

## INDICE DE MATERIAS

Prólogo . . . . .	VII
-------------------	-----

### PRIMERA PARTE

<b>Capítulo primero. — PRESIONES LATERALES. VACIADO CENTRADO . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>1. Teorías de los más importantes especialistas mundiales . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Presiones hidrostáticas</i> . . . . .	2
1.2. <i>Isaac Roberts (Inglaterra)</i> . . . . .	3
1.2.1. Ensayo 1 . . . . .	3
1.2.2. Ensayo 2 . . . . .	4
1.2.3. Ensayo 3 . . . . .	4
1.2.4. Ensayo 4 . . . . .	5
1.2.5. Conclusiones . . . . .	5
1.2.6. Experiencias realizadas en silos reales . . . . .	6
1.3. <i>Janssen y Pleizner (Alemania)</i> . . . . .	8
1.3.1. Notación . . . . .	8
1.3.2. Derivación de la fórmula . . . . .	8
1.3.3. El coeficiente «K» . . . . .	10
1.3.4. Ejemplo numérico . . . . .	10
1.4. <i>Airy (Inglaterra)</i> . . . . .	11
1.4.1. Notación . . . . .	11
1.4.2. Fórmulas de presiones laterales . . . . .	12
1.4.3. Ejemplo numérico 1 . . . . .	13
1.4.4. Ejemplo numérico 2 . . . . .	14
1.5. <i>Jamieson (Canadá)</i> . . . . .	15
1.5.1. Introducción . . . . .	15
1.5.2. Ensayos en silos reales . . . . .	16
1.5.3. Ensayos en maquetas a escala reducida . . . . .	20
1.6. <i>Marcel Reimbert (Francia)</i> . . . . .	22
1.6.1. Presentación por M. Henry Lossier, Presidente I.T.B.T.P. . . . .	22
1.6.2. Teoría de Reimbert . . . . .	22

1.6.3.	Ensayos . . . . .	23
1.6.4.	Cálculo de las presiones sobre las paredes de los silos .	24
1.6.5.	Investigación de la función de la curva representativa de la carga equilibrada por rozamiento con las paredes de un silos . . . . .	26
1.6.6.	Valores del coeficiente «K»: Relación entre presiones ver- ticales y horizontales . . . . .	27
1.6.7.	Conclusión de los ensayos realizados con cápsulas ma- nométricas . . . . .	28
1.6.8.	Ensayos realizados en las paredes de los silos con siste- mas piezoeléctricos . . . . .	28
1.6.9.	Marcel y André Reimbert. Construcción de silos: teoría y práctica. Año 1971 . . . . .	29
1.6.10.	Ensayos efectuados en los silos de Chateau London y Crecy-en-Brie . . . . .	32
1.6.11.	Cómo evitar las sobrepresiones de vaciado mediante la co- locación del tubo antidinámico . . . . .	32
1.7.	<i>Teoría de Caughey, Tooles, Scheer (Civil Engineering)</i> <i>U.S.A., 1951</i> . . . . .	34
1.7.1.	Introducción . . . . .	34
1.7.2.	Experimentos realizados por Caughey, Tooles y Scheer .	34
1.7.3.	Conclusiones . . . . .	37
1.8.	<i>Werner Bergau y Kallstenius (Suecia, 1959)</i> . . . . .	38
1.8.1.	Medida de presiones en silos para granos durante el llena- do y vaciado . . . . .	38
1.8.2.	Ensayos . . . . .	38
1.8.3.	Efectos dinámicos . . . . .	43
1.8.4.	Estudio del flujo mediante el vaciado de una maqueta de caras transparentes. Torsten Kallstenius . . . . .	43
1.9.	<i>Michal S. Zakrzewski (Africa del Sur, 1959)</i> . . . . .	45
1.9.1.	Diseño de silos para almacenamiento de cereales . . . .	45
1.9.2.	Efectos dinámicos . . . . .	46
1.10.	<i>Alexander M. Turitzin (U.S.A., 1963)</i> . . . . .	50
1.10.1.	Presiones dinámicas ejercidas por los materiales granulares en silos (celdas altas) . . . . .	50
1.10.2.	Ensayos de Takhtamishev . . . . .	51
1.10.3.	Ensayos de Kim . . . . .	53
1.10.4.	Ensayos de Kovtum y Platonov . . . . .	56
1.10.5.	Presiones dinámicas . . . . .	59
1.10.6.	Conclusiones . . . . .	61
1.11.	<i>D. Lenczner (Inglaterra, 1963)</i> . . . . .	62
1.11.1.	Investigación sobre el comportamiento de arena en ma- quetas . . . . .	62
1.11.2.	Ensayos sobre el flujo. Forma del flujo . . . . .	62
1.11.3.	Distribución de presiones sobre el fondo en una maqueta con arena en reposo . . . . .	64
1.11.4.	Presiones sobre las paredes por rozamiento y sobre el fondo . . . . .	64
1.11.5.	Presiones sobre el fondo y las paredes por rozamiento durante el llenado y vaciado . . . . .	66

1.11.6. Comparación de los resultados experimentales con las teorías existentes . . . . .	67
1.11.7. Interpretación teórica de los ensayos durante el vaciado . . . . .	68
1.11.8. Resumen . . . . .	71
1.12. <i>Laforge, R. M. y Boruff. Año 1964</i> . . . . .	72
1.12.1. Determinación del flujo de vaciado en celdas y tolvas . . . . .	72
1.13. <i>Normas alemanas DIN 1055</i> . . . . .	76
1.13.1. Conceptos y alcance de validez . . . . .	76
1.13.2. Cálculo de cargas . . . . .	76
1.13.3. Cargas a profundidad infinita . . . . .	78
1.13.4. Cargas a profundidad finita . . . . .	78
1.13.5. Influencias incrementadoras de la carga . . . . .	79
1.13.6. Influencias reductoras de la carga . . . . .	79
1.13.7. Dispositivos especiales de llenado y vaciado . . . . .	79
1.13.8. Casos especiales . . . . .	79
1.14. <i>Rudolf Kvapil. Año 1965</i> . . . . .	80
1.14.1. Flujo por gravedad de los materiales granulares en tolvas y celdas . . . . .	80
1.15. <i>Handley, M. F. Año 1967. Medida de los esfuerzos internos en los sólidos granulares fluyendo. Tesis doctoral. Universidad de Sheffield</i> . . . . .	86
1.15.1. Análisis teórico de la distribución de presiones estáticas . . . . .	86
1.15.2. Análisis teórico de la distribución de presiones dinámicas . . . . .	87
1.15.3. Conclusiones de los trabajos teóricos y prácticos . . . . .	89
1.15.4. Experimentos realizados con una píldora radiosensitiva . . . . .	90
1.15.5. Discusión de los resultados obtenidos . . . . .	90
1.15.6. Conclusiones . . . . .	93
1.16. <i>Teoría de Jenike y Johanson. Año 1968</i> . . . . .	94
1.16.1. Estado activo y pasivo de presiones . . . . .	95
1.16.2. Cargas en una celda o silo . . . . .	96
1.16.3. Criterio que gobierna el desarrollo del flujo másico en una celda . . . . .	99
1.16.4. Distribución de las fuerzas concentradas «P» producidas por la onda de sobrepresiones . . . . .	101
1.16.5. Cargas en las celdas de flujo de embudo . . . . .	103
1.17. <i>Klaus Pieper (Alemania, 1969). Investigación mediante la medición en modelos de las cargas en los silos</i> . . . . .	104
1.17.1. Introducción . . . . .	104
1.17.2. Maquetas utilizadas . . . . .	105
1.17.3. Efecto de la aspereza de las paredes del silo . . . . .	105
1.17.4. Efecto de la velocidad de vaciado . . . . .	108
1.17.5. Comportamiento de materiales muy finos . . . . .	108
1.17.6. Propiedades de los productos ensilados . . . . .	110
1.17.7. Conclusiones . . . . .	111
1.18. <i>Theimer, Ingeniero Consultor. Munich (Alemania). Fallas en silos de hormigón armado para granos</i> . . . . .	111
1.18.1. Causas más frecuentes de fallas en silos . . . . .	111
1.18.2. Problemas en cimentaciones . . . . .	111

1.18.3. Inexperiencia en el cálculo de presiones estáticas y dinámicas . . . . .	113
1.18.4. Sobrepresiones de vaciado . . . . .	115
1.18.5. Problemas ocurridos en silos . . . . .	122
1.18.6. Presiones dinámicas previstas por Theimer . . . . .	123
1.19. <i>Sargis S. Safarian. Año 1969. Presiones de diseño de los materiales granulares en silos</i> . . . . .	125
1.19.1. Sobrepresiones de vaciado . . . . .	125
1.19.2. Cálculo de la curva de presiones laterales prevista . . . . .	127
1.20. <i>Lumbroso, A. Año 1970. Determinación numérica de los esfuerzos ejercidos por la masa almacenada en los silos</i> . . . . .	128
1.20.1. Objeto e hipótesis de base . . . . .	128
1.20.2. Origen experimental de las teorías exponenciales y las dimensiones de los silos . . . . .	130
1.20.3. Valores estimados de $W$ , $\varphi$ , $\Psi$ . . . . .	131
1.20.4. Coeficientes de comportamiento y esfuerzos sobre las paredes . . . . .	132
1.20.5. Variación de las presiones sobre las paredes . . . . .	137
1.21. <i>Garg, R. M. (India, 1972)</i> . . . . .	137
1.21.1. Presiones máximas de los materiales granulares en silos . . . . .	137
1.21.2. Código ruso CH-302-65 . . . . .	140
<b>Capítulo II. — PRESIONES LATERALES. VACIADO EXCÉNTRICO</b> . . . . .	<b>143</b>
<b>2. Teorías de los más importantes especialistas mundiales</b> . . . . .	<b>143</b>
2.1. <i>Jamieson (Canadá, 1904)</i> . . . . .	143
2.2. <i>Reimbert (Francia, 1943)</i> . . . . .	146
2.2.1. Presiones en la pared opuesta a la boca de salida en silos disimétricos . . . . .	146
2.3. <i>Normas alemanas DIN 1055. Año 1964</i> . . . . .	146
2.3.1. Vaciado excéntrico en silos cilíndricos de hormigón armado . . . . .	146
2.4. <i>Jenike, A. W. Año 1967</i> . . . . .	147
2.4.1. Deformaciones en silos cilíndricos con salidas excéntricas . . . . .	147
2.5. <i>Sargis S. Safarian (EE.UU., 1969)</i> . . . . .	152
2.5.1. Efectos de la descarga excéntrica . . . . .	152
2.6. <i>Theimer (Alemania, 1969)</i> . . . . .	155
2.6.1. El vaciado excéntrico . . . . .	155
2.7. <i>Klaus Pieper (Alemania, 1969)</i> . . . . .	156
2.7.1. Efectos producidos por las bocas de salida excéntrica en silos . . . . .	156
2.8. <i>Lumbroso, A. (Francia, 1970)</i> . . . . .	159
2.8.1. Presiones producidas por el vaciado excéntrico en silos rectangulares . . . . .	159
2.8.2. Silos circulares con vaciado excéntrico . . . . .	159
2.9. <i>Garg, R. M. (India, 1972)</i> . . . . .	161

<b>Capítulo III. — ENSAYOS DE RAVENET . . . . .</b>	<b>165</b>
<b>3. Teorías emitidas por Ravenet y derivadas de las fotografías del flujo de vaciado realizadas en maquetas de caras transparentes . . . . .</b>	<b>165</b>
3.1. <i>Vaciado centrado. Relación altura-lado igual a 6 . . . . .</i>	165
3.2. <i>Vaciado centrado. Relación altura-lado igual a 2 . . . . .</i>	169
3.3. <i>Vaciado excéntrico. Relación altura-lado igual a 7 . . . . .</i>	171
3.4. <i>Vaciado excéntrico. Relación altura-lado igual a 1,5. . . . .</i>	175
3.5. <i>Ensayos efectuados en maquetas a escala reducida utilizando galgas extensométricas para la medición de presiones . . . . .</i>	178
3.5.1. <i>La maqueta utilizada . . . . .</i>	178
3.5.2. <i>Las galgas extensométricas . . . . .</i>	178
3.5.3. <i>Objeto de los ensayos experimentales . . . . .</i>	180
3.5.4. <i>Ensayos realizados en maqueta con tolva de 45° de pendiente, vaciado centrado, relación altura-lado igual a 6 . . . . .</i>	180
3.5.5. <i>Ensayos realizados en la maqueta con tolva de 45° de pendiente, vaciado centrado, relación altura-lado igual a 1,5 . . . . .</i>	182
3.5.6. <i>Ensayos realizados en la maqueta, con fondo plano, boca de salida excéntrica (excentricidad del 66 %). Relación altura-lado igual a 7 . . . . .</i>	184
3.5.7. <i>Ensayos realizados en la maqueta con fondo plano, boca de salida excéntrica (excentricidad del 66 %). Relación altura-lado igual a 1,5 . . . . .</i>	188
3.6. <i>Confrontación de los valores experimentales con las fotografías del flujo de vaciado . . . . .</i>	190
3.7. <i>Conclusiones . . . . .</i>	193
3.8. <i>Resumen de las teorías emitidas . . . . .</i>	197

**SEGUNDA PARTE**

<b>Capítulo IV. — REALIZACIONES . . . . .</b>	<b>203</b>
<b>4. Silos metálicos . . . . .</b>	<b>203</b>
4.1. <i>Silos cilíndricos de chapa lisa . . . . .</i>	203
4.1.1. <i>Cálculo de un silo metálico, cilíndrico, de 12 m de diámetro y 24 m de altura, apoyado sobre una tolva de hormigón armado . . . . .</i>	204
4.1.2. <i>Techo . . . . .</i>	210
4.1.3. <i>Esfuerzos del viento . . . . .</i>	214
4.1.4. <i>Comprobación de la estabilidad de la instalación al vuelco . . . . .</i>	216
4.2. <i>Silos cilíndricos de chapa ondulada . . . . .</i>	222
4.2.1. <i>Cálculo de un silo metálico cilíndrico, de chapa ondulada, elevado sobre pilares Diámetro 4 m, altura 20 m, con tolva metálica suspendida, de 45° de pendiente . . . . .</i>	222

4.3.	<i>Silos cuadrados con chapa de plegado trapecial . . . . .</i>	239
4.3.1.	Estudio de un silo metálico tipo 2/4, elevado y provisto de tolvas metálicas a 45°, ocho celdas cuadradas de 4,25 m de lado y 25 m de altura . . . . .	241
4.3.2.	Silos para almacenamiento de productos cohesivos . . . . .	269
4.4.	<i>Silos octogonales metálicos con chapa de plegado trapecial . . . . .</i>	281
4.4.1.	Estudio de un silo metálico octogonal tipo 3/3, apoyado sobre cimientos y tolvas de hormigón. Nueve celdas octogonales de 3 m de lado y cuatro interceldas cuadradas de 3 m de lado. Altura 35 m. Destinado a almacenamiento de cereales . . . . .	282
4.5.	<i>Extensión del silo metálico: las modernas fábricas de piensos . . . . .</i>	302
<b>5.</b>	<b>Silos de hormigón armado . . . . .</b>	<b>304</b>
5.1.	<i>Silos cuadrados multicelulares . . . . .</i>	304
5.1.1.	Estudio de un silo de hormigón armado multicelular tipo 3/2 y formado por seis celdas cuadradas, cada una con dimensiones en planta de 5 × 5 m y altura 30 m . . . . .	305
5.2.	<i>Estudio de un silo multicelular rectangular de lados 5 m y 2,5 m y altura de 30 m . . . . .</i>	316
5.3.	<i>Silos de hormigón armado circulares unicelulares . . . . .</i>	323
5.3.1.	Espesor en las paredes . . . . .	323
5.3.2.	Grietas: anchura máxima admisible . . . . .	326
5.3.3.	Distribución no uniforme de la presión horizontal . . . . .	328
5.3.4.	Efectos de la temperatura . . . . .	329
5.4.	<i>Silos de hormigón armado cilindricos multicelulares . . . . .</i>	331
5.4.1.	Momentos derivados del llenado de una intercelda sobre las paredes contiguas . . . . .	333
5.4.2.	Momentos derivados del llenado de una celda circular sobre las paredes contiguas . . . . .	343
5.5.	<i>Cálculo de un silo multicelular con celdas cilindricas de 12 m de diámetro y 45 m de altura . . . . .</i>	348
5.5.1.	Determinación del espesor de la pared . . . . .	349
5.5.2.	Cálculo de la armadura a tracción . . . . .	349
5.5.3.	Grietas: comprobación de la anchura máxima admisible . . . . .	350
5.5.4.	Efectos de la temperatura . . . . .	351
5.5.5.	Momentos derivados del llenado de una intercelda sobre las paredes contiguas . . . . .	352
<b>6</b>	<b>Cálculo y diseño de silos para almacenamiento de cemento . . . . .</b>	<b>366</b>
6.1.	<i>Silo de hormigón armado agrietado y deformado . . . . .</i>	366
6.2.	<i>Silo deformado para almacenamiento de cemento en Inglaterra . . . . .</i>	367
6.3.	<i>Propiedades físicas del cemento y extracción . . . . .</i>	368
6.4.	<i>Otros ensayos realizados . . . . .</i>	371
<b>Bibliografía . . . . .</b>		<b>377</b>