fuerza total transmitida es:

$$F_{tc\ total} = ky + c\dot{y} \quad (5.53)$$

Diferenciando la ecuación anterior y realizando pasos algebraicos, la fuerza máxima transmitida al cimiento  $F_{tc}$  se determina mediante la ecuación (5.54):

$$F_{tc} = M \times F \times \sqrt{1 + (2 \xi r)^2} \quad (5.54)$$

Donde:

- $F$ : es la fuerza impulsiva del equipo, definida en el Capítulo 3.
- $M$ : factor dinámico de amplificación.
- $\xi$ : es la razón de amortiguamiento para un movimiento con fuerza excitadora interior.
- $r$ : es la razón de frecuencias.

En el apartado 5.3.1 se mencionó que se debe verificar la cimentación al hundimiento, en donde la tensión de trabajo de las cargas estáticas  $\sigma_z$  no debe superar la tensión admisible del terreno  $\sigma_{adm}$ , cuando el equipo no se encuentra en funcionamiento.

No obstante, también debe contemplarse una verificación al hundimiento cuando la máquina se encuentra en operación, lo cual significa que, cuando el equipo se encuentre en funcionamiento no se produzcan tensiones de trabajo  $\sigma_T$  que superen la capacidad de carga del suelo. Por lo tanto, debe cumplirse la ecuación (5.55):

$$\sigma_T \leq \sigma_{adm} \quad (5.55)$$

Donde la tensión de trabajo total resulta de la suma de las tensiones estáticas  $\sigma_z$  y las tensiones dinámicas  $\sigma_d$ , producidas por la operación de la prensa:

$$\sigma_T = \sigma_z + \sigma_d \quad (5.56)$$

La tensión dinámica se obtiene a través de la expresión (5.57):

$$\sigma_d = \frac{F_{tc}}{(B_x + z) \times (B_y + z)} \quad (5.57)$$

Siendo:

- $F_{tc}$ : fuerza transmitida al cimiento.
- $z$ : distancia vertical medida a partir de la base de fundación.
- $B_x$  y  $B_y$ : lados de la base.

## 5.5. ACERO DE REFUERZO

### 5.5.1 Introducción a códigos y criterios utilizados

Como se mencionó anteriormente en este Capítulo, el diseño de una cimentación debe:

- Soportar todas las cargas aplicadas, tanto estáticas como dinámicas.
- Actuar en correspondencia con el equipo y con el suelo de soporte a la vez, para cumplir los límites de deflexión especificados, ya sea por el fabricante del equipo o por el propietario del mismo.
- Resistir las tensiones cíclicas de las cargas dinámicas.

En otras palabras, este diseño se desarrolla con el objetivo principal de cumplir con las demandas del equipo, su tamaño, peso y la necesidad de controlar o limitar la respuesta a cargas dinámicas generadas.

La mayor parte de los códigos mundiales de diseño de estructuras de hormigón armado se desarrollaron principalmente para estructuras de edificios, en donde los requerimientos de acero garantizan resistencia para cargas de servicio y/o ambientales. Esta situación difiere del escenario de diseño de bases para equipos vibratorios, en donde su desempeño depende de otros factores, tales como su masa, área de contacto y respuesta dinámica.

En relación con lo anterior, existe información muy limitada en relación a cómo seleccionar la cuantía mínima de acero que debe ser suministrada a las cimentaciones de equipos vibratorios.

La mayoría de los proyectistas recurren al código ACI 318, lo cual es una alternativa bastante segura. No obstante, para el caso de cimentaciones de grandes dimensiones de equipos dinámicos esto puede traducirse en elevadas cuantías de acero, diseños conservadores y costos elevados.

En conclusión, no existe un único código unificado de diseño estructural de cimentaciones para equipos vibratorios, ni un consenso entre profesionales acerca de cuál es el nivel de desempeño apropiado de una base. Por lo tanto, es de vital importancia mantener una adecuada comunicación entre el proyectista, el fabricante del equipo y el propietario, entendiendo a este último como la Industria que invierte en el equipo, la cual puede poseer normas o estándares de calidad internos (por ejemplo, niveles de vibración aceptados, controles de agrietamiento en estructuras, entre otros) con las que fabrican sus productos.

Los siguientes apartados dentro de esta sección se basarán en los siguientes códigos:

- ACI 351-18 3R: Reporte. "Fundaciones para equipo dinámico".
- ACI 351-99 2R: Reporte. "Fundaciones para equipo estático".
- ACI 207-95 2R: Reporte. "Efecto de la restricción, el cambio de volumen y el refuerzo en el agrietamiento del concreto en masa".
- ACI 318-14: Reglamento: "Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural".

## 5.5.2. Acero de refuerzo

### 5.5.2.1. Acero de refuerzo vertical

En este apartado, el código sugiere que, para pedestales esbeltos de pequeña sección transversal y gran profundidad, se consideren en forma equivalente como una columna de hormigón armado. Por lo que, para pedestales con una relación de alto/menor dimensión mayores a 3, el refuerzo requerido no debe ser menor que el utilizado para columnas según ACI 318, esto es:

$$A_s = 0,01 \times A_g \quad (5.58)$$

Donde  $A_s$  es el área de sección requerida y  $A_g$ , el área de sección transversal.

Para equipos o tanques esbeltos con grandes momentos de vuelco, las barras verticales del pedestal deben transferir la tensión vertical de los anclajes desde el pedestal a la cimentación superficial o profunda.

### 5.5.2.2. Acero de refuerzo horizontal

Para pedestales pequeños o en casos en donde las cargas actúen principalmente a compresión, y debido a la falta de códigos específicos, los ingenieros proyectistas utilizan el ACI 318 para calcular refuerzos horizontales como estribos de columnas. A su vez, cada ingeniero adopta diferentes criterios.

Para una cimentación correspondiente a un depósito vertical, ésta poseerá un elevado momento de vuelco, lo que produce que las barras verticales trabajen fuertemente a tracción. Es por ello que las barras horizontales representan un requerimiento menor, por lo que el ACI 318 establece una cuantía mínima nominal. Estas barras horizontales colaborarán a la estabilidad de las barras verticales en el proceso constructivo de colado de hormigón

También se recomienda utilizar cuantías mayores o disponer las barras con menores espaciamiento en la proximidad de los pernos de anclaje, con el fin de evitar la concentración de tensiones, controlar agrietamiento y fenómenos de retracción alrededor del anclaje.

Por último, algunos proyectistas colocan grupos de barras con espaciamiento estrecho, (entre 8 a 10 [cm]) en la cercanía del tope del pedestal, con la finalidad de controlar el agrietamiento producido por esfuerzos en los bordes del pedestal por fenómenos de expansión térmica. Según lo indicado en el ACI 318-14, debido al mecanismo de transferencia de tensión cortante a través de los pernos de anclaje, se producen grietas alrededor de dicho

anclaje, por lo que, al reforzar esta sección de hormigón con una mayor cuantía de acero, se mejora la resistencia al agrietamiento.

### 5.5.2.3. Acero por corte en pedestales

Debido a que el tamaño de los pedestales produce fuerzas de corte relativamente bajas y éstas a su vez pueden ser resistidas mediante la superficie del hormigón, es muy frecuente que el requerimiento de acero por corte sea mínimo.

Por lo tanto, se aconseja colocar una cuantía mínima de acero por corte, la cual tiene como función agregar ductilidad, garantizar la verticalidad del acero de refuerzo ortogonal y controlar el comportamiento adecuado de la base y pedestal.

El reporte ACI 351 2R recomienda colocar acero horizontal de refuerzo en la cara superior del pedestal. Esto satisface dos objetivos principales; por un lado, controla tracciones en pedestales esbeltos tipo placa y en situaciones donde existan cargas en los bordes. Estas cargas o fuerzas periféricas transfieren momentos de la presión del terreno sobre el equipo, que tiende a generar tracciones en dicha cara superior.

El segundo objetivo es garantizar un adecuado comportamiento ante fenómenos de agrietamiento o control de fenómenos de retracción. Como comentario final, se debe cuidar de no generar un congestionamiento por acero innecesario que se pueda traducir en problemas constructivos al efectuar los procesos de vaciado o colado del hormigón.

### 5.2.2.4. Requerimientos de acero mínimo

Por un lado, el ACI 207 2R indica que, en orden de obtener el refuerzo mínimo de las bases, se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- Para secciones de espesor *menores* a 1,20 [m], la cantidad mínima de acero por retracción y cambio de temperatura debe ser de 0,0015 veces la sección gruesa ( $A_g$ ) del miembro estructural, esto es:

$$A_{s_{min}} = 0,0015 \times A_g \quad (5.59)$$

- Para secciones de espesor *mayores* a 1,20 [m], los requerimientos de acero mínimo en cada cara deben ser limitados por el espesor de recubrimiento del miembro y el espaciamiento de las barras, como se indica a continuación:

$$A_{s'} = \frac{f_t' \times A}{f_s} \text{ o } \frac{A}{100} \quad (5.60)$$

Donde:

- $A_{s'}$ : área de acero por pie de longitud, para un ancho determinado.
- $f_t'$ : resistencia a tracción del hormigón [Psi].
- A: área efectiva del hormigón a tracción que rodea un grupo de barras de refuerzo y posee el mismo centroide del refuerzo, dividido entre el número de barras.
- $f_s$ : esfuerzo calculado sobre el refuerzo [Psi].

*Nota: [Psi] significa "Pounds per square inches" y equivale a 6895 Pascales [Pa].*

Como nota adicional, este reporte recomienda que el espaciamiento y diámetro mínimo para miembros de tales dimensiones no debe ser menor a barras de Ø3/4" cada 12 [pulg.], medida de centro a centro. En Argentina, esto se traduce en utilizar barras de tamaño igual o mayor que 20 [mm], separadas cada 30 [cm] como máximo.

En líneas generales, el ACI 351 recomienda reforzar las secciones mayores a 90 [cm], distribuyendo las armaduras de manera uniforme en las caras del miembro en la zona más cercana al refuerzo en tracción debido a flexión. En otras palabras, si el ingeniero proyectista diseña una base rígida en donde no se tienen identificadas claramente las zonas de tracción, se debe considerar la cara completa como un todo y no dejar caras mayores a 90 [cm] de espesor sin armar. Además, se sugiere utilizar como mínimo barras de Ø16 [mm] con un espaciamiento máximo de 25 [cm].

En particular, este reporte estudia los diferentes casos de armaduras de bases para diversos equipos dinámicos. A continuación, se exponen las recomendaciones para cimentaciones para equipos de impacto:

- ❖ La capa de acero más cercana a la cara superior del bloque, la cual es la que recibe principalmente el impacto, debe ser capaz de soportar el 1% de la carga estática equivalente en cualquier dirección. Esta verificación sirve para controlar agrietamientos, ya que cuando la masa de la prensa impacta, esta carga vertical posee una componente horizontal; por lo tanto, si no existe una cuantía de acero suficiente en la superficie cerca de esa cara de contacto, se pueden producir agrietamientos.
- ❖ Si se garantizan espesores adecuados para que la base se comporte como rígida, las solicitaciones por flexión y corte no se deben tener en cuenta
- ❖ Se sugiere colocar acero de refuerzo en las 3 direcciones ortogonales en todo el bloque de la cimentación, y en base a la teoría del círculo de Mohr, añadir barras acero en forma diagonal y en los bordes de la base.

Por último, el Reglamento ACI 318-14 indica que la cantidad mínima de acero  $A_{s_{min}}$  debe 0,0018 veces la sección gruesa ( $A_g$ ) del miembro estructural, esto es:

$$A_{s_{min}} = 0,0018 \times A_g \quad (5.61)$$

### 5.5.3. Control de agrietamiento del hormigón

El agrietamiento del hormigón, independientemente de las causas que lo provoquen, puede afectar negativamente a la durabilidad de la base. A diferencia de las cimentaciones cargadas estáticamente, el agrietamiento del hormigón en las cimentaciones que soportan equipos dinámicos puede causar una reducción significativa en la rigidez de la cimentación y afectar el rendimiento de la vibración.

Lo anterior significa que, al tener una sección agrietada de hormigón, disminuye el módulo de elasticidad de la base, lo que genera una reducción del corte dinámico; esto, a su vez conlleva una reducción de rigidez dinámica, lo que termina causando un incremento de amplitudes.

Como se puede observar, es fundamental minimizar el agrietamiento del hormigón, para evitar pérdidas por rigidez y posterior deterioro. Es por esta razón que algunos fabricantes de equipos vibratorios requieren que el diseño de la cimentación cumpla con criterios específicos de aceptación de grietas.

En el caso de ausencia de estos criterios por proveedor, el ingeniero proyectista puede utilizar recomendaciones del ACI 207 2R, ACI 318-95, ACI 318-99.

El control de agrietamiento se realiza mediante el cálculo de un ancho probable de grieta. Luego, se procede a dimensionar los elementos de forma tal que el ancho calculado sea menor a un valor predeterminado.

El ACI 318-95 utiliza el siguiente método, considerando los siguientes criterios:

- El esfuerzo en el acero de refuerzo es la variable más importante.
- El área de hormigón alrededor de cada barra de refuerzo es una variable geométrica importante.
- Ni el diámetro de la barra ni el espesor de recubrimiento de hormigón son variables importantes.
- La relación entre el ancho de la grieta y la superficie respecto al nivel de refuerzo es proporcional a la relación entre la deformación unitaria nominal en la superficie y la deformación unitaria del refuerzo.

La expresión simplificada que permite predecir el ancho probable de grieta es:

$$w = 0,076 \times \beta \times f_s \times \sqrt[3]{d_c \times A} \times 10^{-3} \quad (5.62)$$

En donde:

- $w$ : ancho máximo probable de la grieta [in = pulgadas]
- $\beta$  = relación de distancia entre el eje neutro y la cara en tracción respecto a la distancia entre el eje neutro y el acero de refuerzo. Para el caso típico de acero en una capa,  $\beta=1$ .
- $f_s$  = esfuerzo del acero de refuerzo [ksi].
- $d_c$  = espesor de recubrimiento desde la fibra extrema a tracción respecto a la barra más cercana a la superficie [in]
- $A$ : área promedio efectiva de hormigón alrededor de cada barra de refuerzo [in<sup>2</sup>], en donde se considera  $s$  = espaciamiento entre barras

$$A = 2 \times d_c \times s \quad (5.63)$$

Una de las conclusiones más interesantes de la versión del año 1995, es que el nivel de agrietamiento de la superficie es proporcional a la deformación que experimenta el acero según un nivel de esfuerzo aplicado. En otras palabras, relaciona el ancho probable de la grieta  $w$  con el acero de refuerzo. Se debe recordar que se calcula en unidades imperiales.

A su vez, para resolver esta ecuación, se pueden elegir entre dos opciones. El primer modo de resolución opta por calcular el ancho de grieta y compararlo con la tabla 5.6. La única variable compleja a considerar es  $f_s$ , es decir, a qué nivel de tensión del acero el ingeniero cree que está trabajando. Usualmente se considera un 60% del valor de  $f_y$ , por lo que:

$$f_s = 0,60 \times f_y \quad (5.64)$$

**Tabla 5.6:** Guía para anchos de fisura razonables para hormigón armado bajo cargas de servicio  
(Fuente: extraída de ACI 351-3R, 2018)

<b>Guía para anchos de fisura razonables (*), hormigón armado bajo cargas de servicio</b>		
<b>Condición de exposición</b>	<b>Ancho de fisura</b>	
	in	mm
Aire seco	0,016	0,41
Humedad, aire húmedo, suelo	0,012	0,30
Productos químicos descongelantes	0,007	0,18
Agua de mar y rocío de agua de mar, humedecimiento y secado	0,006	0,15
Estructuras para retención de agua (+)	0,004	0,10

*(\*) es de esperar que una parte de las fisuras de la estructura superaran estos valores. Con el tiempo, el porcentaje de fisuras que superan estos valores puede ser significativo. Estos son lineamientos generales para el diseño, que deben utilizarse con un sólido juicio profesional. (+) excluyendo tuberías sin presión.*

La otra opción consiste en proponer un ancho deseado de grieta y despejar  $f_s$ . Con este valor, el ingeniero puede analizar cómo se encuentra la estructura desde el punto de vista del funcionamiento, es decir, a qué porcentaje del esfuerzo permitido en el acero se está trabajando.

Existe una actualización del código anteriormente descrito. El ACI 318-99 cuestiona la ecuación tan específica de la versión anterior. Por lo que, desarrolla una expresión simplificada en base a las siguientes consideraciones:

- El esfuerzo sobre el acero es la variable más importante.
- Esta actualización considera dudoso intentar calcular el ancho de grieta de forma efectiva, debido a la inherente variabilidad del proceso de agrietamiento.
- El recubrimiento y espaciamiento entre barras es de gran importancia.
- La Expresión (5.62) fue investigada por Frosch en 1999 y evidencia que es válida para recubrimientos mayores a 63 [mm].
- La separación máxima (s) permitida será de 30 [cm]

El método exige que el espaciamiento del refuerzo más cercano a la superficie en tracción no exceda el siguiente valor:

$$s \text{ (mm)} = \frac{95.000}{f_s} - 2,50 \times c_c \quad (5.65)$$

En donde:

- s: separación centro a centro del acero de refuerzo en tracción más cercano a la superficie de la cara extrema en tracción [mm].

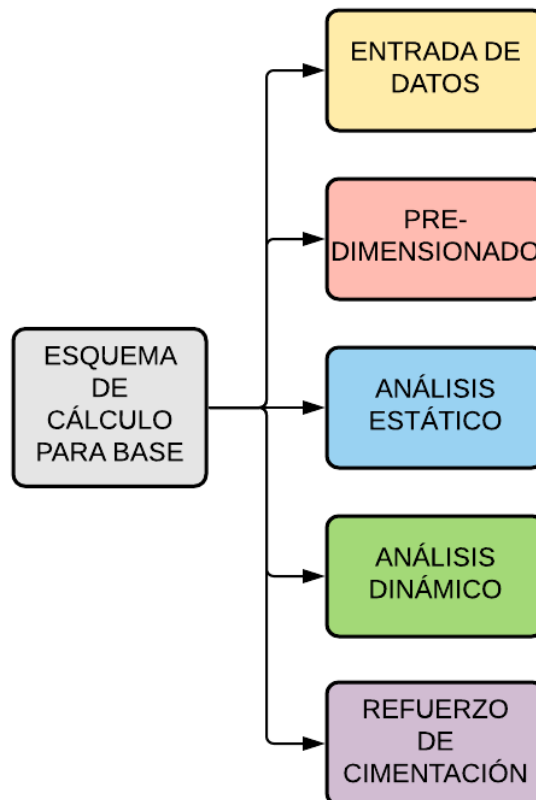
- $f_s$  = esfuerzo del refuerzo calculado para la carga de servicio [MPa]. Puede ser calculado como 0,60 de  $f_y$ .
- $C_c$  = recubrimiento de protección desde la superficie más cercana en tracción respecto al esfuerzo en tracción [mm].

En situaciones donde el hormigón se encuentre expuesto a condiciones climáticas severas o exposición a sulfatos, el acero de refuerzo puede requerir protección contra la corrosión. Esto se consigue utilizando barras revestidas con epoxi, barras de acero galvanizado u acero inoxidable, colocando inhibidores de corrosión (como el nitrato de calcio, protección catódica), o aplicando membranas o selladores.

Como conclusión final, la mayoría de los ingenieros proyectistas trabajan con ambas ecuaciones del ACI 318 95' y 99' y comparan resultados. En función a la nota de la Tabla 5.6, se reitera que estos valores sirven como referencia, ya que estimar el ancho probable de una grieta es una tarea muy compleja, debido a que interfieren factores como colocación del hormigón en obra, calidad de los materiales, control de durabilidad, colocación adecuada del acero de refuerzo, entre otras.

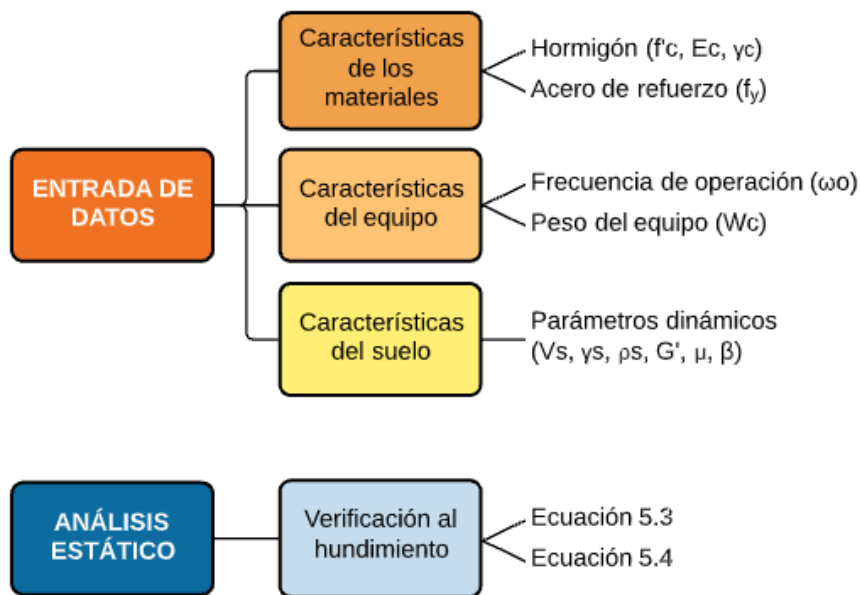
## 5.6. RESUMEN

Por último, en las siguientes Figuras se adjuntan diagramas que esquematizan los pasos a seguir para realizar un correcto diseño de cimentaciones de equipo vibratorio, con el fin de resumir conceptos expuestos en los ítems de este Capítulo.

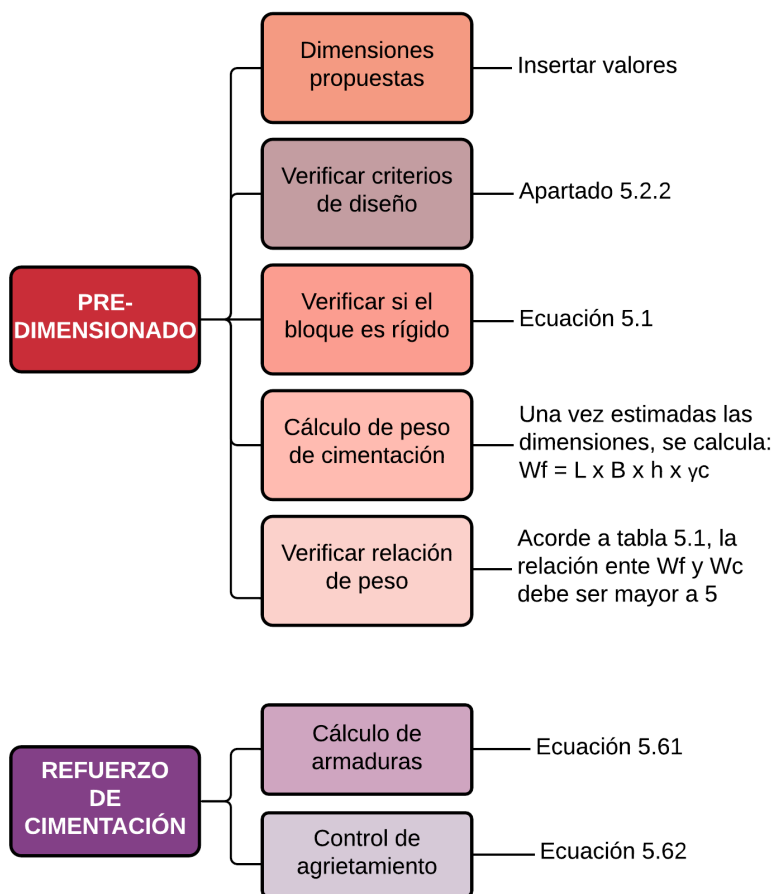


**Figura 5.12:** Esquema resumen: Etapas de diseño de cimentación de máquina.  
(Fuente: elaboración propia).

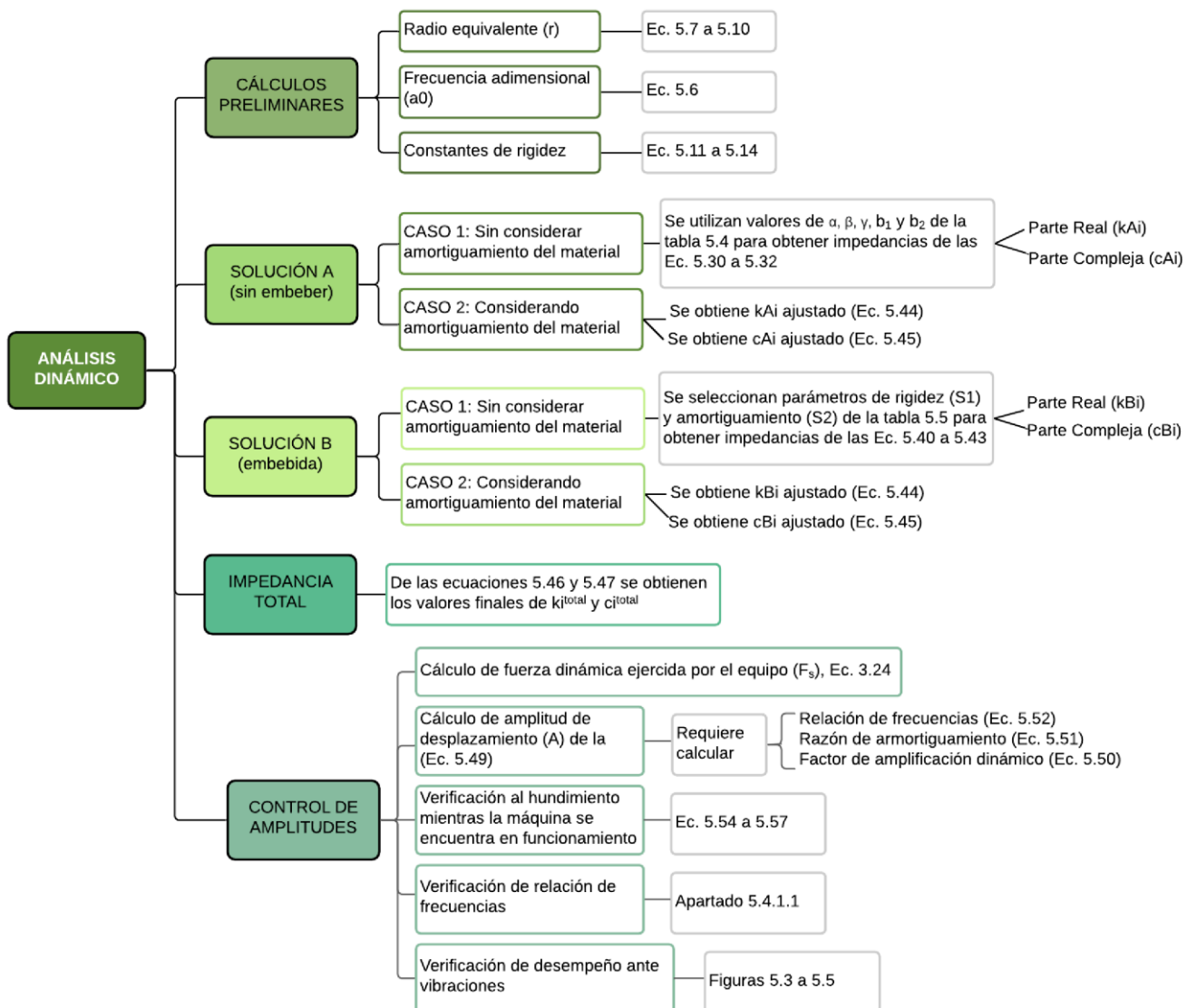




**Figura 5.13:** Esquema etapas: Entrada de Datos, Análisis Estático. (Fuente: elaboración propia).



**Figura 5.14:** Esquema etapas: Pre-dimensionado y Refuerzo de cimentación. (Fuente: elaboración propia).



**Figura 5.15:** Esquema etapa: Análisis Dinámico. (Fuente: elaboración propia).



# CAPÍTULO 6

## DISEÑO DE CIMENTACIÓN DE EQUIPO DINÁMICO

### 6.1. GENERALIDADES

En el presente capítulo se ejecutará el diseño de un bloque de cimentación para una prensa mecánica a fricción marca Stanko de 250 toneladas de impacto.

Se utilizarán los pasos que se describieron en el resumen final del Capítulo 5. El procedimiento general consiste en predimensionar la base, analizarla estática y dinámicamente, para luego comprobar que la frecuencia de vibración del sistema suelo-base no se encuentre en condición de resonancia con respecto a la frecuencia de vibración propia del equipo. Esto controla la magnificación de amplitud, que puede provocar daños al equipo, a la estructura circundante y al personal del trabajo.

Se considera que el equipo descansa sobre una cimentación de tipo bloque rectangular, que se encuentra apoyada en un semi-espacio infinito con un área de contacto circular definida por el radio  $r_0$ .

### 6.2. ENTRADA DE DATOS

#### 6.2.1. Características del material

##### Hormigón

Para los miembros estructurales y elementos de cimentación se utilizará una clase de hormigón, según CIRSOC 201/05, H-25 con resistencia a la compresión:

$$f'_c = 25 \text{ [MPa]} = 250 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

El Módulo de Young se determinará mediante la siguiente expresión, extraída del Reglamento CIRSOC 201/05:

$$E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c} \rightarrow E_c = 23.500 \text{ [MPa]} = 2,35 \times 10^7 \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$$

El peso unitario del hormigón se considera igual a:

$$\gamma_c = 2.500 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

##### Acero de refuerzo

Se utilizará acero ADN 420, según Tabla 3.8 del Reglamento CIRSOC 201/05, con una tensión de fluencia igual a:

$$f_y = 420 \text{ [MPa]}$$

### 6.2.2. Características del equipo

El equipo dinámico posee las siguientes características:

#### Material

El peso específico del acero es:

$$\gamma_{ac} = 7.850 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

#### Bancada

Las dimensiones de la bancada de la prensa, tal como se evidencia en la tabla 3.1 del Capítulo 3, considerando que L, B y h hacen referencia a la dimensión más larga, dimensión más corta y altura respectivamente son:

$$L_b = 0,75 \text{ [m]}$$

$$B_b = 0,67 \text{ [m]}$$

$$h_b = 0,25 \text{ [m]}$$

#### Tornillo

Las dimensiones del tornillo son las siguientes:

$$L_t = 700 \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro (D)} = 250 \text{ [mm]}$$

$$\text{Paso (S)} = 350 \text{ [mm]}$$

#### Masa del sistema

Se considera que la masa calculada en el Capítulo 3, por lo que

$$m_o = 1.255,9 \text{ [kg]} = 12.558,9 \text{ [N]}$$

#### Frecuencia de operación

$$\omega = 34 \left[ \frac{\text{golpes}}{\text{minuto}} \right] = 3,60 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

#### Peso del equipo

$$W_{eq} = 18 \text{ [ton]} = 18 \text{ [KN]}$$

### 6.2.3. Características del suelo

#### Consideraciones

Debido a que el presente Proyecto Final persigue objetivos meramente académicos, se utilizarán los datos geotécnicos proporcionados por un estudio de suelos de la zona del Parque Industrial de la Ciudad de San Francisco. De este documento se extrae información, la cual sirve de base para obtener parámetros dinámicos del suelo. Los datos se consideran para una cota de fundación de -1,00 [m].

En relación a la estratigrafía del lugar, en el estrato II analizado se encuentra una zona arcillo-limosa. La presencia del nivel freático se detectó a una cota de -2,10 [m].

### Peso unitario

$$\gamma_s = 1,40 \left[ \frac{g}{cm^3} \right] = 14,0 \left[ \frac{kN}{m^3} \right]$$

### Densidad del suelo

$$\rho_s = \frac{\gamma_s}{g} = 1,43 \left[ \frac{kN \times s^2}{m^4} \right]$$

### Velocidad de onda de corte

Como se mencionó en el Capítulo 4, este parámetro se puede asociar con el ensayo SPT. Si bien en el apartado 4.3.1 se mencionan factores de corrección de energía incidente, se decide considerar que el estudio de suelos empleado brinda los datos de NSPT con valores ya corregidos.

$$NSPT = N_{60} = 5 \text{ golpes}$$

A continuación, se aplica la ecuación (4.13) del Capítulo 4 y se obtiene:

$$V_s = 15 \times N_{60} \rightarrow V_s = 75,0 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

### Módulo de corte dinámico

Se utiliza la ecuación (4.16) del Capítulo 4 y se obtiene:

$$G' = \rho \times V_s^2 \rightarrow G' = 8.027,52 \left[ \frac{kN}{m^2} \right]$$

Como se mencionó en el apartado 4.3.2 del Capítulo 4, este valor de  $G'$  se debe reducir ya que, si se considera un menor valor de este parámetro, se obtiene un menor valor de rigidez dinámica, lo que conlleva a una amplitud de vibración mayor, por lo que el Ingeniero proyectista estará trabajando desde el lado de la seguridad. Para equipos de baja vibración se recomiendan valores de reducción de 0,45 a 0,50. Se elige el valor más conservador, por lo que, el módulo de corte dinámico reducido será de:

$$G'_{red} = 0,50 \times G' \rightarrow G'_{red} = 4.013,76 \left[ \frac{kN}{m^2} \right]$$

Por último, cabe destacar que se utilizarán los valores de coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) y Fracción de amortiguamiento ( $\beta$ ) sugeridos en la teoría de suelos del Capítulo 4, de las Tablas 4.7 y 4.9 respectivamente para suelos limosos. Se obtiene entonces:

$$\mu = 0,30$$

$$\beta = 0,05$$

## **6.3. PREDIMENSIONADO**

### **6.3.1. Dimensiones propuestas**

Se plantea un esquema inicial con las dimensiones posibles para la base, en función a las dimensiones del equipo que soportará. Dichas medidas se encuentran en la Tabla 3.1 del Capítulo 3.

Se decide realizar una serie de consideraciones. La primera, consiste en optar por un ancho de paso de 80 [cm] alrededor del equipo, con la finalidad de garantizar un acceso seguro a la prensa.

La segunda, se basa en las recomendaciones geométricas del ACI 351 del apartado 5.2.2 del Capítulo 5, en donde enuncia que el tope de la cimentación debe ser de 0,20 [m] a 0,30 [m] por encima del nivel de piso acabado. Es por esta razón que se decide utilizar una altura de pedestal de 20 [cm]. Este valor, sumado a la profundidad elegida de fundación da como resultado una altura inicial de base de 1,20 [m].

En resumen, y considerando que  $L$ ,  $B$  y  $h$  hacen referencia a la dimensión más larga, dimensión más corta y altura respectivamente, se obtiene:

#### Dimensiones de la máquina

$$B_{máq} = 1,90 [m]$$

$$L_{máq} = 3,70 [m]$$

$$h_{máq} = 4,45 [m]$$

#### Dimensiones iniciales propuestas

$$B = B_{máq} + (2 \times 0,80 [m]) \rightarrow B = 3,50 [m]$$

$$L = L_{máq} + (2 \times 0,80 [m]) \rightarrow L = 5,30 [m]$$

$$h = 1,20 [m]$$

### 6.3.2. Verificación de criterios de diseño

Como se mencionó anteriormente, se deben verificar las recomendaciones geométricas del ACI 351 del apartado 5.2.2, en donde el espesor mínimo recomendado es el mayor entre:

- 1/5 de la menor dimensión en planta

$$1,20 [m] > \frac{1}{5} \times 3,50 [m] \rightarrow 1,20 [m] > 0,70 [m] \quad \checkmark \text{ verifica}$$

- 1/10 de la mayor dimensión en planta

$$1,20 [m] > \frac{1}{10} \times 5,30 [m] \rightarrow 1,20 [m] > 0,53 [m] \quad \checkmark \text{ verifica}$$

- 0,60 metros

$$1,20 [m] > 0,60 [m] \rightarrow \checkmark \text{ verifica}$$

### 6.3.3. Verificación de rigidez del bloque

Para que la cimentación sea considerada como un bloque rígido, se debe aplicar la ecuación (5.1) del Capítulo 5:

$$h \geq 0,60 + \frac{L}{30} \rightarrow 1,20 [m] > 0,78 [m] \rightarrow \checkmark \text{ verifica}$$

### 6.3.4. Cálculo de peso de cimentación

Se utiliza la siguiente expresión:

$$W_f = L \times B \times h \times \gamma_c$$

Reemplazando por los valores del apartado 6.3.1, se obtiene:

$$W_f = 556,50 \text{ [kN]}$$

### 6.3.5. Verificación de relación de peso

Acorde a la Tabla 5.1 del Capítulo 5, se debe tener en cuenta una relación entre el peso de la base y el peso del equipo de 5:1.

$$\frac{W_f}{W_{eq}} > 5 \rightarrow \frac{556,50 \text{ [kN]}}{18 \text{ [kN]}} = 30,9 > 5 \quad \checkmark \text{ verifica}$$

## 6.4 ANÁLISIS ESTÁTICO

A continuación, se analizarán las dimensiones propuestas del bloque de cimentación a fines de garantizar la estabilidad del sistema.

Como se mencionó en el apartado 5.3 del Capítulo 5, verificar la capacidad de carga del suelo equivale a verificar que la tensión de trabajo no supere dicha tensión admisible. Este concepto es mencionado por otras bibliografías como “verificación al hundimiento”. Se debe cumplir entonces que:

$$\sigma_z \leq \sigma_{adm}$$

Por un lado, el valor de la tensión admisible en el estrato de suelo analizado es:

$$\sigma_{adm} = 1,00 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

Por otro lado, el valor de la tensión de trabajo en el estrato de suelo analizado se obtiene aplicando la ecuación (5.4). Evaluando las tensiones en el punto inmediatamente por debajo de la base y a una distancia de 0.50 [m] por debajo de la misma, se obtiene:

$$\sigma_0 = \frac{W_{máq} + W_{bloque}}{(B_x + z) \times (B_y + z)} \rightarrow \sigma_z = 0,31 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$\sigma_{0.50} = \frac{W_{máq} + W_{bloque}}{(B_x + z) \times (B_y + z)} \rightarrow \sigma_z = 0,25 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

Finalmente se comparan resultados mediante la ecuación (5.3):

$$\sigma_0 \leq \sigma_{adm} \rightarrow 0,25 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \leq 1 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \rightarrow \checkmark \text{ verifica}$$

$$\sigma_{0.50} \leq \sigma_{adm} \rightarrow 0,25 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \leq 1 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \rightarrow \checkmark \text{ verifica}$$

## 6.5 ANÁLISIS DINÁMICO

Como se mencionó en el Capítulo 5, la rigidez dinámica del sistema suelo-cimentación se calcula mediante la utilización de funciones de impedancia, las cuales poseen una parte real (referida a la rigidez del sistema) y una parte imaginaria (referida al amortiguamiento).



Al ser ambos parámetros dependientes de la frecuencia de vibración del equipo, para distintos valores de frecuencia de operación, los coeficientes de rigidez y amortiguamiento tendrán distintos valores.

Debido a la configuración geométrica y modo de operación del tipo de equipo vibratorio analizado, una prensa mecánica posee una única dirección de interés a calcular. En los siguientes pasos se considerará sólo la dirección vertical (y), descartando la dirección horizontal, rotacional y de torsión.

### 6.5.1. Cálculos preliminares

#### Radio equivalente

Al ser  $L/B < 2$ , se calcula el radio equivalente utilizando la ecuación (5.7):

$$r_y = \sqrt{\frac{L \times B}{\pi}} \rightarrow r_y = 2,43 [m]$$

#### Frecuencia adimensional

Una vez calculado el radio equivalente y conociendo los valores de  $v_s$  y  $\omega$ , es posible estimar la frecuencia adimensional, utilizando la ecuación (5.6):

$$a_0 = \frac{\omega \times r_0}{v_s} \rightarrow a_0 = 0,115$$

#### Constantes de rigidez

Se utiliza la ecuación (5.11):

$$k_y = \frac{4 \times G \times r_y}{(1-\mu)} \rightarrow k_y = 55.732,76 \left[ \frac{kN}{m} \right]$$

### 6.5.2. Solución A

Con esta solución se obtienen funciones de impedancia donde no se considera a la cimentación enterrada, sino que se encuentra simplemente apoyada en el suelo.

#### 6.5.2.1. Caso 1

Este caso particular no considera el amortiguamiento del material.

De la Tabla 5.4 se obtienen valores de coeficientes y necesarios para poder utilizar en las ecuaciones (5.30) a (5.32). Para  $\mu = 0,30$  se obtiene:

- $\gamma_1 = 0,341$
- $\gamma_2 = 0,818$
- $\gamma_3 = 0,000$
- $\gamma_4 = 0,759$

Reemplazando estos valores en las ecuaciones (5.31) y (5.32) se obtiene:

$$X_y = \frac{\gamma_1 (\gamma_2 \times a_0)^2}{1 + (\gamma_2 \times a_0)^2} \rightarrow X_y = 3,01 \times 10^{-3}$$

$$\psi_y = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (\gamma_2 \times a_0)^2}{1 + (\gamma_2 \times a_0)^2} \rightarrow \psi_y = 2,46 \times 10^{-3}$$

Finalmente, reemplazando valores obtenidos se obtiene la función de impedancia vertical:

$$S_{Ay}^* = \frac{4 G r_y}{(1 - \mu)} \left[ \underbrace{(1 - X_y - \gamma_3 a_0^2)}_{\text{Parte Real}} + \underbrace{i a_0 (\gamma_4 + \psi_y)}_{\text{Parte Imaginaria}} \right]$$

Se trabaja algebraicamente, se reemplazan con los valores de X y  $\Psi$  obtenidos y se obtienen soluciones para la parte real y para la parte imaginaria.

Parte real (primer término)

$$k_{Ay} = \frac{4 G r_y}{(1 - \mu)} \times [1 - X_y - (\gamma_3 a_0^2)]$$

$$k_{Ay} = 5,56 \times 10^4 \left[ \frac{kN}{m} \right]$$

Parte imaginaria (segundo término)

$$C_{Ayi} = \frac{4 G r_y}{(1 - \mu)} \times [i a_0 (\gamma_4 + \psi_y)]$$

A su vez:

$$C_{Ay} = \frac{C_{Ayi}}{\omega} \rightarrow C_{Ay} = 1.375 \left[ \frac{kN \times s}{m} \right]$$

### 6.5.2.2. Caso 2

Este caso particular considera el amortiguamiento del material. Se emplean las ecuaciones (5.44) y (5.45). Reemplazando por los valores calculados, se obtiene:

$$k_A^{ajustada} = k_{Ay} - [2 \times \beta \times c_i \times \omega] \rightarrow k_A^{ajustada} = 55.075 \left[ \frac{kN}{m} \right]$$

$$c_A^{ajustado} = C_{Ay} + \left[ 2 \times \beta \times \frac{k_i}{\omega} \right] \rightarrow c_A^{ajustado} = 2.936 \left[ \frac{kN \times s}{m} \right]$$

### 6.5.3. Solución B

Con esta solución se obtienen funciones de impedancia donde se considera que la cimentación se encuentra enterrada.

#### 6.5.3.1. Caso 1

Este caso particular no considera el amortiguamiento del material. Se utiliza la ecuación (5.40):

$$S_{By}^* = G_s \times L_{emb} \times \left[ \underbrace{S_{y1}}_{\text{Parte Real}} + \underbrace{i a_0 S_{y2}}_{\text{Parte Imaginaria}} \right]$$

Donde  $L_{emb}$  es la profundidad de empotramiento efectiva. Según el estrato de suelo analizado, se encuentran presentes arcillas y limos en condición suelta, con un porcentaje considerable de materia orgánica, en el estrato superior. Debido a esto, en la superficie de la base el suelo se separará de ella debido a la falta de presión de confinamiento. Es por esta razón que se decide considerar una longitud embebida sólo del 25%. Considerando una altura de pedestal de 20 centímetros se obtiene:

$$L_{emb} = 25\% (h - 20 [cm]) \rightarrow L_{emb} = 0,20 [m]$$

Además, esta ecuación requiere obtener parámetros adimensionales S, los cuales se extraen de la Tabla 5.5. para un modo de vibración vertical, considerando un tipo de suelo cohesivo, se tiene:

- $S_{y1} = 2,70$
- $S_{y2} = 6,70$

Se trabaja algebraicamente, se reemplazan con los valores de S obtenidos y se obtienen soluciones para la parte real y para la parte imaginaria.

Parte real (primer término)

$$k_{B_y} = G_s \times L_{emb} \times S_{y1} \rightarrow k_{B_y} = 2.167 \left[ \frac{kN}{m} \right]$$

Parte imaginaria (segundo término)

$$C_{B_{yi}} = G_s \times L_{emb} \times i a_0 S_{y2}$$

A su vez:

$$C_{B_y} = \frac{C_{B_{yi}}}{\omega} \rightarrow C_{B_y} = 174 \left[ \frac{kN \times s}{m} \right]$$

**6.5.3.2. Caso 2**

Este caso particular considera el amortiguamiento del material. Se emplean las ecuaciones (5.44) y (5.45). Reemplazando por los valores calculados, se obtiene:

$$k_B^{ajustada} = k_{B_y} - [2 \times \beta \times c_i \times \omega] \rightarrow k_B^{ajustada} = 2.105 \left[ \frac{kN}{m} \right]$$

$$c_B^{ajustado} = C_{B_y} + \left[ 2 \times \beta \times \frac{k_i}{\omega} \right] \rightarrow c_B^{ajustado} = 235 \left[ \frac{kN \times s}{m} \right]$$

**6.5.4. Impedancia total**

El método de Veletsos y Verbic establece que la impedancia total ( $k_i^{total}$  y  $c_i^{total}$ ) del sistema en cada dirección de movimiento se obtiene sumando los valores ajustados obtenidos en el Caso 2, de la solución A y B, respectivamente. Se aplican las ecuaciones (5.46) y (5.47) y se obtiene:

$$k_Y^{total} = k_{AY}^{ajustada} + k_{BY}^{ajustada} \rightarrow k_Y^{total} = 57.181 \left[ \frac{kN}{m} \right]$$

$$c_Y^{total} = c_{AY}^{ajustado} + c_{BY}^{ajustado} \rightarrow c_Y^{total} = 3.171 \left[ \frac{kN \times s}{m} \right]$$

**6.6. CONTROL DE AMPLITUDES**

**6.6.1. Fuerza dinámica**

Acorde a lo visto en la ecuación (3.24) del Capítulo 3, la fuerza dinámica que se transmite al cimiento es igual a:

$$F = I \times \omega_n$$

A su vez, se debe conocer el valor de la frecuencia natural de la cimentación  $\omega_n$ , por lo que se utiliza la ecuación (3.23) en donde se introducen valores de coeficientes de rigidez  $ky$  y peso del equipo  $W_{máq}$  más el del cimiento  $W_{bloque}$ , previamente calculados y se obtiene:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{ky}{m}} = \sqrt{\frac{ky}{W_{máq} + W_{bloque}}} = \sqrt{\frac{57.181 \text{ [kN/m]}}{574,50 \text{ [kN]}}} \rightarrow \omega_n = 31,23 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$$

A continuación, se reemplaza el valor de la frecuencia en la ecuación (3.24), resultando un valor de fuerza igual a:

$$F = I \times \omega_n = 979,6 \left[\frac{\text{kg} \times \text{m}}{\text{s}}\right] \times 31,23 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right] = 30.594 \text{ [N]}$$

### 6.6.2. Cálculo de amplitud de desplazamiento

Se determina la amplitud de desplazamiento del sistema con el objetivo de verificar que se encuentre dentro de los rangos adecuados, lo que conduce a evitar riesgos para el equipo y el personal.

Para ello, se aplica la ecuación (5.49), la que a su vez requiere calcular primeramente el factor de amplificación dinámico.

$$A = \frac{F}{k_t^{\text{total}}} \times M$$

#### Factor de amplificación dinámico

De acuerdo con el apartado 2.2.3 del Capítulo 2, el fenómeno de resonancia corresponde a la amplificación dinámica D.

Analizando la ecuación (2.30), si el valor obtenido de la razón de amortiguamiento  $\xi$  es igual a cero, y la frecuencia del sistema  $\omega_n$  es igual a la frecuencia de excitación  $\omega$ , esta relación  $r$  tomará el valor cercano a la unidad, quedando de esta forma un denominador cero, por lo que el factor D será infinito, lo que conlleva al fenómeno de resonancia, en donde se alcanzan excesivos valores de amplitudes. Es por esta razón que este factor de amplificación D es tan importante.

$$D = M = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2 \xi r)^2}}$$

Para poder aplicar la ecuación (2.30), previamente se debe calcular la razón de frecuencias y la razón de amortiguamiento.

#### Razón de frecuencias

Se utiliza la ecuación (5.52) en donde se relaciona la frecuencia de operación rotacional con la frecuencia natural de la cimentación y se obtiene el valor adimensional:

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \rightarrow r = 0,114$$

#### Razón de amortiguamiento

Se utiliza la ecuación (5.51) y se obtiene:

$$\xi = \frac{c_i^{total}}{2 \times \sqrt{k_i^{total} \times \frac{W_{máq} + W_{bloque}}{g}}} \rightarrow \xi = 0,87$$

Se seguirá el criterio de varios ingenieros calculistas, quienes consideran que actuará un 50% del amortiguamiento calculado anteriormente, por razones de seguridad. Por lo tanto, se obtiene que:

$$\xi = \frac{0,50 \times c_i^{total}}{2 \times \sqrt{k_i^{total} \times \frac{W_{máq} + W_{bloque}}{g}}} \rightarrow \xi = 0,43$$

El factor de amplificación es igual a:

$$M = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \rightarrow M = 1,008$$

Finalmente se reemplazan los valores en la ecuación (5.49) y se obtiene la amplitud de deformación de un sistema amortiguado sometido a cargas armónicas:

$$A = \frac{30,59 \text{ [kN]}}{57.181 \text{ [kN/m]}} \times 1,008 \rightarrow A = 5,4 \times 10^{-4} \text{ [m]}$$

Con el valor de amplitud A calculado, a continuación, se expondrán una serie de verificaciones extraídas del Capítulo 5.

### 6.6.3. Verificación al hundimiento mientras la máquina se encuentra en funcionamiento

Se utilizará la ecuación (5.24) para calcular la fuerza dinámica transmitida al cimiento:

$$F_{tc} = M \times F \times \sqrt{1 + (2\xi r)^2} \rightarrow F_{tc} = 30.542,9 \text{ [N]} = 3.054,3 \text{ [kg]}$$

La tensión dinámica se evalúa a las mismas profundidades que en el apartado 6.4. Serán entonces:

$$\sigma_{d0} = \frac{F_{tc}}{(B_x + z) \times (B_y + z)} \rightarrow \sigma_{d0} = 0,016 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$\sigma_{d0.50} = \frac{F_{tc}}{(B_x + z) \times (B_y + z)} \rightarrow \sigma_{d0.50} = 0,013 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

La tensión de trabajo total es la sumatoria de las tensiones estáticas  $\sigma_z$  y las tensiones dinámicas  $\sigma_d$ , producidas por la operación de la prensa, por lo que:

$$\sigma_{T0} = \sigma_0 + \sigma_{d0} \rightarrow \sigma_{T0} = 0,326 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$\sigma_{T0.50} = \sigma_{0.50} + \sigma_{d0.50} \rightarrow \sigma_{T0.50} = 0,263 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

Dicha tensión calculada no debe superar la capacidad de carga del suelo, es decir:

$$\sigma_T \leq \sigma_{adm}$$

$$0,326 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \leq 1 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \rightarrow \checkmark \text{ verifica al hundimiento}$$

$$0,263 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \leq 1 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \rightarrow \checkmark \text{ verifica al hundimiento}$$

#### 6.6.4. Verificación de relación de frecuencias

De acuerdo con el apartado 5.4.1.1, la frecuencia natural del sistema suelo-cimentación debe encontrarse fuera del límite de 0,80 a 1,20 veces la frecuencia de operación del equipo, por lo que:

$$r = 0,114 < 0,80 \quad \checkmark \text{ verifica relación de frecuencias}$$

#### 6.6.5. Verificación de desempeño ante vibraciones

Con respecto al criterio de Barkan, el valor de la amplitud  $A$ , obtenida como respuesta dinámica, debe ser menor o igual al valor de las amplitudes admisibles  $A_{adm}$ , en donde  $A_{adm}$  adquiere un valor que varía de 1,00 [mm] hasta 1,20 [mm]. Por lo tanto:

$$A \leq A_{adm}$$

$$A = 0,54 \text{ [mm]} < 1 \text{ [mm]} \quad \checkmark \text{ verifica criterio de Barkan}$$

Por otra parte, el Reporte ACI-351.3R-2018 menciona los criterios de evaluación de Blake, la Gráfica de Severidad de Vibración de Maquinaria de Baxter y Bernhard y la Gráfica de Reiher-Meister, modificada por Richart.

Para poder utilizar tanto la gráfica de Blake (Figura 5.3) como la gráfica de Reiher-Meister (Figura 5.5) se debe realizar la conversión de unidades de metros a Mills [0.001 pulgadas], por lo que:

$$A = 5,40 \times 10^{-4} \text{ [m]} = 2,126 \times 10^{-4} \text{ [pulgadas]}$$

A su vez, este valor de amplitud puede mayorizarse utilizando un factor de servicio de la Tabla 5.2. Se considera un factor igual a dos, que corresponde a la clasificación de “equipo diverso con características desconocidas”, de donde se obtiene una amplitud de  $4,25 \times 10^{-4}$  [pulg.].

De las gráficas mencionadas anteriormente, se puede observar que el menor valor de entrada de velocidad de operación, en el eje de las abscisas, es de 100 rpm. Debido a que una prensa mecánica posee tan sólo 34 rpm, se evidencia que se han confeccionado para máquinas de grandes vibraciones, como ser equipos dinámicos de tipo compresores, bombas, turbinas, entre otros.

Con el objetivo de poder utilizar las gráficas, se analizará una situación alejada de las condiciones de funcionamiento normales de la prensa en estudio. Se considerará una velocidad de operación de 100 rpm (esto es, aproximadamente el triple de la velocidad de operación normal del equipo). Con este valor, junto con el valor de amplitud calculado anteriormente, se ingresa en las gráficas y se obtiene:

- De la gráfica de Blake, una categoría de desempeño “A”, la cual hace referencia a “un equipo sin defectos típico de equipo nuevo”:
- De la gráfica de Reiher-Meister, una categoría de desempeño bajo la curva “no perceptible para las personas”.
- De la gráfica de Baxter-Bernhard, una severidad de vibración de máquina “extremadamente suave”.

En conclusión, la carga dinámica aplicada en la dirección vertical analizada no producirá daños importantes para el equipo ni producirá vibraciones perceptibles a personas ni estructuras circundantes, con el sistema de cimentación propuesto.

## 6.7. REFUERZO DE CIMENTACIÓN

### 6.7.1. Según criterio ACI 318-14

Se utilizará la ecuación (5.61) del Reglamento ACI 318-14, el cual indica que la cantidad mínima de acero  $A_{s_{min}}$  debe 0,0018 veces la sección gruesa ( $A_g$ ) del miembro estructural. Reemplazando valores se obtiene:

Armadura en ambas direcciones B y L

$$A_{s_{min}} = 0,0018 \times A_g \rightarrow A_{s_{min}} = 114,18 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$A_{s_{min}} \text{ para } 1 \text{ m} = \frac{A_{s_{min}}}{L} = \frac{114,18 \text{ [cm}^2\text{]}}{5,30 \text{ [m]}} = 21,6 \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \right]$$

Por tablas, se adopta **1Ø20 c/14 [cm]** (en dirección x e y)

Longitud de anclaje de barras

Se utiliza el apartado 12.1 del reglamento CIRSOC 201/05 para calcular la longitud de anclaje de las barras solicitadas a tracción que terminan con un gancho normal. Para ello, se utiliza la ecuación (12.5.2.) de dicho reglamento:

$$l_{dh} = 0,24 \times \psi_e \times \lambda \times \frac{f_y}{\sqrt{f_c}} \times d_b$$

Donde:

- $\psi_e = 1$  para armadura sin revestir
- $\lambda = 1$  para hormigón de densidad normal

Reemplazando valores se obtiene:

$$l_{dh} = 0,24 \times 1 \times 1 \times \frac{420}{\sqrt{25}} \times 20 \text{ [mm]} \rightarrow l_{dh} = 403 \text{ [mm]} = 40 \text{ [cm]}$$

### 6.7.2. Control de agrietamiento

Se utilizará la ecuación (5.62) del Reglamento ACI 318-95, la cual arroja como resultado el ancho probable de grieta con la cuantía de hierro y la tensión del acero considerada para la cimentación en estudio.

Este valor se compara con la Tabla 5.6, la cual es una guía para anchos de fisura razonables para hormigón armado bajo cargas de servicio, proporcionada por el Reporte ACI 351-18.

$$w = 0,076 \times \beta \times f_s \times \sqrt[3]{d_c \times A} \times 10^{-3}$$

A su vez:

$$d_c = 5 \text{ cm} = 1,97 \text{ [pulg.]}$$

$$A = 2 \times d_c \times s \rightarrow A = 22,50 \text{ [pulg}^2\text{]}$$

$F_s$  se refiere al valor del nivel de tensión del acero que el ingeniero considera que está trabajando. Usualmente se utiliza un 60% del valor de la tensión de fluencia del acero, por lo que:

$$f_s = 0,60 \times f_y \rightarrow f_s = 36,55 \text{ [kpsi]}$$

Reemplazando valores, finalmente se obtiene:

$$w = 0,076 \times 1,00 \times 36,55 \times \sqrt[3]{1,97 \times 22,50} \times 10^{-3} \rightarrow w = 0,0098 \text{ [pulg.]}$$

A continuación, se compara este ancho probable de grieta con los valores de la Tabla 5.6 para una condición de exposición normal "aire húmedo, suelo":

$$0,0098 \text{ [pulg.]} < 0,012 \text{ [pulg.]} \rightarrow \checkmark \text{ verifica}$$

Por último, se realiza una verificación del espaciamiento entre barras según el Reglamento ACI 318-99. Se utiliza la ecuación (5.65), la cual expresa que no se debe exceder el siguiente valor de separación (s):

$$s \text{ [mm]} = \frac{95.000}{f_s} - 2,50 \times c_c \rightarrow s = 252 \text{ [mm]}$$

Si el espaciamiento adoptado es de 14 cm:

$$14 \text{ [cm]} < 25 \text{ [cm]} \rightarrow \checkmark \text{ verifica espaciamiento entre barras}$$





# CAPÍTULO 7

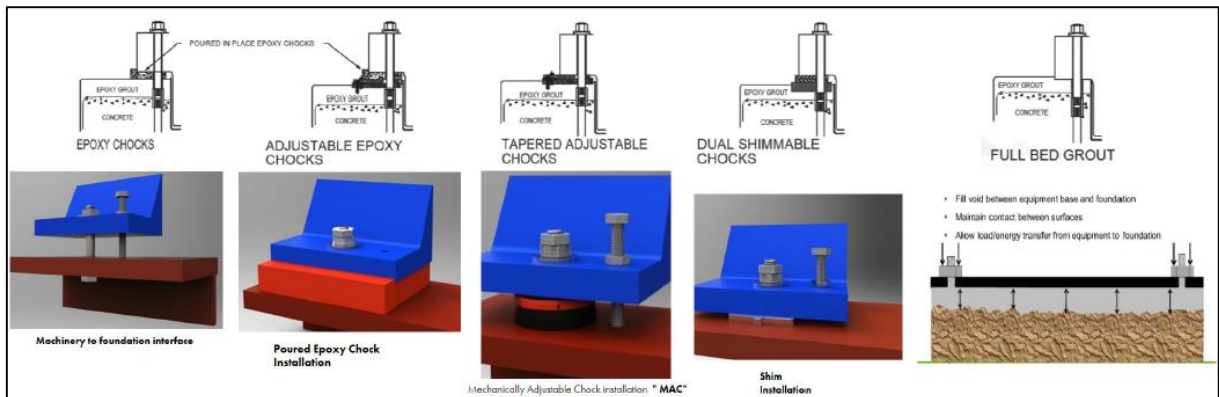
## PERNOS DE ANCLAJE

### 7.1. GENERALIDADES

Debido a la diversidad de equipos dinámicos y a la aplicación de nuevas tecnologías de anclajes, existen diferentes soluciones para soportar los equipos dinámicos. La Figura 7.1 refleja los tipos de anclajes más utilizados en la industria. La selección del sistema de soporte generalmente lo indicará el fabricante, teniendo en cuenta factores como la geometría de la base del equipo, requerimientos de ventilación inferior del mismo, entre otros.

El objetivo más importante, radica en asegurar una excelente sujeción entre el sistema de anclaje de la máquina y la cimentación, lo que garantiza a su vez, una correcta alineación del equipo. Cuando esto no sucede, los puntos de unión (por ejemplo, bulones) tienden a aflojarse, lo que incrementa la vibración del equipo, afectando a la cimentación. Si esta situación no se corrige, la vibración aumenta, y el hormigón de la base puede agrietarse, por lo que se verá afectada la condición de rigidez del sistema. Esto conlleva, entre otros riesgos, a que el equipo funcione a una mayor demanda de energía eléctrica.

En conclusión, todo este proceso iterativo de vibraciones, puede afectar la vida útil del equipo y la estabilidad de la base. No obstante, mediante una buena práctica constructiva se pueden mantener las amplitudes esperadas de vibración e incluso disminuirlas.



**Figura 7.1:** Tipos de sistemas de anclajes más utilizados en la industria. (a) Interfaz entre la base del equipo y cimentación. (b) Representación de una cuña epóxica. (c) Tecnología de cuñas de espesor variable, ajustables (d) Tecnología tipo “shim instalación”, en donde se instalan planchas de suplemento. (e) Cama de relleno completo entre interfase del equipo y cimentación, utilizado para pequeñas bases. (Fuente: extraída de Grudzinski y Jaroszewicz, 2004)

#### 7.1.1. Grouting

El Reporte ACI 351 2R define como “*grout o grouting*”, traducida coloquialmente como “*lechada*” al material de relleno que se coloca entre la base de la máquina y el cimienta.

Un estudio detallado de los lineamientos en relación al grout se encuentra fuera de los alcances de este Proyecto Final, por lo que para obtener detalles específicos se puede consultar los Reportes ACI 351-1R (propiedades de grout cementosos y epóxicos) y ACI 351-4 (especificaciones para la instalación de grout cementosos y epóxicos).

Como comentario de interés, el Reporte informa que, si bien el grouting de cemento puede tener alta resistencia a la compresión, posee bajas resistencias a la tracción y a la flexión, lo que limita su uso a máquinas dinámicas del tipo giratorias de funcionamiento suave, como lo son los ventiladores, motores, generadores eléctricos y turbinas. No obstante, siempre que sea posible, las lechadas cementosas se prefieren a las lechadas epoxi porque son más fáciles de colocar, cuestan menos y se deforman menos bajo acciones térmicas.

### 7.1.2. Materiales de anclajes y tipologías – según ACI 351 2R

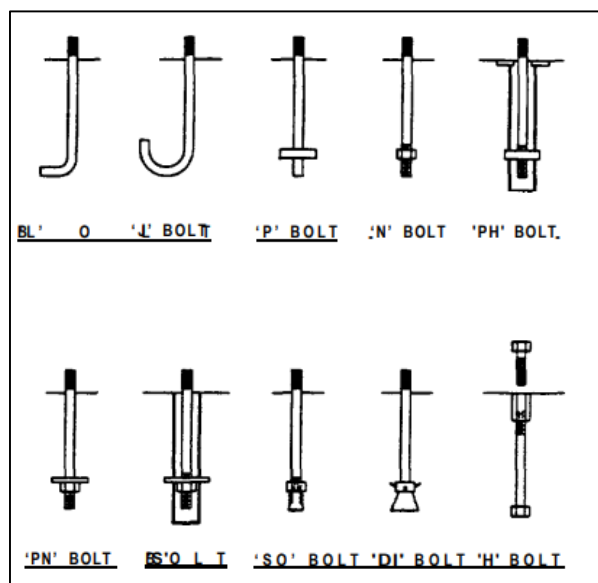
De acuerdo con el Reporte ACI 351-2R, el cual indica las uniones más adecuadas a utilizar en cimentaciones para equipos estáticos, existen dos grandes tipos de anclajes: mecánicos y químicos.

Por un lado, los anclajes mecánicos o “expansivos” transmiten la carga en tracción al hormigón mediante presión dentro del hueco realizado, a través de un dispositivo de expansión que posee forma de campana en el extremo del anclaje.

Por otra parte, los anclajes químicos o “adhesivos” consisten generalmente en una barra roscada instalada en un agujero que posee un diámetro según las especificaciones técnicas del fabricante. Este hueco se rellena con material adhesivo. La carga se transfiere entre el anclaje y el adhesivo y luego, entre el adhesivo y el hormigón.

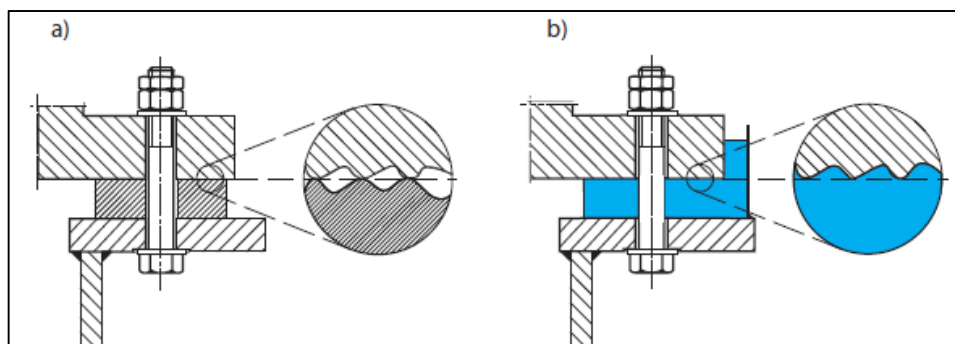
La Figura 7.2, ilustra los diferentes tipos de anclajes, en donde sus siglas hacen referencias a pernos tipo:

- “P”: perno con placa o arandela en el extremo.
- “N”: perno con tuerca en el extremo.
- “PN”: perno con plancha y tuerca o arandela y tuerca en el extremo.
- “PS”: perno con “manguito”.
- “SO”: perno auto-perforable.
- “DI”: perno del tipo expansivo.
- “H”: perno oculto.



**Figura 7.2:** Tipos de pernos de anclaje. (Fuente: extraída de ACI 351-2R, 1999)

De acuerdo con el libro “*Seating of machines and devices on foundation chocks cast of epoxy resin compound*” de Grudziński y Jaroszewicz (2004), se enunciarán las ventajas y desventajas de utilizar anclajes mecánicos o químicos.



**Figura 7.3:** Tipos de anclaje. (a) con cuña metálica. (b) con grout epóxico. (Fuente: extraída de Grudzinski y Jaroszewicz, 2004)

La forma tradicional de asentar maquinaria pesada sobre sus cimientos con el uso de anclajes mecánicos posee importantes desventajas, que incluyen:

- La necesidad de un mecanizado preciso de las superficies de carga de los cimientos de la máquina.
- La ardua tarea de montar cada perno de forma individual, sumado a que se requieren instrumentos específicos de montaje.
- Se obtiene una alta rigidez de uniones y una pequeña área de contacto efectivo entre los pernos y la bancada de la máquina.
- Existe un mal aislamiento de vibraciones mecánicas y acústicas.

Como resultado de la alta rigidez (es decir, existe un elevado valor del módulo de elasticidad  $E$ ), cualquier pequeña inexactitud en el montaje de los anclajes metálicos puede resultar en la aparición de grandes esfuerzos y deformaciones en los cuerpos de las máquinas, así como en los cimientos, en la fase de instalación. Tales tensiones y deformaciones tienen un efecto perjudicial sobre la durabilidad de las máquinas y la calidad de su funcionamiento.

Otra desventaja sustancial es que el área de contacto efectiva entre las caras de la bancada de la máquina y la base es muy baja. Incluso con un ajuste preciso del uso de cuñas metálicas, cualquier irregularidad de la superficie que exista después de la instalación (como ser: rugosidad, ondulación, errores de forma) seguramente causará un área de contacto aleatoria bastante irregular, por lo que el área de contacto efectiva total será solo un pequeño porcentaje de la nominal.

Además, como resultado de la aparición de cargas dinámicas cuando la máquina está funcionando, los puntos en la superficie de contacto efectiva sufren deformaciones, lo que resulta en un asentamiento de los elementos conectados, un aflojamiento de pernos y un efecto de "martilleo" en las superficies del cimiento y la bancada de la máquina. Las consecuencias finales pueden ser la aparición de grietas, roturas de los pernos de sujeción y funcionamiento inestable o falla de la máquina.

Por otra parte, el uso de anclajes químicos simplifica el proceso de asentamiento y acorta tiempo en operaciones de montaje. Los mismos están compuestos por un curado químico, fundidos en moldes que se preparan entre la base y la máquina colocada en su posición de servicio.

A excepción de una limpieza mecánica y desengrasado de la superficie de la base, no se requiere ninguna otra preparación especial para su instalación. La existencia de rugosidades, corrosión y no paralelismos de superficies, carecen de importancia con este método.

Estos anclajes, colocados correctamente, se adhieren firmemente a las superficies de carga de la máquina y su base, llenando todas las microcavidades de las superficies de contacto.

En estos casos el área de contacto efectiva es mayor que la nominal. Esto asegura una distribución favorable de la presión efectiva normal sobre el área de contacto y un coeficiente de fricción efectivo alto (cercano a uno o incluso mayor), el cual posee un efecto beneficioso en la transferencia de fuerzas tangenciales a la superficie de apoyo.

Por último, los anclajes químicos amortiguan mejor las vibraciones y constituyen una barrera sustancial para la transmisión del sonido. Además, no se produce ninguna corrosión inducida por fricción en las superficies de contacto, ni efectos del martilleo u otras formas de desgaste.

Debido a todas las razones mencionadas, el presente Proyecto Final adoptará anclajes del tipo químicos, utilizando cuatro varillas roscadas junto con adhesivos a base de resinas epoxi, para anclar la máquina a la base diseñada.

## **7.2. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A LA EXTRACCIÓN CON PERNOS DE ANCLAJE**

### **7.2.1. Diseño del hormigón por capacidad**

El diseño del hormigón por capacidad CCD, por sus siglas en inglés: “*Concrete Capacity Design*”, permite establecer la resistencia de los anclajes embebidos en él. Para tal fin se emplea el Reglamento ACI 318, principalmente el Capítulo 17. A medida que este el Reglamento fue actualizándose, desde el año 1994 al 2019, también lo ha hecho el modo de cálculo de pernos. Es por ello que, desde hace 25 años, esta rama de cálculos fue modificándose según las nuevas tecnologías y la disponibilidad de materiales en el mercado.

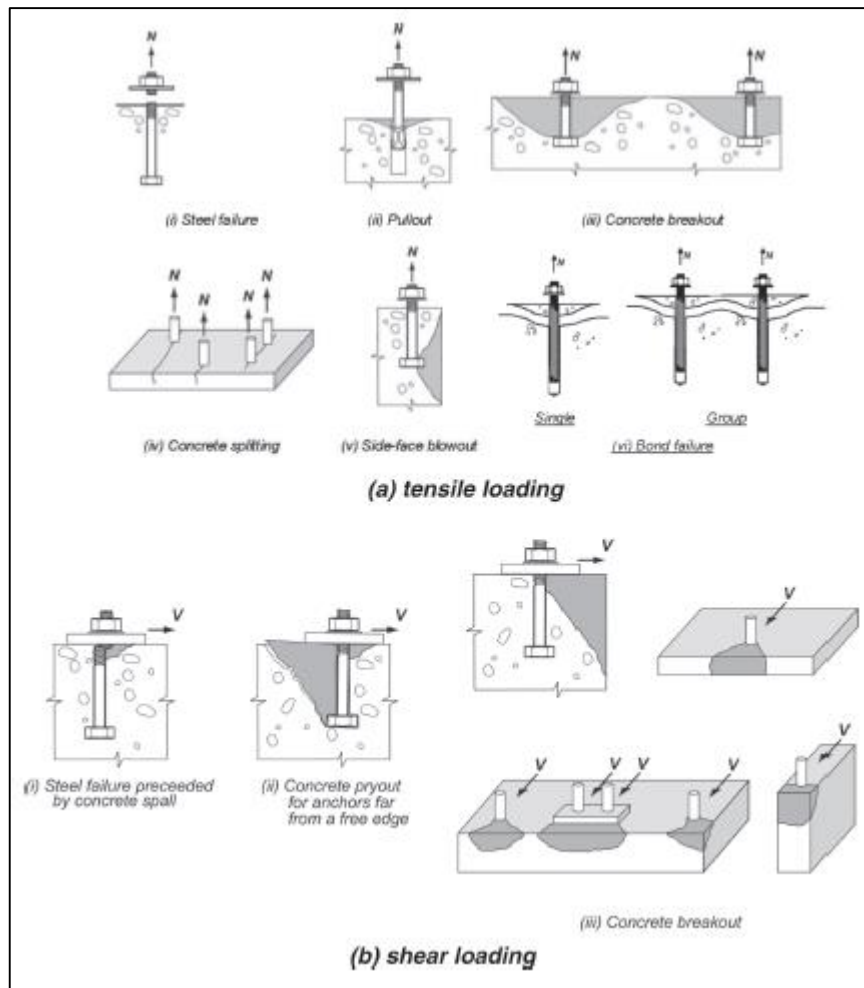
A continuación, se mencionarán los diversos modos de falla del acero y hormigón para anclajes, los cuales se resumen en la Figura 7.4, extraídos del ACI 318.

#### Falla por tensión:

- i. Falla del acero: influenciado por el diámetro del perno.
- ii. Falla por arrancamiento: para anclajes post-instalados y anclajes socavados.
- iii. Falla del hormigón/desprendimiento de hormigón: influenciado por la resistencia a compresión del hormigón y del acero de refuerzo. Se debe verificar la capacidad de carga del elemento de hormigón para evitar la falla por cono, la cual se definirá en los siguientes párrafos.
- iv. Rajadura del hormigón: influenciado por la resistencia a compresión del hormigón y del acero de refuerzo y la geometría. Suele ocurrir en elementos delgados.
- v. Rajadura del hormigón en una cara lateral: se caracteriza por un daño local en un costado del elemento estructural.
- vi. Falla por adherencia: influenciado por las condiciones de limpieza, instalación (taladrado del hueco en anclajes post-instalados) y humedad existente. Se debe garantizar una adecuada adherencia entre el perno y hormigón.

Falla por corte:

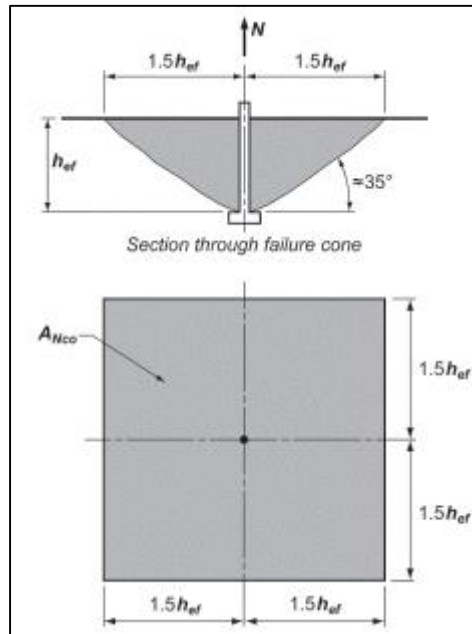
- i. Falla del acero: se debe verificar la resistencia a corte de acuerdo al diámetro del acero del perno o barra.
- ii. Falla del hormigón: se debe verificar la capacidad de carga adecuada del elemento de hormigón, en el lado no cargado, para evitar la falla por cono.
- iii. Rotura del hormigón: se debe verificar la capacidad de carga adecuada en el borde para evitar la falla del elemento.



**Figura 7.4:** Modos de falla en tensión y tracción de acero y hormigón para anclajes. (Fuente: extraída de ACI 318, 1999)

El método CCD predice la resistencia de un anclaje o grupo de anclajes mediante el uso de una ecuación básica de tensión para un anclaje en hormigón fisurado, multiplicado por factores referidos a número de anclajes, distancia al borde, espaciado, excentricidad y ausencia de grietas. Las investigaciones experimentales y numéricas también han demostrado la aplicabilidad del método CCD a los anclajes adhesivos.

El ACI 318 considera un cono truncado de falla o extracción de aproximadamente 35° de inclinación, medidos a partir de un eje perpendicular al eje del anclaje, que se forma a partir de la cabeza del perno de anclaje hacia la superficie libre del hormigón a una distancia equivalente a  $1,5 h_{ef}$ , en cada dirección. Esta situación se observa en la Figura 7.5.



**Figura 7.5:** Cono de ruptura de hormigón por extracción. (Fuente: extraída de ACI 318, 1999)

El término  $h_{ef}$  equivale a la profundidad efectiva de embebido disponible del anclaje. Del análisis de la Figura 7.5, se observa que la tensión de ruptura del hormigón es decreciente con el incremento del tamaño de la superficie de ruptura. Es por esta razón que el incremento en resistencia es proporcional a la profundidad de empotramiento  $h_{ef}$ , aumentada a 1,5.

Este método es válido para anclajes con diámetros que no excedan las 2 [in] y cuya longitud de empotramiento no exceda las 25 [in] de profundidad.

La resistencia básica al desprendimiento del hormigón de un solo anclaje en tracción en hormigón fisurado,  $N_b$ , es:

$$N_b = k_c \times \sqrt{f'_c} \times h_{ef}^{1.5} \quad (7.1)$$

En donde:

- $N_b$  = Resistencia nominal del hormigón a la extracción para un perno de anclaje individual en tracción [lb]
- $k_c$  = coeficiente de resistencia básica a la extracción del hormigón. Es igual a 24 para anclajes empotrados, y 17 para anclajes post-instalados.
- $h_{ef}$  = profundidad efectiva de embebido del anclaje [in]
- $f'_c$  = Resistencia del hormigón [psi]

Alternativamente, para espárragos con cabeza fundida y pernos con cabeza se utilizan las siguientes expresiones:

$$\phi \times N_{cbg} = \phi \times \psi_3 \times \frac{A_N}{A_{NO}} \times 24 \times \sqrt{f'_c} \times h_{ef}^{5/3} \text{ para } h_{ef} < 11 \text{ [in]} \quad (7.2)$$

$$\phi \times N_{cbg} = \phi \times \psi_3 \times \frac{A_N}{A_{NO}} \times 16 \times \sqrt{f'_c} \times h_{ef}^{5/3} \text{ para } h_{ef} \geq 11 \text{ [in]} \quad (7.3)$$

Donde:

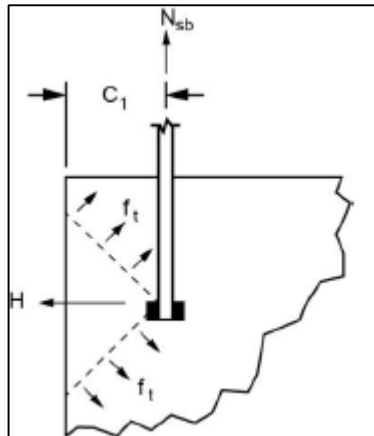
- $N_{cbg}$  = Resistencia a la ruptura para un grupo de anclajes
- $\phi = 0,7$
- $\psi_3 = 1,25$  para hormigón no agrietado; caso contrario,  $\psi_3 = 1$
- $h_{ef}$  = profundidad de empotramiento [in]
- $A_N$  = área del cono de ruptura del hormigón para el grupo
- $A_{NO}$  = área del cono de ruptura del hormigón para un solo anclaje

El ACI 318 sugiere considerar que el hormigón no se encuentra agrietado. En caso de que el diseñador prefiera considerarlo agrietado,  $\psi_3$  es igual a 1, y se utiliza el 80% de la capacidad del hormigón.

Dicho Reglamento también enlista ciertos criterios para barras de anclaje en orden de prevenir una “falla debida a fuerzas de rotura lateral en la cabeza del anclaje”. Estas fuerzas de rotura o estallido están asociadas a la tensión en la barra de anclaje.

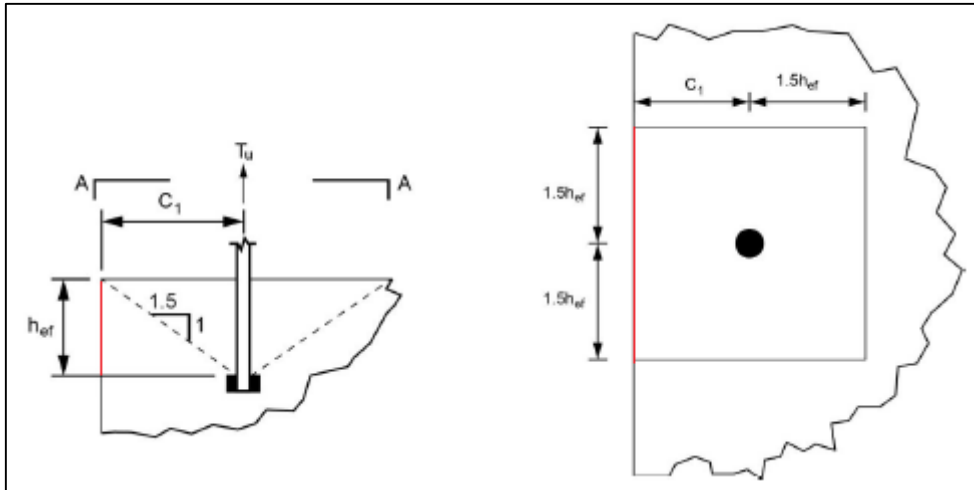
Como se ilustra en la Figura 7.6 la superficie de falla se asume con forma de cono y de extensión radial a partir de la cabeza del anclaje hasta el borde libre adyacente o el lado del elemento de hormigón, aplicado en el Proyecto Final, los bordes de la cimentación. El apéndice D del ACI 318 analiza la superposición de los conos de tensión de extracción junto con los conos de tensión asociados a fuerzas de rotura lateral.

Por las razones mencionadas anteriormente, el Reglamento recomienda utilizar un recubrimiento lateral mínimo  $c_1$  de seis veces el diámetro del anclaje para evitar problemas de ruptura de cara lateral. Además, sugiere utilizar arandelas, ya que provoca un aumento del área de apoyo, y esto, a su vez incrementa la resistencia al desprendimiento de la cara lateral.



**Figura 7.6:** Fuerzas de estallido laterales para barras de anclaje en tracción cerca del borde, en donde H es la fuerza lateral del estallido. (Fuente: extraída de ACI 318, 1999)

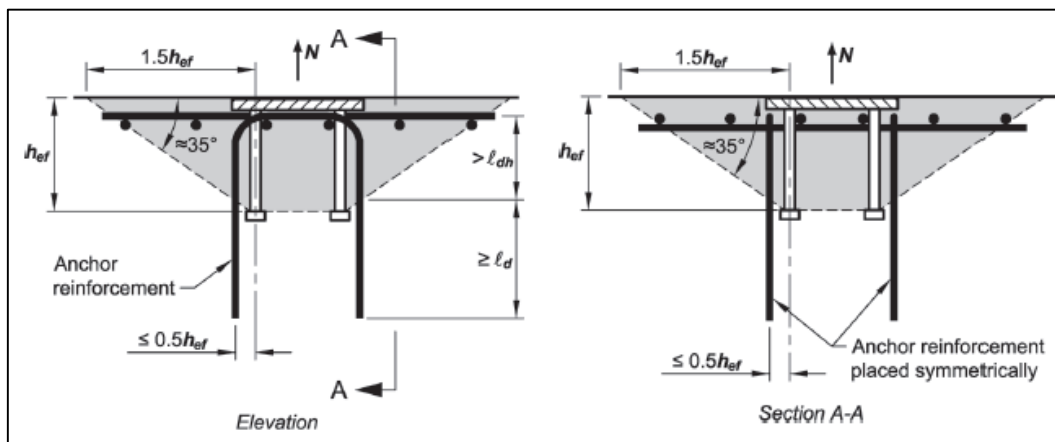




**Figura 7.7:** Cono de ruptura en tensión cerca de un borde. (Fuente: extraída de ACI 318, 1999)

Por último, en referencia al recubrimiento lateral mencionado anteriormente, el ACI 318 menciona el caso puntual en donde el área proyectada de los conos de tensión es extremadamente limitada por restricciones de distancia al borde y, por lo tanto, la resistencia a la tracción de la barra de anclaje no puede ser completamente desarrollada.

En estos casos, se utiliza el acero de refuerzo de la base de hormigón armado para transferir las fuerzas a partir de las barras de anclaje, por lo que dicho refuerzo deberá verificar la resistencia a la tracción requerida por las barras de anclaje en ambos lados del plano potencial de falla, el cual se muestra en la Figura 7.8.



**Figura 7.8:** Uso de acero de refuerzo para el desarrollo de barras de anclaje. (Fuente: extraída de ACI 318, 1999)

### 7.2.2. Fuerzas de diseño en pernos de anclaje

El ACI sugiere utilizar la expresión de Gaylord, et al., para calcular la máxima fuerza de tracción sobre los pernos de anclaje:

$$F = \frac{4 \times M}{N \times d_{bc}} - \frac{W'}{N} \quad (7.4)$$

En donde:

- $F$  = fuerza de tracción sobre el perno de anclaje [kN]

- $M$  = momento aplicado al anclaje [kNm]
- $N$  = número de pernos
- $W'$  = peso del equipo [kN]
- $d_{bc}$  = diámetro del perno [m]

### 7.3. CÁLCULO DE ANCLAJES PARA EQUIPO DINÁMICO

#### 7.3.1. Entrada de datos

Se utilizarán los mismos datos utilizados en el Capítulo 6, donde:

Hormigón

$$f'_c = 250 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] = 3.555,84 \text{ [psi]}$$

Dimensiones de la base:

$$B = 3,50 \text{ [m]}$$

$$L = 5,30 \text{ [m]}$$

$$h = 1,20 \text{ [m]}$$

Características del equipo:

Se define, en pocas palabras, como *torque o par motor* a la medida de la fuerza necesaria para hacer girar un eje. Todos los motores en Argentina se rigen en las normas NEMA (por sus siglas en inglés, National Electric Manufacturers Association). Estas normas especifican las características físicas y eléctricas que un motor eléctrico debe cumplir, según su cantidad de polos y potencia nominal.

De esta norma se obtiene que, para un motor eléctrico de 37 [Kw] de potencia y 1.500 [rpm], su torque nominal tabulado es de 24,5 [kgfm]. En el Capítulo 3 se indicó que la transmisión de este motor hacia el eje horizontal de la prensa, se realiza mediante un sistema polea-correa con relación 2:1. Es por esta razón que el valor de este torque obtenido se duplicará:

$$NT = 2 \times 24,5 = 49 \text{ [kgfm]}$$

Con este valor se calcula la máxima fuerza de tracción sobre los pernos de anclaje según ACI 351 2R.

#### 7.3.2. Cálculo de fuerza máxima de tracción sobre pernos de anclaje

Para poder aplicar la ecuación (7.4), se considera:

- $NTM = M$  = torque sobre perno de anclaje = 49 [kgm] = 480,69 [Nm]
- $d_{bc}$  = diámetro de perno de anclaje: se evalúa la disponibilidad de varillas roscadas en el mercado y se decide utilizar una varilla roscada de 20 [mm] de diámetro y 260 [mm] de longitud. Se analiza el núcleo interno de la varilla, el cual es de 18,5 [mm] por lo que  $d_{bc} = 18,5 \text{ [mm]} = 0,0185 \text{ [m]}$ .
- $N$  = número de anclajes. Para la prensa seleccionada se consideran 4 pernos de anclaje, por lo tanto,  $N = 4$ .
- $W'$  = peso del equipo. De forma conservadora, siguiendo recomendaciones de Ingenieros proyectistas, se desprecia el peso del equipo.

Reemplazando valores se obtiene la fuerza de tracción sobre cada perno de anclaje.

$$F = \frac{4 \times M}{N \times d_{bc}} - \frac{W'}{N} \rightarrow F = 25,98 \text{ [kN]} = 2,65 \text{ [ton]}$$

### 7.3.3. Verificación de la resistencia a extracción del hormigón

A continuación, se debe realizar la siguiente verificación extraída del Reglamento ACI-318:

$$\Phi N_p > F$$

El valor de  $N_p$  se extrae de la Tabla 7.1.

**Tabla 7.1:** Resistencia a la extracción del hormigón. (Fuente: extraída de Guanchez, 2019, Universidad de Carabobo).

Diámetro de barra (in)	Área de barra		Área de apoyo		Resistencia a la extracción del concreto, $\Phi N_p$		
	(in <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(in <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	Grado 36	Grado 55	Grado 105
					( $f_y = 36 \text{ ksi o } 2530 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ) ( $f'_c = 3 \text{ ksi o } 210 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ )	( $f_y = 55 \text{ ksi o } 3867 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ) ( $f'_c = 4 \text{ ksi o } 280 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ )	( $f_y = 105 \text{ ksi o } 7382 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ) ( $f'_c = 5 \text{ ksi o } 350 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ )
					(tonf)	(tonf)	(tonf)
3/8	0.307	1.98	0.689	4.45	5.26	15.4	19.3
1/4	0.442	2.85	0.906	5.85	6.89	20.3	25.4
3/8	0.601	3.88	1.22	7.87	9.30	27.3	34.1
1	0.785	5.07	1.5	9.68	11.43	33.6	42
1 1/8	0.994	6.41	1.81	11.68	13.79	40.5	50.7
1 1/4	1.23	7.92	2.24	14.45	17.10	50.2	62.8
1 1/2	1.77	11.40	3.13	20.19	23.86	70.1	87.7
1 3/4	2.41	15.52	4.17	26.90	31.75	93.4	117
2	3.14	20.27	5.35	34.52	40.82	120	150

Para ello, es necesario la entrada de valores:

- $d_{bc} = 3/4" =$  diámetro del perno de anclaje
- $f_y = 55 \text{ [ksi]} = 3866,88 \text{ [kg/cm}^2\text{]} =$  varilla roscada ASTM Grado 55

Con estos valores se obtiene:

$$\Phi N_p = 20,3 \text{ [tonf]}$$

Por lo que:

$$20,3 \text{ [tonf]} > 2,65 \text{ [tonf]} \checkmark \text{ verifica la resistencia a extracción del hormigón}$$

### 7.3.4. Cálculo de profundidad efectiva $h_{ef}$

Se debe evitar, en lo posible, que exista un “efecto de grupo” entre los anclajes. Esto sucede cuando los anclajes se encuentran separados una distancia menor a 3 veces la profundidad efectiva de anclaje  $h_{ef}$ .

Analizando las dimensiones de la base, se observa que la distancia al borde de los pernos es de:

$$c_1 = 0,80 \text{ [m]}$$

Se calcula la profundidad efectiva disponible,  $h_{ef}$ , según ACI 318:

$$h_{ef} = \frac{c_1}{1,5} \rightarrow h_{ef} = 53,3 \text{ [cm]}$$

Lo anterior significa que, para una distancia máxima al borde de 80 [cm], la profundidad de embebido disponible es de 53,3 [cm] para obtener el desarrollo de la superficie cónica truncada resistente a la tracción. En otras palabras, el cono no se formará hasta los 53,3 [cm], por lo que se puede colocar el anclaje hasta esa profundidad. Como se elige una longitud total del perno de 26 [cm], la profundidad embebida del perno de anclaje, considerando 10 [cm] por fuera de la base, será de 16 [cm], lo cual verifica el concepto explicado, al ser esta profundidad menor a 53,3 [cm].

### 7.3.5. Cálculo de resistencia a la ruptura para un grupo de anclajes

Al ser la  $h_{ef} > 11$  [in], se utiliza la ecuación (7.3) para calcular la resistencia a la ruptura para un grupo de anclajes:

$$\Phi \times N_{cbg} = \Phi \times \Psi_3 \times \frac{A_N}{A_{NO}} \times 16 \times \sqrt{f'_c} \times h_{ef}^{5/3}$$

En donde:

- $\Phi = 0,7$
- $\Psi_3 = 1$
- $h_{ef} = 53$  [cm] = 21 [in]
- $A_N/A_{NO} = 1$ , no se considera efecto de grupo (ya que la separación entre pernos es mayor a 3 veces  $h_{ef}$ )
- $f'_c = 3555,84$  [psi]

Reemplazando valores se obtiene:

$$\Phi \times N_{cbg} = 106755 \text{ [lbf]} = 48,47 \text{ [tonf]}$$

A continuación, se realiza la siguiente verificación, extraída del Reglamento ACI-318:

$$\Phi N_{cbg} > F$$

$$48,47 \text{ [tonf]} > 2,65 \text{ [tonf]} \checkmark \text{ verifica resistencia a ruptura}$$

Como comentario final, las verificaciones obtenidas dan como resultado que la distancia de los pernos al borde de la cimentación es suficiente para que se desarrolle satisfactoriamente el cono de tensiones, por lo que no es necesario considerar la contribución del acero de refuerzo de la base conjuntamente con el anclaje. El tipo y número de pernos utilizados verifican satisfactoriamente.

La ubicación y el detalle constructivo de los mismos para la base diseñada, se muestran en el Plano del Anexo II.

### 7.4. Recomendaciones

- La longitud del perno debe cumplir con los requerimientos de capacidad de anclaje y capacidad en transferir las fuerzas de tracción al refuerzo vertical cuando sea necesario (suele ocurrir en equipos con altas cargas dinámicas). Para ello, el acero de refuerzo vertical deberá tener una longitud suficiente de desarrollo más allá del prisma de rotura.
- Se debe garantizar una adecuada separación entre el acero de refuerzo vertical y el anclaje para asegurar una adecuada transferencia de cargas.

- El perno de anclaje deberá ser lo más largo posible, con la finalidad de transferir las fuerzas hasta la parte inferior de la cimentación. Además, ayuda a desplazar el punto de inicio del potencial agrietamiento, lejos de las cargas dinámicas impuestas por el equipo.
- A mayor longitud del anclaje, mejor comportamiento del perno debido a que absorberá mejor los efectos de retracción del grout.
- No se recomiendan anclajes tipo “J” o “L” ya que tienden a “salirse” del hormigón antes de alcanzar su máxima capacidad de tracción.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1. CONCLUSIONES

1. La cota de fundación se estableció a -1,00 [m] como resultado de efectuar un proceso de análisis del perfil estratigráfico del suelo. En base a ello, se realizaron dos consideraciones: la primera, que el nivel freático se encuentre lo más alejado posible de la base de la cimentación para evitar daños a la estructura y la segunda, que la cota elegida permita emplazar la base sobre un estrato lo suficientemente resistente.
2. Para poder estimar el valor del módulo de corte dinámico  $G'$ , se empleó la correlación propuesta por el Reporte ACI 351, en donde se relaciona a este parámetro con la velocidad de onda de corte  $v_s$ . Esta velocidad, a su vez, depende del número de golpes  $N$  del ensayo *SPT*. Utilizando el Estudio de Suelos del Anexo I, se realizó un proceso iterativo en donde se analizaron las diferentes cotas de fundación propuestas, las cuales arrojaban diferentes valores de  $N$  y, por lo tanto, de  $v_s$ . Como resultado, se observó que, al modificar el estrato de suelo estudiado, variaban los valores de  $G'$ , incidiendo notablemente en los valores de Impedancia.
3. Las dimensiones finales del bloque de cimentación, obtenidas luego del proceso iterativo mencionado son: 3,50 [m] de ancho, 5,30 [m] de largo y una altura de 1,20 [m]. Se concluye que estas medidas obtenidas constituyen un resultado razonable para una base de equipo de gran magnitud y no implican una ejecución de obra diferente a la de una base tradicional. Esto es debido a que no existe una gran profundidad de excavación, ni requiere la depresión de napa freática, entre otros factores constructivos.
4. La verificación de la capacidad de carga del suelo se analizó en dos situaciones. La primera, en el momento en que la prensa se encuentra detenida y la segunda, cuando se encuentra en funcionamiento. Ambos casos se evaluaron a dos profundidades distintas: inmediatamente por debajo de la base y luego a una distancia de 0,50 [m] por debajo de la misma. En todos los escenarios estudiados se verifican las tensiones admisibles del estrato seleccionado (1,00 [kg/cm<sup>2</sup>]). En la Tabla 8.1 se resumen los resultados.

**Tabla 8.1:** Tensiones de trabajo del suelo a profundidades evaluadas. (Fuente: elaboración propia).

Estado de máquina	Cota evaluada	Tensión de trabajo
Detenida	-1,00	0,310 [kg/cm <sup>2</sup> ]
Detenida	-1,50	0,250 [kg/cm <sup>2</sup> ]
En funcionamiento	-1,00	0,326 [kg/cm <sup>2</sup> ]
En funcionamiento	-1,50	0,263 [kg/cm <sup>2</sup> ]

5. Debido al modo de operación de la máquina a fundar, el análisis dinámico de la cimentación se realizó considerando una única dirección de interés: la dirección vertical “y”. Para ello, se empleó el modelo de Veletsos y Verbic obteniendo, para una frecuencia de operación de 34 [rpm], un valor de rigidez dinámica de 57.181 [kN/m], y un valor de amortiguamiento de 3.171 [kNs/m].
6. Se obtuvo un valor de frecuencia natural del sistema suelo-cimentación de 0,11, el cual se encuentra fuera del límite de 0,80 a 1,20 veces la frecuencia de operación del equipo, por lo que cumple ampliamente con la verificación del efecto de resonancia.
7. La fuerza dinámica del equipo corresponde a una fuerza impulsiva, la cual relaciona la frecuencia de la máquina junto con el impulso que produce la mecánica de su funcionamiento. Luego de este análisis se obtuvo un valor de fuerza de 3.059,4 [kg].
8. A través del proceso iterativo, finalmente se obtuvo la amplitud máxima de desplazamiento con un valor de 0,54 [mm], cumpliendo con los diversos criterios de evaluación del desempeño ante vibraciones, como se mencionó en el apartado 6.6.5 del Capítulo 6. En resumen:
  - Criterio de Barkan:  $A_{adm} < 1,00$  [mm]
  - Criterio de Blake: se obtiene una categoría de desempeño “A”, la cual hace referencia a “un equipo sin defectos típico de equipo nuevo”.
  - Criterio de Reiher-Meister: a través de la gráfica se obtiene una categoría de desempeño bajo la curva “no perceptible para las personas”.
  - Criterio de Baxter-Bernhard: se obtiene una severidad de vibración de máquina “extremadamente suave”.
9. El cálculo de la cantidad de acero de refuerzo se realizó en base a las recomendaciones del Reglamento ACI 318-14. El cálculo permitió la adopción de barras de acero nervadas de tipo ADN420 con un diámetro de 20 [mm] separadas una distancia de 14 [cm] entre ellas, con un recubrimiento mínimo de 5 [mm]. Esta disposición se adopta en todas las direcciones de la cimentación. Por último, se realizó una verificación de espaciamiento entre barras según ACI 318 el cual arrojó datos satisfactorios que cumplen con el Reglamento.
10. En relación al control de agrietamiento del hormigón, se utilizó el procedimiento de cálculo según el ACI 318-95, el cual consiste en obtener un ancho probable de fisura, en función al recubrimiento, tipo de hormigón, tensión del acero, entre otros factores. Se obtuvo un ancho de grieta esperable de 0,0098 [pulg.], es decir 0,25 [mm], lo cual verifica el criterio según Tabla 5.6 del Capítulo 5.
11. La falta de información de la prensa elegida condujo a que se realicen una serie de consideraciones de su funcionamiento. Como conclusión, siempre es conveniente que el fabricante de la máquina provea toda la información necesaria para que el Ingeniero proyectista pueda realizar un diseño, no sólo lo más eficiente posible, sino también, en un tiempo más acotado. Es de destacar que, el fabricante también debe especificar las fuerzas y momentos desbalanceados, y los límites de las amplitudes permisibles por vibración de la máquina a fundar.
12. En proyectos de gran envergadura, donde las máquinas a fundar posean grandes valores de velocidades de operación y gran magnitud de cargas dinámicas, deberá evaluarse la posibilidad de realizar ensayos geofísicos correspondientes para la obtención de los parámetros dinámicos, en vez del uso de correlaciones, el cual fue el caso del presente Proyecto Final. Como se ha mencionado, el módulo de corte dinámico juega un papel importante en el diseño de una base de máquina, por lo que

la inversión para obtener el valor real del mismo, afecta directamente sobre la economía de la cimentación.

13. Finalmente se concluye que, si bien la geometría del bloque de la cimentación obtenida verifica ampliamente ante el efecto de resonancia, estas dimensiones son las mínimas para que la base cumpla con el criterio de amplitudes admisibles de Barkan. En otras palabras, como resultado de los cálculos iterativos realizados, no se puede utilizar una fundación de menores dimensiones a las propuestas.

En conclusión, la carga dinámica aplicada en la dirección analizada con el sistema de cimentación propuesto, no afectará al buen desempeño de la máquina ni producirá daños sobre él. Además, no generará vibraciones perceptibles a personas ni estructuras circundantes.

## **8.2. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS**

A lo largo del presente Proyecto Final, se han expuesto distintas consideraciones que se incorporaron en el diseño de la fundación de la máquina propuesta. En este apartado, se enuncian las recomendaciones constructivas para una cimentación de máquina.

La construcción de una fundación para equipo vibratorio constituye un subgrupo dentro de las fundaciones superficiales convencionales, aunque su única característica en común, es la relación entre la cota de fundación y el ancho de la base, siendo la misma menor a cuatro.

### **8.2.1. Condiciones geotécnicas.**

Como se ha mencionado, las fundaciones para equipos vibratorios se diseñan con el objetivo de que el conjunto cimentación-equipos posea una frecuencia de vibración distinta a la frecuencia de operación de la máquina, evitando así, el acople de frecuencias. Esto se verifica aportando volumen suficiente a la cimentación, adoptando a su vez, las dimensiones necesarias que verifiquen la capacidad portante del suelo.

En función al tipo de suelo a fundar, pueden existir diversos aspectos que ameriten tratamientos para mejorarlo. La presencia de suelos expansivos son una razón para tal fin. Es recomendable que los mismos sean retirados en un perímetro mínimo de 2,5 veces el ancho de la cimentación, ya que, con el transcurso del tiempo, pueden generar asentamientos diferenciales, traduciéndose en esfuerzos no considerados en el diseño. No obstante, también puede ser previsto un sistema de desagüe y drenaje de aguas de infiltración generadas por precipitaciones, alrededor de la cimentación.

Si el suelo de fundación presenta sulfatos o cloruros, se deben emplear cementos o aditivos que proporcionen al hormigón resistencia al ataque de los mismos. Se puede optar por el uso de contrapisos de hormigón de limpieza (hormigón pobre) como base de apoyo de la fundación o membranas impermeables para evitar el contacto de dichos componentes con el hormigón estructural.

Cuando se deba fundar sobre suelos de deposición eólica, se recomienda remover el suelo hasta un cierto espesor y colocarlo nuevamente, ejerciendo sobre él acciones de compactación a través de vibración mecánica. De esta forma, se mejoran las condiciones del mismo.

### **8.2.2. Localización.**

La localización y el replanteo de una cimentación, tanto en planta como en elevación, es una tarea que se debe realizar con especial atención, empleando los elementos topográficos correspondientes, ya que un correcto replanteo evita problemas o demoliciones futuras.



Es técnica común ejecutar un levantamiento de control. El mismo trata de relevar los puntos marcados en el replanteo, ejecutar un nuevo plano, y compararlo con el plano de proyecto, con el fin de verificar que las cotas de proyecto cumplan con lo replanteado en obra.

A su vez, los equipos vibratorios deben ser fijados mediante elementos de anclaje, donde sus especificaciones y plantilla de ubicación deben ser, en lo posible, provistas por el fabricante del equipo.

Es vital que el replanteo de los pernos, tanto en planta como en elevación, se ejecute sin errores y una vez emplazados deben ser correctamente protegidos y sujetos para evitar movimientos de los mismos durante el volcado y el vibrado del hormigón. Sólo podrán ser sujetos mediante amarres de alambre dulce.

Es importante aclarar que, si al momento de hormigonado de la fundación, no se encuentran disponibles los pernos de anclaje, se debe prever de un espacio tipo cavidad en la cimentación, que posteriormente los albergará. Los mismos se rellenarán con resinas epóxicas.

### **8.2.3. Técnicas de vaciado y juntas**

Al igual que en cualquier obra de hormigón armado, para una cimentación de máquina, la calidad de los materiales y las técnicas de control de temperatura, asentamiento y vibrado, son de gran importancia.

Es de público conocimiento que, si el gradiente de temperatura del hormigón alcanza un valor alto, aparecerán en él grietas de retracción. De la misma forma, las técnicas de vibrado deben ser tales que eviten la generación de oquedades dentro del volumen de la cimentación, ya que dichos elementos reducen notablemente el rendimiento de la misma.

Los vaciados de las fundaciones masivas merecen atención especial y requieren un plan detallado de volúmenes de vuelco, ya que deberán evitarse la ejecución de juntas frías. Para esto, los tiempos entre vaciados no deben exceder un tiempo mayor de 15 a 20 minutos, a menos que se empleen retardadores de fraguado o cemento de bajo calor de hidratación.

En caso de que se detenga totalmente el vaciado, el ángulo de la junta debe ser menor a 45° y se debe disponer de suficiente acero de refuerzo sin cubrir para asegurar la integridad.

El mortero cumple la función de puente de adherencia, entre el hormigón ya endurecido y el fresco y aunque el mortero tenga retracción, las técnicas de vibrado lo hacen incorporarse al hormigón fresco cumpliendo su objetivo. Es de destacar que la calidad y la relación agua-cemento del mismo, deben ser similares a la del hormigón fresco a volcar.

Otra opción, es emplear resinas epóxicas como puente, aunque éstas tienen como desventaja que poseen un tiempo de endurecimiento relativamente corto. De todas formas, estos elementos epóxicos son ideales para reparar discontinuidades u oquedades pequeñas.

No es recomendado reiniciar las tareas de llenado después de tres días, desde su detenimiento.

### **8.2.4. Excavaciones**

Las excavaciones constituyen una fase fundamental en las etapas de construcción de cualquier cimentación. Para esto se utilizan maquinarias que permitan la excavación de los volúmenes de suelo y a su vez, es necesaria la presencia ocasional de personas en el fondo de la misma, ya sea, para la verificación de los niveles, tareas de armado, entre otras. Para garantizar su seguridad, se debe contemplar el uso de entibados de las paredes de la excavación.

El presente apartado escapa del desarrollo de la teoría de cálculo de la estabilidad de excavaciones y del tipo de entibado a emplear. De igual manera, se recomienda que, si el fondo de la excavación no requiere la presencia del personal de obra, y se garantiza una continuidad de la misma en un tiempo de trabajo relativamente corto, se puede considerar no emplear entibados en arcillas blandas o medias.

Por otra parte, si existiera la visita de personas al fondo de la excavación, sólo se debe considerar eliminar el entibado cuando las excavaciones se realicen en arcillas firmes a duras, que no presenten agrietamientos en la superficie.

Para el caso de excavaciones en suelos arenosos, el nivel freático causaría inestabilidad en las paredes de la excavación, por tal motivo, se debe disponer de entibado. Para garantizar la estabilidad del fondo se debe analizar el flujo de agua freática a través de la arena. Si el mismo es alto, deberá emplearse un sistema de bombeo con el objetivo de deprimir el nivel.

### **8.2.5. Material circundante**

Como se ha estudiado a lo largo del Capítulo 4 de este Proyecto Final, el amortiguamiento del sistema suelo-cimiento es imprescindible para el correcto funcionamiento de la base calculada. En el diseño de la misma (Capítulo 6) se contempló un amortiguamiento del suelo circundante, por lo cual, es indispensable que el suelo lateral se encuentre en contacto con la base, sin la presencia de vacíos, ya que estos generan una disminución de la eficiencia del amortiguamiento de dicho sistema. De la misma forma, el suelo por debajo de la cimentación, debe cumplir con las características proyectadas.

Recordando que el amortiguamiento total se compone por el amortiguamiento por radiación y el histérico, si existen espacios entre el suelo y la cimentación, el amortiguamiento por radiación disminuye. Esto ocurre debido a que las ondas se reflejan hacia la fundación en lugar de irradiarse lejos de ella, acumulándose la energía en el sistema de suelo-cimiento.

De igual manera, cuando el material a los lados de la base permita la separación del suelo y la misma, el amortiguamiento por histéresis también disminuye, ya que no existe el acoplamiento de la base al suelo circundante, generando que ambos se muevan independiente uno de otro. Por lo que, si no se garantiza un acoplamiento entre la fundación y el suelo, gran parte de la energía que genera el funcionamiento de la máquina, en lugar de disiparse, se permanece dentro del sistema equipo-cimiento, e induce fuerzas desbalanceadas en el conjunto.

En consecuencia, es de vital importancia que los rellenos alrededor de las bases de equipos vibratorios se encuentren bien compactados y ejecutados con materiales que permitan una unión adecuada entre el suelo y la fundación.

En general, diversos autores recomiendan, a tal fin, emplear rellenos laterales con materiales de baja plasticidad con alto contenido de arenas, como lo es el material denominado A2-4, de las Normas AASHTO. Este material contiene la cantidad suficiente de material granular (arena) y de material cohesivo (arcilla), para mantener alto el valor del amortiguamiento por histéresis y para obtener una adecuada compactación y contacto, aumentando el valor de amortiguamiento por radiación, respectivamente.



## REFERENCIAS

- American Concrete Institute. (2014). *Building code requirements for structural concrete*. ACI 318-14. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (1995). *Effect of restraint, volume change, and reinforcement on cracking of mass concrete*. ACI 207-2R. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (1994). *Foundations for Static Equipment*. ACI 351.2R-94. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2018). *Report on foundations for dynamic equipment*. ACI 351.3R-18. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Bhatia, K. G. (2008). *Foundations for industrial machines*. New Delhi: D-CAD Publishers.
- Bowles, J. (1997). *Foundation analysis and design*. Singapur: Mcgraw-Hill.
- Brady, N. C y Weil, R. (2008). *The nature and properties of soils*. Willard: Pearson.
- Das, Braja M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Cengage Learning Editores S.A.
- Fratelli, M. G. (1993). *Suelo, Fundaciones y Muros*. Venezuela: Astrom.
- García Reyes, L. E. (1998). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Guanchez, E. (2019). *Aspectos sismo-geotécnicos considerados en el diseño de cimentaciones*. Recuperado de <https://www.prontubeam.com/articulos/2019-08-22-Aspectos-sismo-geotecnicos-considerados-en-el-diseno-de-cimentaciones>.
- Gruzinski, K. y Jaroszweicz, W. (2004). *Seating of machines and devices on foundation chocks cast of epy resin compound*. Szczecin: Zapol.
- Hardin, B.O., Drnevich V.P. (1972). *Shear modulus and damping in soils: designing equations and curves*. ASCE, 667-692.
- Herrera Castiblanco, F. A. (2017). *Manual para diseño de cimentaciones para equipos vibratorios*. Tesis de grado. Universidad Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial. (2005). *Reglamento argentino de estructuras de hormigón*. CIRSOC 201-05. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Ivanoff, V. (1963). *Cálculos y proyectos de cimientos para máquinas*. Argentina: Librería Mitre.
- *Ondas sísmicas*. Universidad de Cataluña. Disponible en: [https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/ondas\\_s%EDsmicas.htm](https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/ondas_s%EDsmicas.htm)
- Maldonado Pacheco, D. A. C. y Figueroa Tapia, L. B. (2020). *Diseño de la cimentación de una bomba centrífuga horizontal empleando el método del semiespacio elástico*. Tesis de grado. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Paz, M. (1992). *Dinámica estructural*. Barcelona: Reverté S.A.

- Prakash, S. (1981). *Soil Dynamics*. Texas: McGraw-Hill.
- Richart et al., (1970). *Vibration of soils and foundations*. New Jersey: Prentice Hall-Inc.
- Rossi, M. (1971). *Estampado en caliente de los metales*. Buenos Aires: Científico Médica.
- Salazar Contreras, J.C (2013). *Cálculo y diseño de cimentaciones para equipos y maquinaria presentes en una facilidad de producción petrolera*. Tesis de grado. Universidad Politécnica del Ejército.
- Taco, A. (2009). *Manual de diseño de cimentaciones tipo bloque para equipo dinámico*. Sangolquí. Tesis de grado. Escuela Politécnica del ejército.
- Vucetic, M., Dobry, R. (1991). *Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response*. Journal of Geotechnical Engineering, 117, 89-107.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barrera, I. (2014). *Diseño dinámico de una cimentación para un compresor reciprocante en la refinería “Cepsa-La Rabida” en Huelva, España*. Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bazán, E. y Meli, R. (1995). *Diseño sísmico de edificios*. México: Limusa S.A.
- Das, Braja M. (2015). *Principles of soil dynamics*. Sacramento: Cengage Learning Editores S.A.
- Peck R., Hanson W., Thornburn T. (2004). *Ingeniería de cimentaciones*. México: Limusa S.A.
- Rodríguez, A. D. (2005). *Dinámica de suelos*. México: Limusa S.A.
- Young, H y Freedman, R. (2013). *Física universitaria volumen I*. México: Pearson.

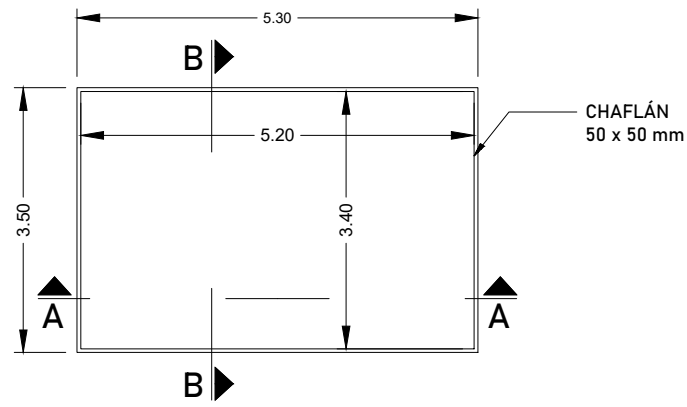


# **ANEXO I: PLANOS**



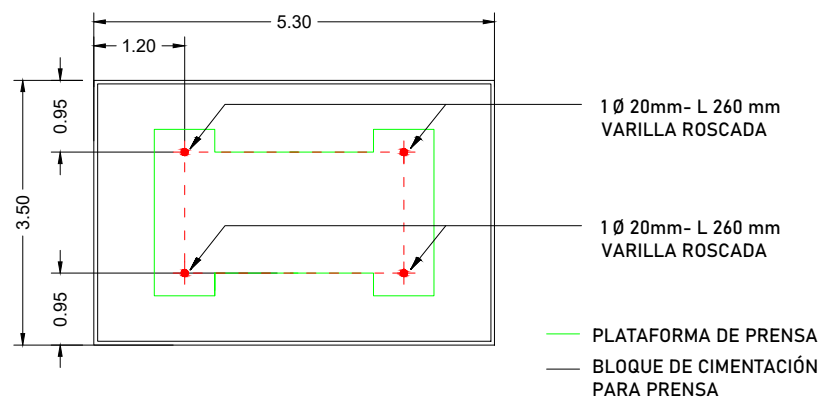






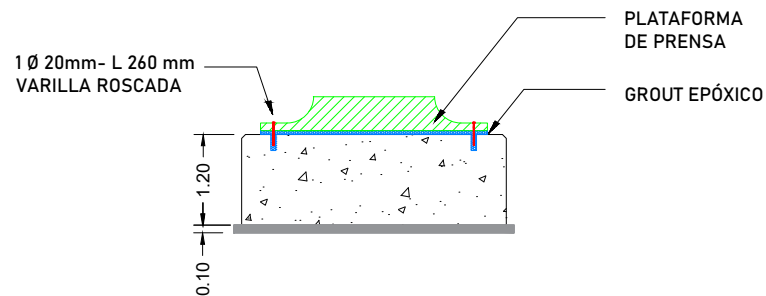
BLOQUE DE CIMENTACIÓN PARA PRENSA  
MECÁNICA A FRICCIÓN 250tn  
PLANTA

ESCALA: 1:100



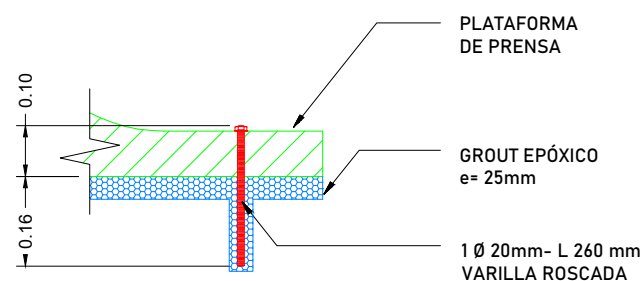
ANCLAJE: VARILLA ROSCADA Ø20mm  
PLANTA

ESCALA: 1:100



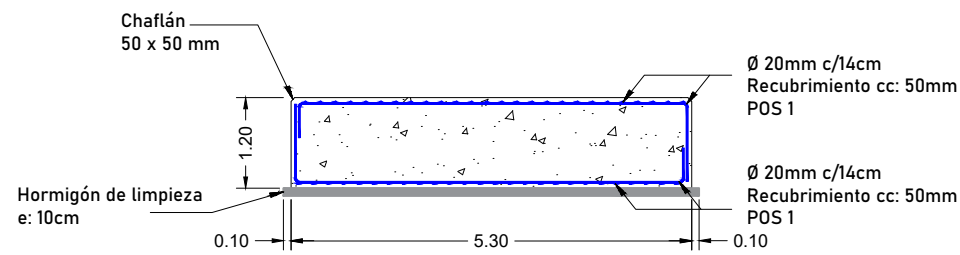
ANCLAJE: VARILLA ROSCADA Ø20mm  
CORTE B-B

ESCALA: 1:100



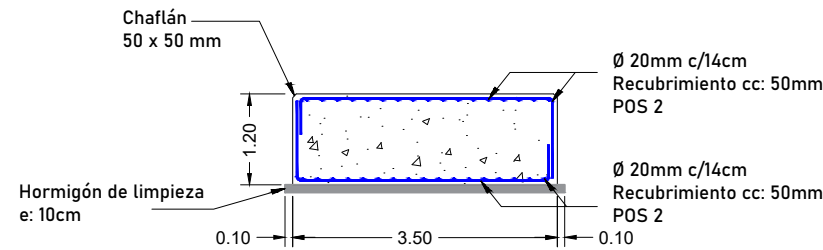
ANCLAJE: VARILLA ROSCADA Ø20mm  
DETALLE

ESCALA: 1:25



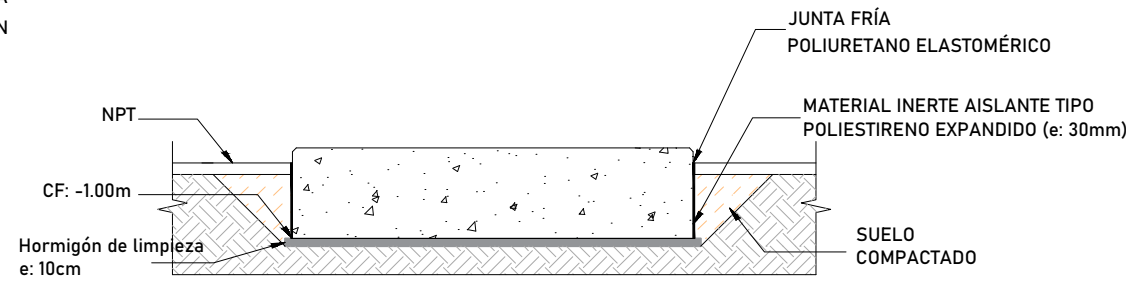
BLOQUE DE CIMENTACIÓN PARA PRENSA  
MECÁNICA A FRICCIÓN 250tn  
CORTE A-A

ESCALA: 1:100



BLOQUE DE CIMENTACIÓN PARA PRENSA  
MECÁNICA A FRICCIÓN 250tn  
CORTE B-B

ESCALA: 1:100



CORTE DE TERRENO  
CORTE A-A

ESCALA: 1:100

PLANILLA DE DOBLADO DE HIERROS

POS	DOBLADO	Ø [mm]	CANT	LONG. UNIT. [mm]	LONG. TOTAL [mm]	MANDRIL DOBLADO [mm]
1	1100  400 5200	20	48	6700	321600	120
2	1100  400 3400	20	74	4900	362600	120

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

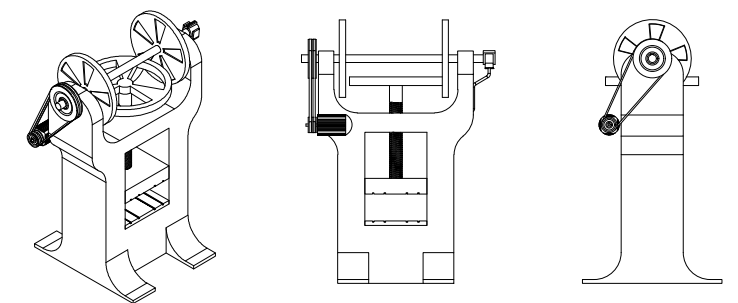
GENERAL	Todas las medidas están expresadas en metros, a menos que se indique otra unidad. Las medidas en el plano deberán ser verificadas en la obra por el contratista y el supervisor antes de proceder a construir. Las modificaciones de materiales previstos deben ser consultadas con el proyectista.
HORMIGÓN	Los componentes del hormigón (cemento, agregados y agua) deberán cumplir con las especificaciones del CIRSOC 201/05. Resistencia a la compresión del hormigón: $f'c$ : 25 [MPa]
HORMIGÓN DE LIMPIEZA	Resistencia a la compresión del hormigón: $f'c$ : 8 [MPa]
ACERO	Barras de refuerzo nervadas Ø20 [mm] ADN 420: $f_y$ : 420 [MPa]
ANCLAJES	4 Varillas roscadas Ø20 [mm] - Longitud: 260 [mm] Acero al carbono ASTM Grado 55, galvanizado.

PARÁMETROS

Cota de fundación	CF: 1,00 [m]
Tensión admisible	$\sigma_{adm}$ : 1,00 [kg/cm <sup>2</sup> ]
Tensión de trabajo	$\sigma_t$ : 0,326 [kg/cm <sup>2</sup> ]

RESPUESTA DINÁMICA

Amplitud vertical máxima	A: $5,40 \times 10^{-4}$ [m]
Fuerza transmitida	$F_{tc}$ : 3.054,30 [kg]
Rigidez dinámica	$k_y$ : 57.181 [kN/m]
Amortiguamiento	$c_y$ : 3.171 [kNs/m]



PRENSA MECÁNICA A FRICCIÓN DE 250tn  
VISTAS

DISEÑO DE UNA CIMENTACIÓN  
SOMETIDA A CARGAS DINÁMICAS  
PROVOCADAS POR PRENSA MECÁNICA  
DE ALTO IMPACTO

Plano N°: 02

Año: 2021

FERRERO, Luciana Leg: 5973  
TURINO, Milagros Leg: 5674

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL - FACULTAD REGIONAL RAFAELA

PLANO DE BLOQUE DE CIMENTACIÓN DE  
PRENSA MECÁNICA DE 250tn