UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIDAD DE POSGRADO

FALLA DE LA CIMENTACIÓN DEL GRANERO DE SILOS DE TRANSCONA

Dr. Ing. Jorge E. Alva Hurtado

www.jorgealvahurtado.com

GRANERO DE TRANSCONA

CONTENIDO

- ANTECEDENTES
- DATOS TÉCNICOS
- DATOS GENERALES DE LA FALLA
- DESCRIPCIÓN DEL TERRENO DESPUÉS DE LA FALLA
- ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE CARGA DESPUÉS DE LA FALLA
- TRABAJOS DE REPARACIÓN
- LECCIONES APRENDIDAS
- CONCLUSIONES

GRANERO DE TRANSCONA

ANTECEDENTES

- El Granero de Silos para Cereales de Transcona fue una de las estructuras más importantes construídas por Canadian Pacific Railway Company. Se encuentra ubicado al norte de Transcona, 11 km al noreste de Winnipeg, Canadá.

- Su construcción se inició en 1911 y culminó en otoño de 1913.

- Para la construcción de la cimentación se excavó 16 pies de profundidad donde se realizaron ensayos de campo previos.

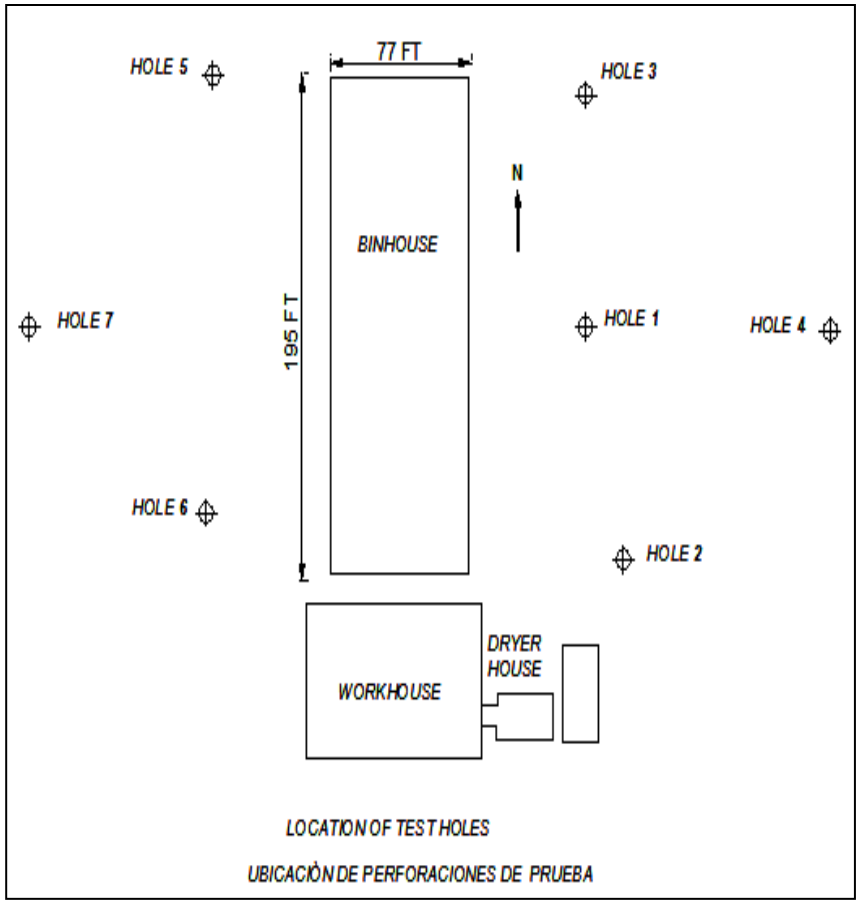
Silos de Transcona recién terminados en 1913

Ref.: White (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

ANTECEDENTES

Proyecto en planta



Ref.: Barucos A (1957)

El complejo consistió en tres secciones:

1. Casa de secado (Dryerhouse) de 5.5 m x 9 m x 18 m de altura

2. Casa de trabajo (Workhouse) de 21 m x 30 m x 55 m de altura

3. Casa de silos (Binhouse) de 24 m x 60 m x 30.0 m de altura

Capacidad de 35,240 m^3

GRANERO DE TRANSCONA

DATOS GENERALES DE LA FALLA

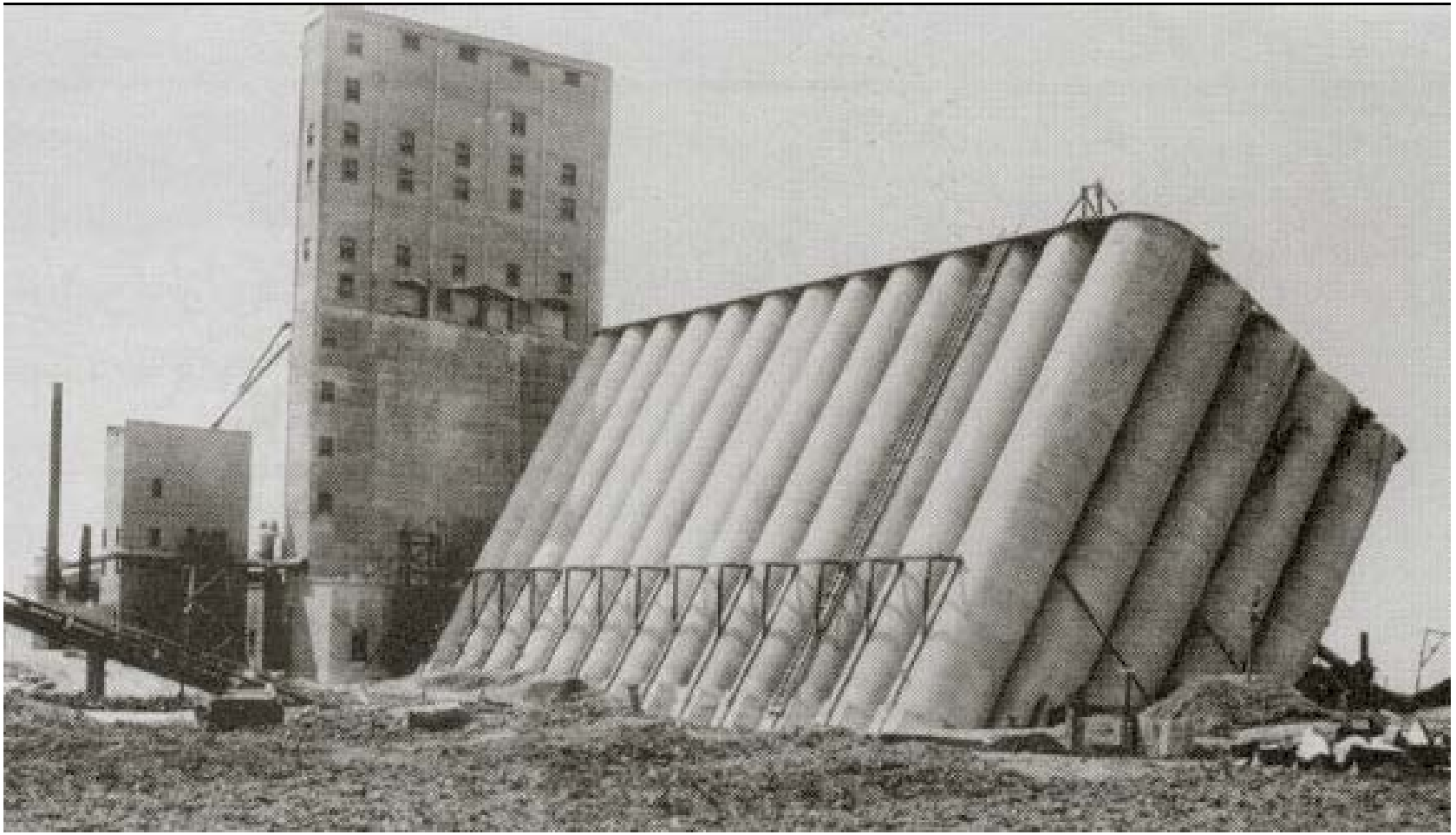
IMAGEN	SILO	FALLA	CAUSAS
	Silo de concreto armado para almacenamiento de cereales en Transcona Canadá, 1913	Hundimiento	Debido a alcanzarse a resistencia límite de apoyo en una capa subyacente de arcilla plástica y que condujo a una falla al corte.

- Secuencia de la falla de cimentación por corte ocurrida :
  - El 18 de octubre de 1913 se evidencia un movimiento de 0.30 m
  - El silo se había cargado con 40 000 toneladas de carga total
  - Después de 24 horas, los contenedores se inclinaban **a 27°** respecto a la vertical hacia el oeste
  - La arcilla debajo de los cimientos estaba a 9 m por debajo de su nivel inicial y el lado opuesto se había elevado 1.5 m por encima.
  - La falla de la estructura se debió a la inestabilidad de la arcilla rígida sobre la que se encontraba el granero.

GRANERO DE TRANSCONA

GRANERO DE TRANSCONA

Registros fotográficos

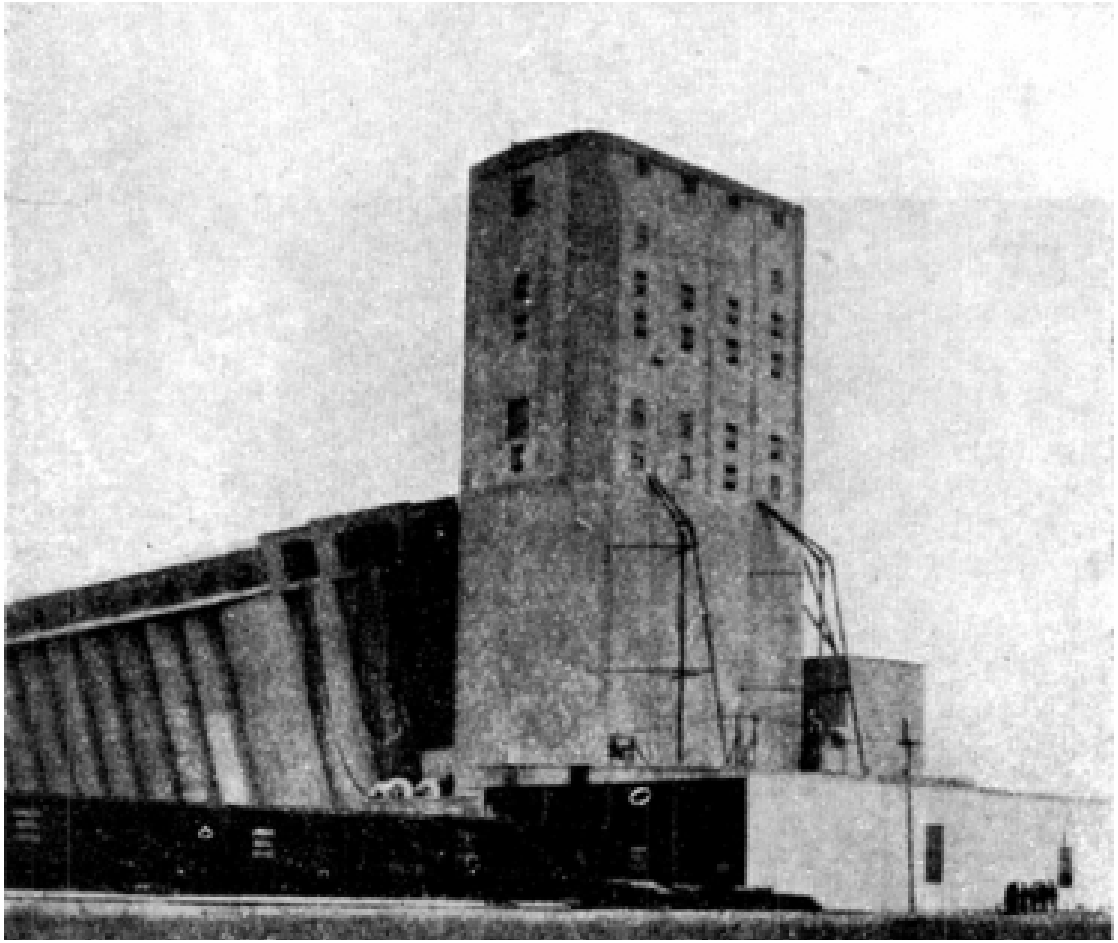


Vista de lado suroeste

Ref.: White, 1953 © 1953 Thomas Telford Limited. Used with permission

GRANERO DE TRANSCONA

Registros fotográficos

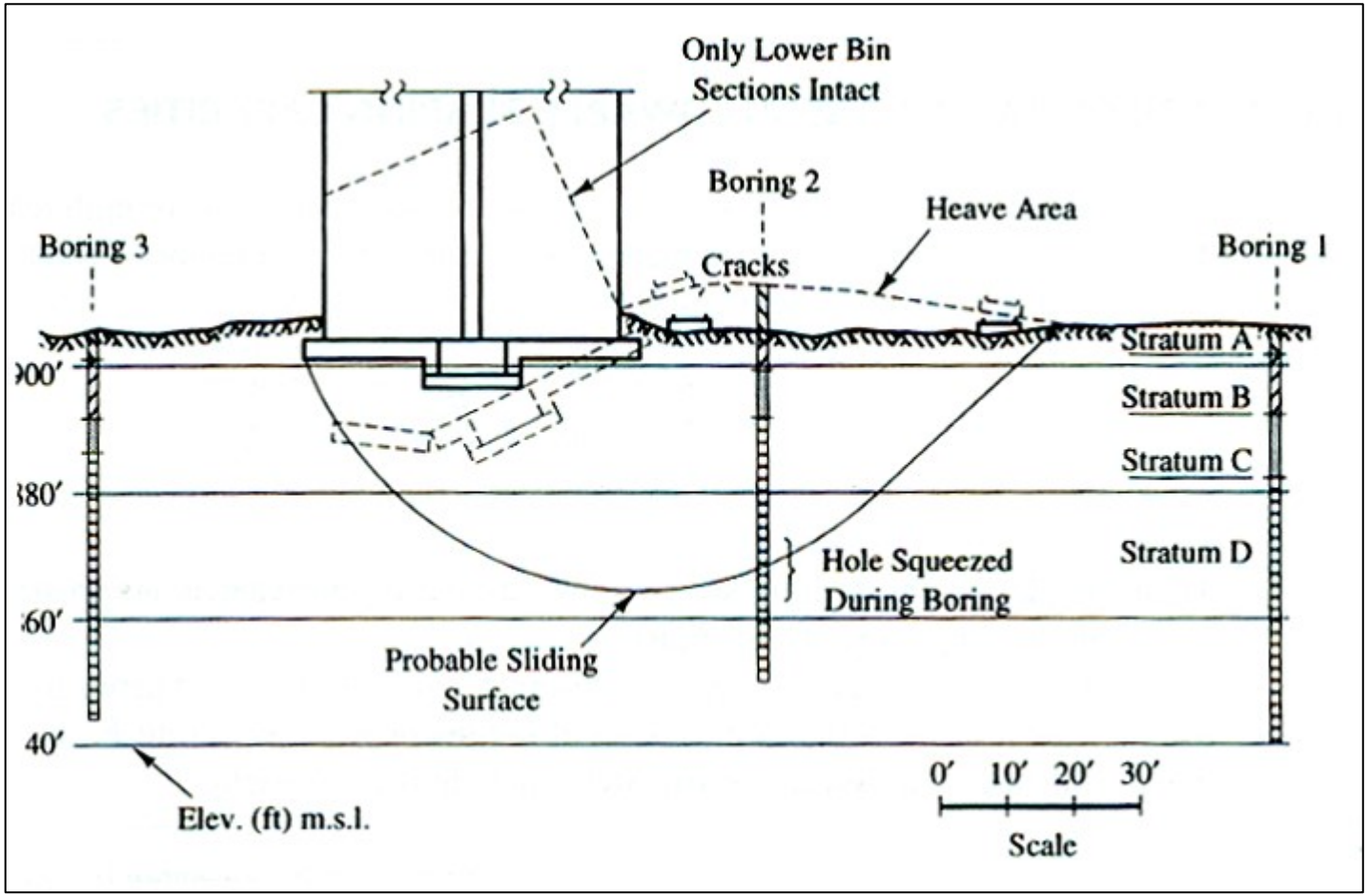


Vista del lado noreste

Ref.: White, 1953 © 1953 Thomas Telford Limited. Used with permission

GRANERO DE TRANSCONA

Mecanismo de la falla



GRANERO DE TRANSCONA

DESCRIPCIÓN DEL TERRENO – DESPUÉS DE LA FALLA

Inmediatamente después de la falla, se realizaron perforaciones de tipo Wash Boring, los resultados indicaron que la fundación de la Casa de Silos (Binhouse) consistía de un gran depósito de arcilla uniforme de origen glacial.

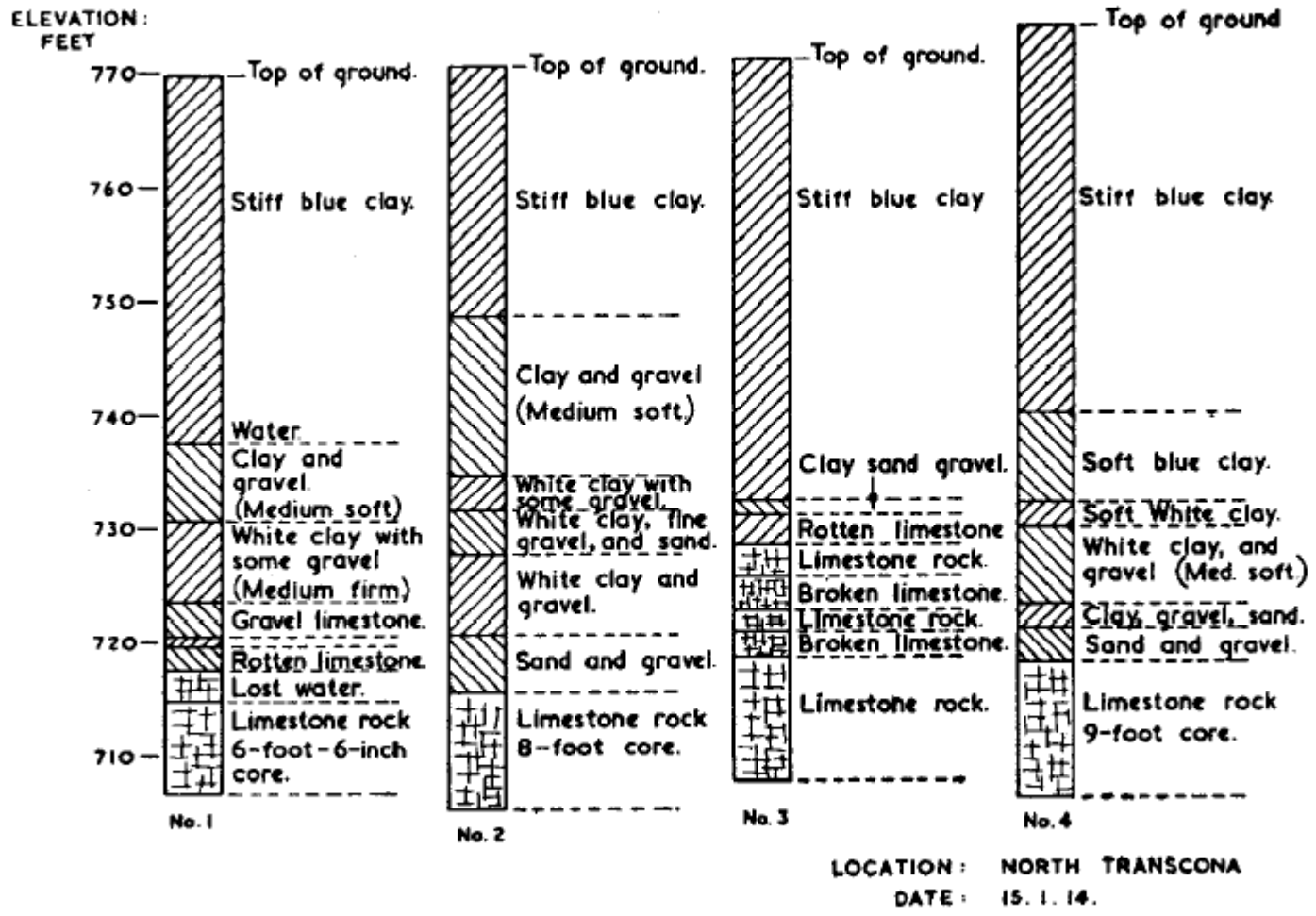
El origen de este depósito concuerda con la historia geológica del sitio, según el cual extensas áreas de sedimentos de grano fino se depositaron en las aguas del lago glacial Agassiz, el cual entró cuando la capa de hielo de Wisconsin bloqueó la salida norte de la región.

Winnipeg se encuentra cimentado en una de las partes más profundas de la cuenca del lago y, como consecuencia, se hallan alrededor de 9.0 a 17.0 m de sedimentos laminados superpuestos al lecho rocoso de roca caliza del Ordovícico.

Ref.: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

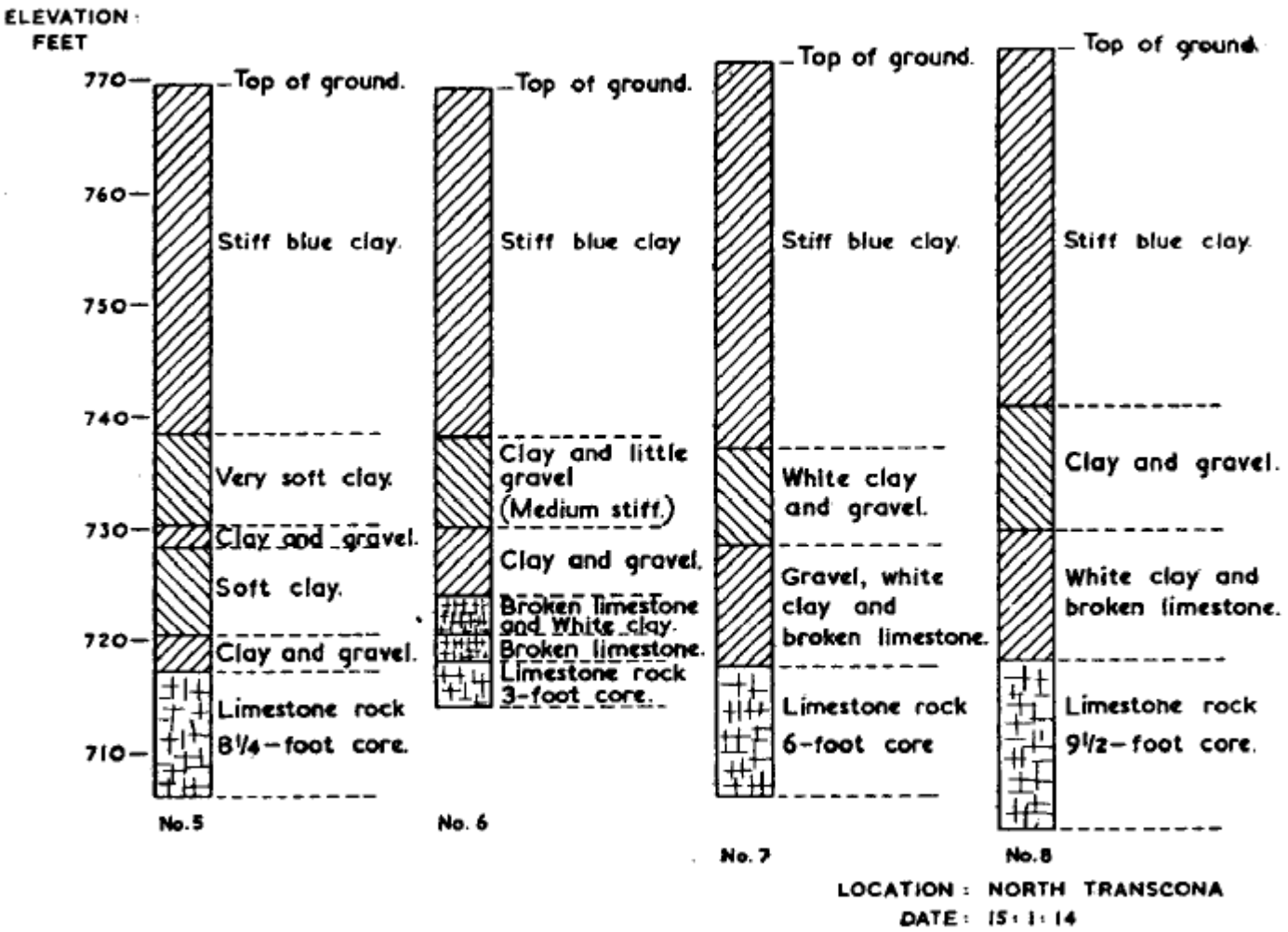
DESCRIPCIÓN DEL TERRENO – DESPUÉS DE LA FALLA



Ref.: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

DESCRIPCIÓN DEL TERRENO – DESPUÉS DE LA FALLA



Canadian Pacific Railway: Records of test holes

Ref.: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

Sondajes del año 1951

En 1951 la división de Building Research de la Canadian National Research Council de la Universidad de Manitoba y el profesor Ralph B. Peck realizaron perforaciones a unos 18 m de los silos, lo suficientemente lejos de la zona de falla para estar en material no afectado por los desplazamientos

De cada perforación, se tomaron continuamente muestras en tubos de pared delgada shelby (2”) en los estratos de arcilla.

Se realizaron ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo.

GRANERO DE TRANSCONA

Ubicación de sondajes (año 1951)

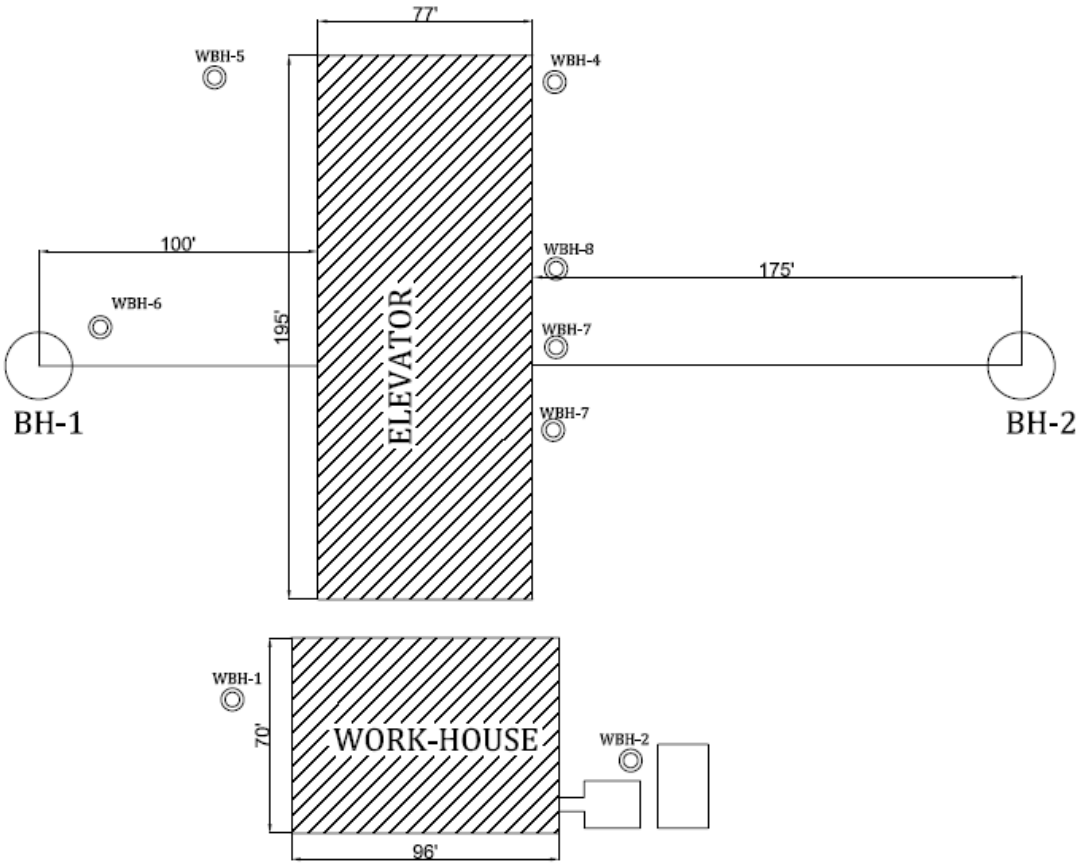


FIG: LOCATION OF BORE HOLE (BH) AND WASH BORING (WBH)

GRANERO DE TRANSCONA

Registro del Sondaje B-01 (Año 1951)

RAYMOND CONCRETE PILE COMPANY
MANITOBA, CANADA

BORING NO: B-01
DATE : 1951
W. & A. FILE NO.
SHEET: 1 OF 2
PROJECT : Transcona Elevator, Winnepeg, Canada
BORING LOCATION: 100 ft. left of elevator house
BORING TYPE : 2-inch Thin Wall Tube
SOIL CLASSIFICATION SYSTEM: UCS, Casagrande Chart
GROUND SURFACE ELEVATION : 773.4 ft.
BORING DISCONTINUED AT ELEVATION: 733.4 ft.

LOCATION: Winnipeg, Canada
DRILLED BY ----------
WEATHER CONDITIONS ----------
SEEPAGE WATER ENCOUNTERED AT ELVATION------
GROUND WATER ELEVATION AT: 8 ft. HRS: after 24 hrs
GROUND WATER AT COMPLETION ----------

S.N.	Description	Deepth in Feet	Sample Type	N	Q_p	Q_u	D_d	M_c
1	Grey Silty Clay	-5	ST			1.2		40
		-10	ST			0.99		45
2	clayey soil having tan and grey colour having slickensided, faintly laminated with small calcareous silt pockets	-15	ST			1.6		45
		-20	ST			1.7		38
3	silty clay having greyish tan colour mixed with small clacareous silts pocket and few pebbles, joints and cracks	-25	ST			1.3		42
		-30	ST			0.97		60
4	silty clay having grey colour having tan calcareous silt pockets and few pebbles	-35	ST			0.5		40
5	Silty gravel with yellowish-brown colour (Tan) having limestone chips) and few clay pockets	-40						

N- BLOWED DELIVERED PER FOOT
SS- SPLIT SPOON SAMPLE
ST- SHELBY TUBE SAMPLE
Q_p- CALIBRATED PENETROMETER READINGS (T/FT)
Q_U - UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (T/FT)
D_d - NATURAL DRY DENSITY
M_c - NATURAL MOISTURE CONTENT - %

RAYMOND CONCRETE PILE COMPANY
MANITOBA, CANADA

BORING NO: B-01
DATE : 1951
W. & A. FILE NO.
SHEET: 2 OF 2
PROJECT : Transcona Elevator, Winnepeg, Canada
BORING LOCATION: 175 ft. right of elevator house
BORING TYPE : 2-inch Thin Wall Tube
SOIL CLASSIFICATION SYSTEM: UCS, Casagrande Chart
GROUND SURFACE ELEVATION : 771.4 ft.
BORING DISCONTINUED AT ELEVATION: 720 ft.

LOCATION: Winnipeg, Canada
DRILLED BY ----------
WEATHER CONDITIONS ----------
SEEPAGE WATER ENCOUNTERED AT ELVATION------
GROUND WATER ELEVATION AT: 8 ft. HRS: after 24 hrs
GROUND WATER AT COMPLETION ----------

S.N.	Description	Deepth in Feet	Sample Type	N	Q_p	Q_u	D_d	M_c
1	yellow silty soil	-5	ST			1.8		30
		-10	ST			1.10		50
2	grey and tan clayey soil having slickensided and faintaly laminated with small pocket of silt and few pebbles	-15	ST			1.1		50
		-20	ST			1.4		45
3	greyish silty clay having joints and cracks with small calcareous silt pockets and few pebbles.	-25	ST			1.5		50
		-30	ST			0.7		60
4	grey silt clay having yellowish-brown calcareous silt pockets with few pebbles	-35	ST			0.65		45
5	silty gravel soil having yellow-brownish colour with few clay packets	-40	ST			0.55		30

N- BLOWED DELIVERED PER FOOT
SS- SPLIT SPOON SAMPLE
ST- SHELBY TUBE SAMPLE
Q_p- CALIBRATED PENETROMETER READINGS (T/FT)
Q_U - UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (T/FT)
D_d - NATURAL DRY DENSITY
M_c - NATURAL MOISTURE CONTENT - %

GRANERO DE TRANSCONA

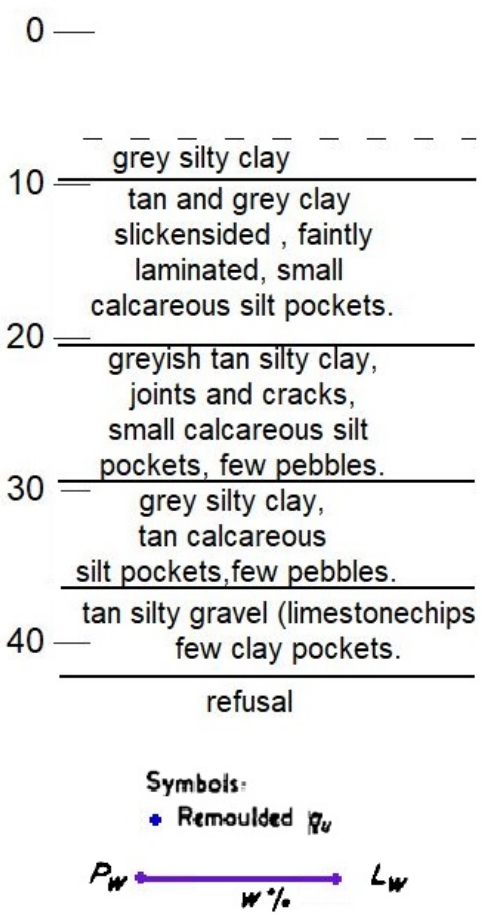
Descripción de la estratigrafía (Sondajes de 1951)

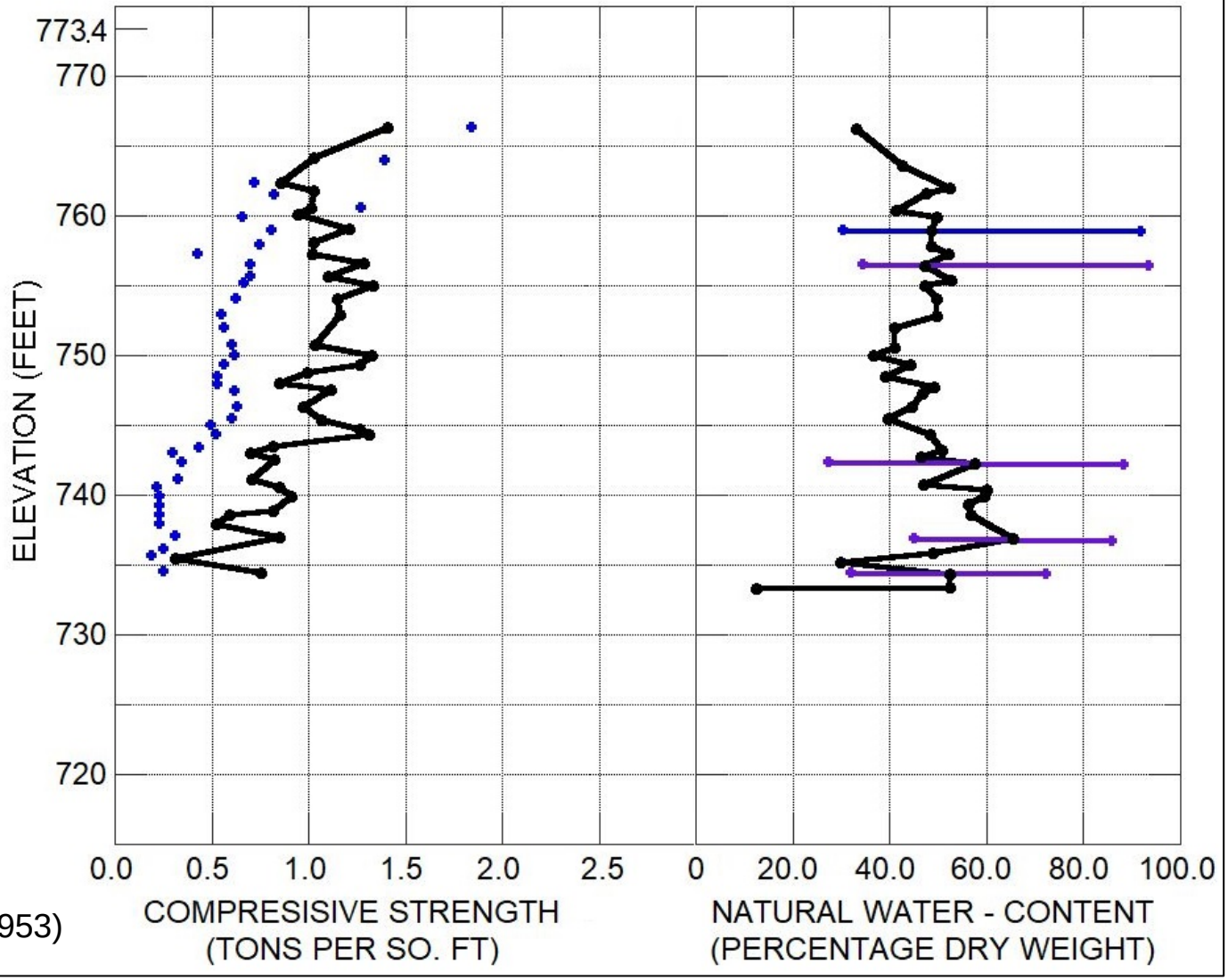
La estratificación obtenida fue:

- 0.00 m - 1.00 m	Arcilla orgánica y marrón
- 1.00 m - 1.50 m	Arcilla limosa marrón
- 1.50 m - 2.00 m	Arena fina
- 2.00 m - 6.00 m	Arcilla limosa marrón estratificada
- 6.00 m -10.00 m	Arcilla limosa gris con láminas calcáreas y limo estratificado
- 10.00 m -10.50 m	Grava de procedencia caliza
- 10.50 m -11.25 m	Limo, arena y cavidades de grava
- 11.25 m -12.00 m	Limo, arena, grava y polvo de roca
- 12.00 m	Roca

GRANERO DE TRANSCONA

Propiedades índice Sondaje B-01 (Año 1951)

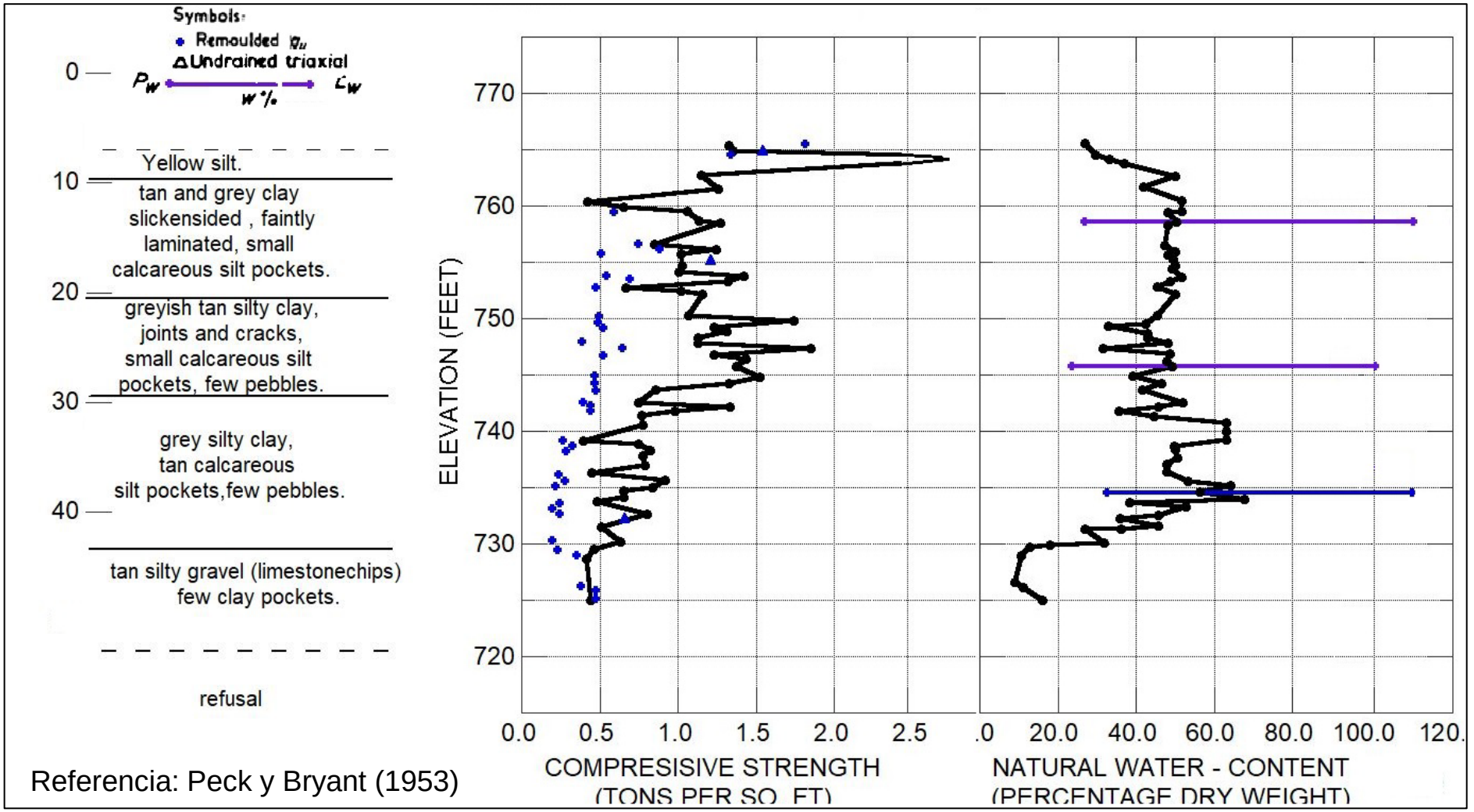




Referencia: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

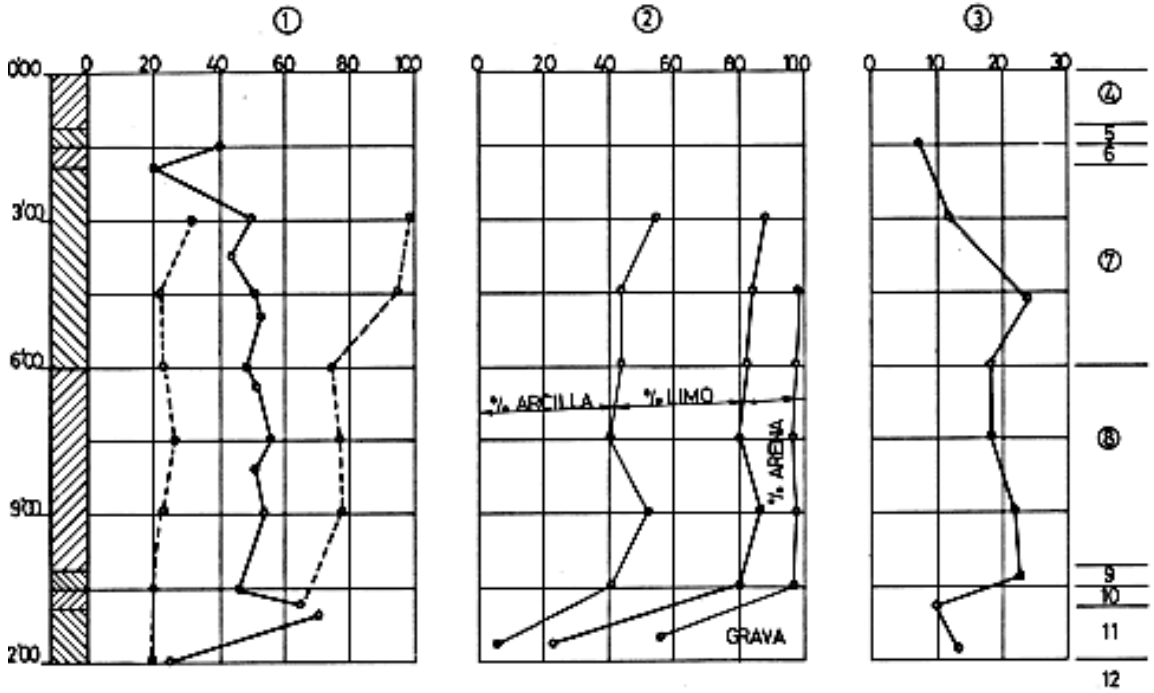
Propiedades índice Sondaje B-02 (Año 1951)



Referencia: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

Resultado de los ensayos realizados por R.B. Peck en 1951 mediante sondeos del terreno.



1)Contenido de agua en %
2)Distribución del tamaño de las partículas sólidas en %
3)Resistencia libre en kg/cm²
4)Relleno de arcilla orgánica negra y marrón entre cotas ±0.00 y -1.00
5)Arcilla limosa marrón entre cotas -1.00 y -1.50

6) Capa de arena fina entre las cotas -1.50 y -2.00
7) Arcilla limosa marrón estratificada. Estratificación horizontal entre cotas -2.00 y -6.00
8) Arcilla limosa gris conteniendo muchas cavidades calcáreas con limo entre cotas -2.00 y -10.00

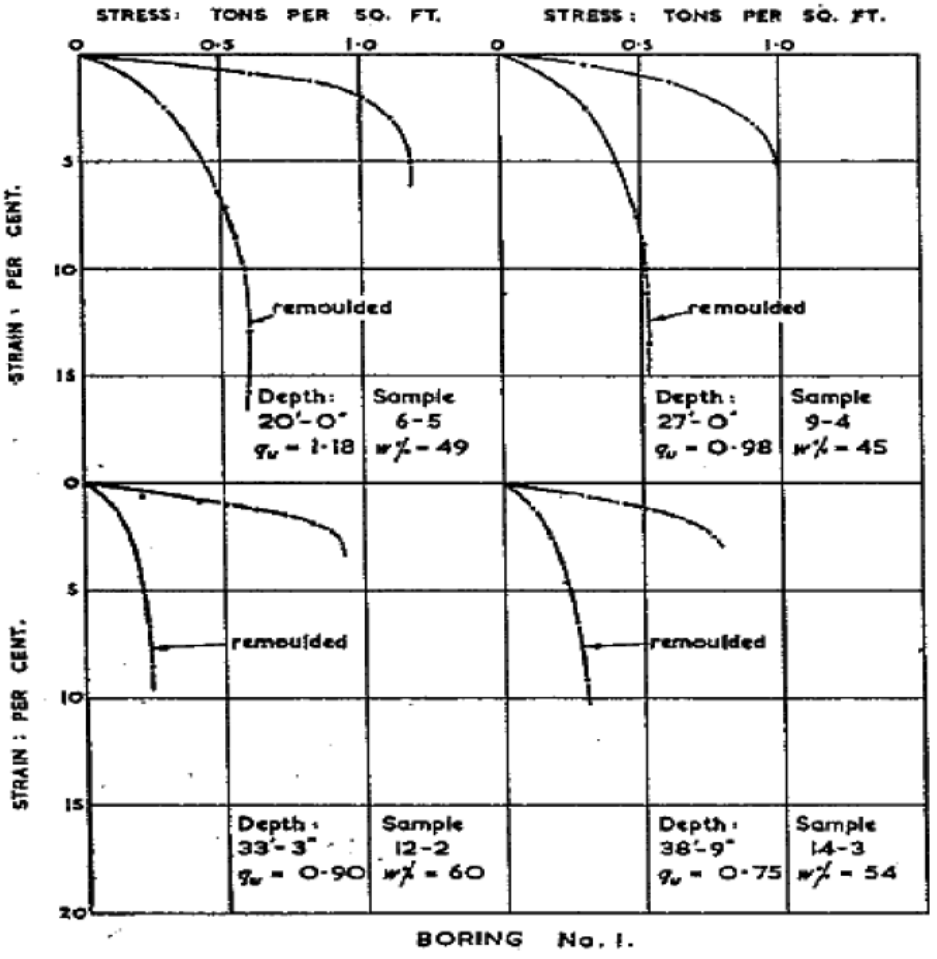
9) Grava caliza dispersa entre cotas -10.00 y -10.50
10) Limo, arena y cavidades de grava entre cotas -10.50 y -11.25
11) Limo, arena, grava y polvo de roca entre cotas -11.25 y -12.00
12) A la cota -12.00 rechazo del penetrómetro por encontrar roca

GRANERO DE TRANSCONA

Ensayos de compresión no confinada

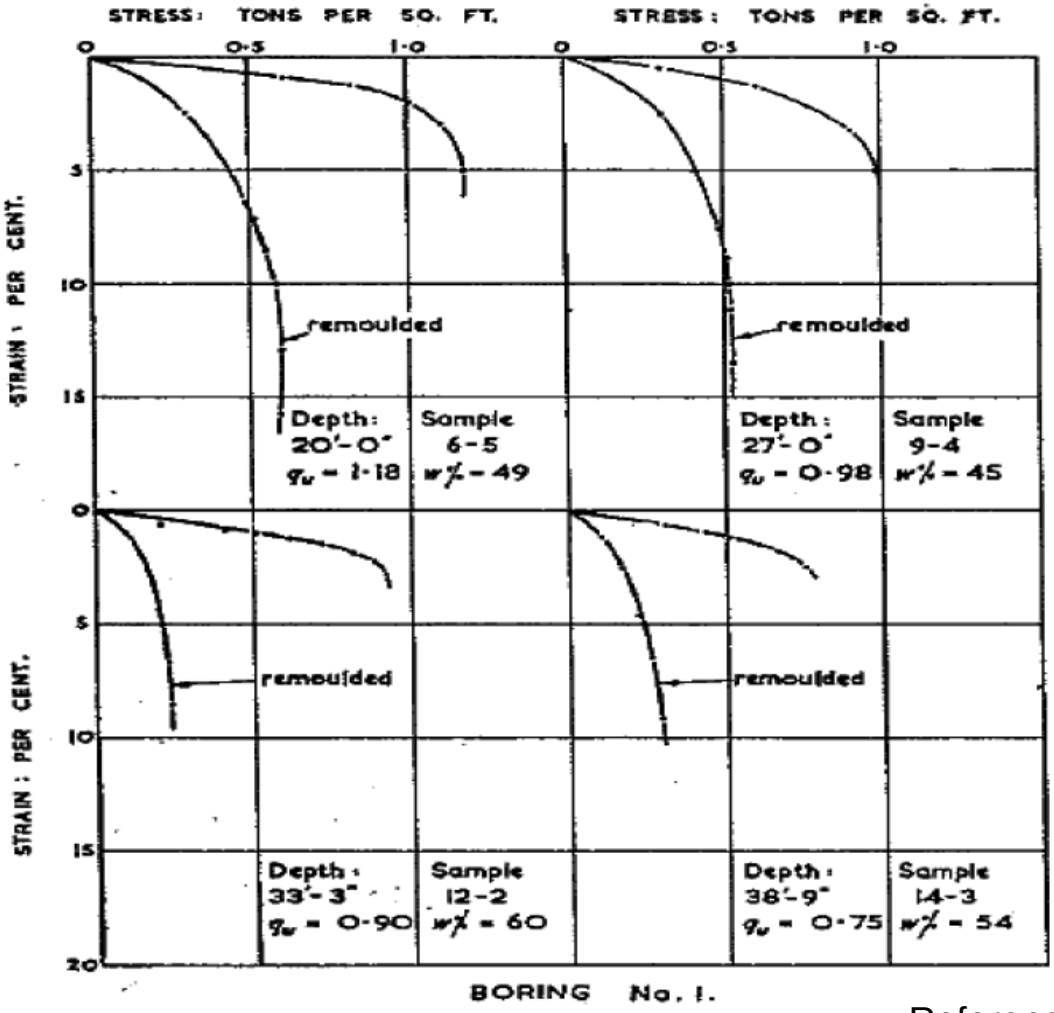
Se realizaron ensayos con material inalterado y remodelado.

La sensibilidad del suelo es aproximadamente 2 y el mineral presente en el suelo es dos tercios de illita y un tercio de montmorilonita.



GRANERO DE TRANSCONA

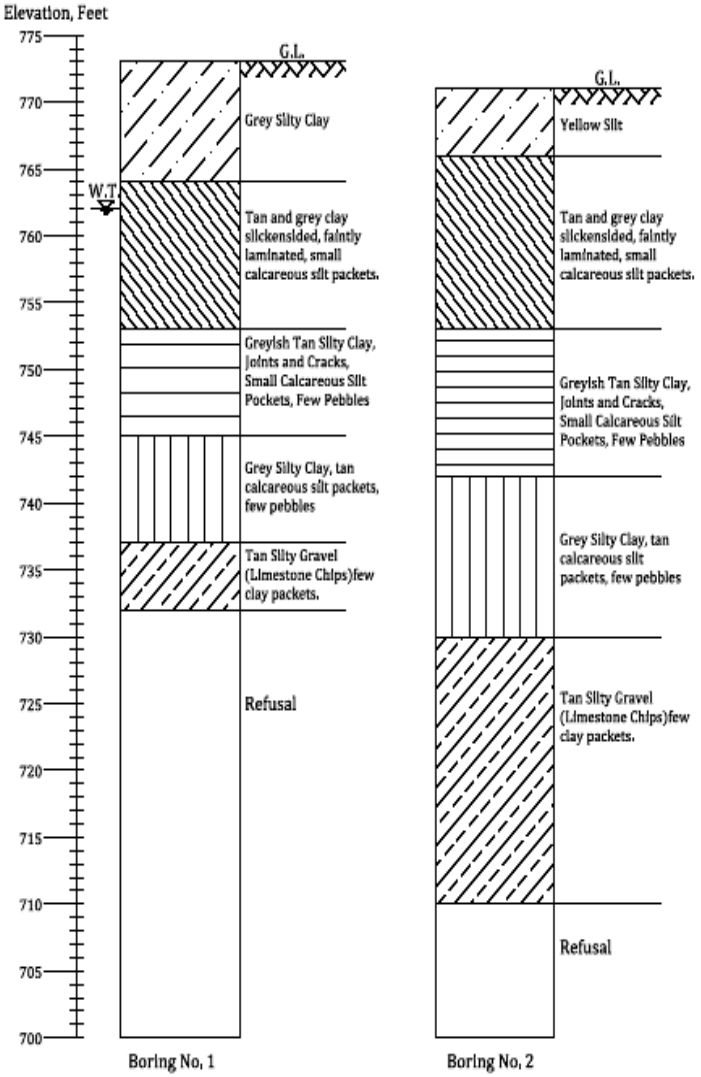
Ensayos de compresión no confinada

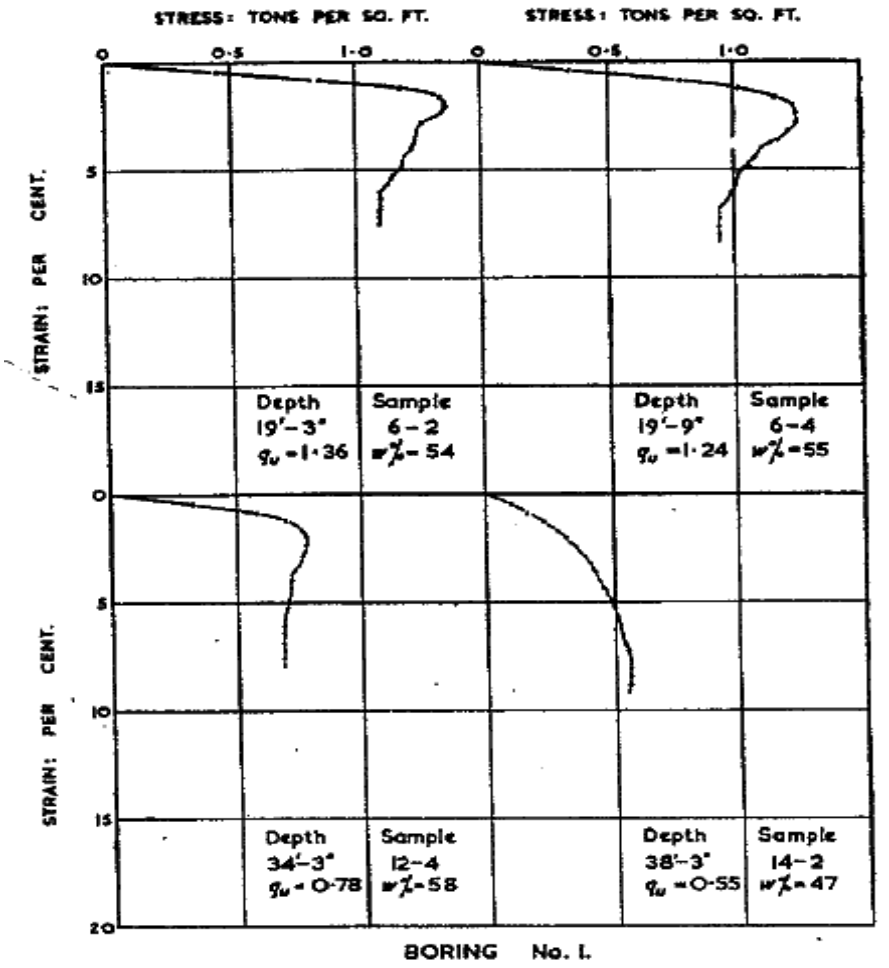


Referencia: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

Ensayos de consolidación



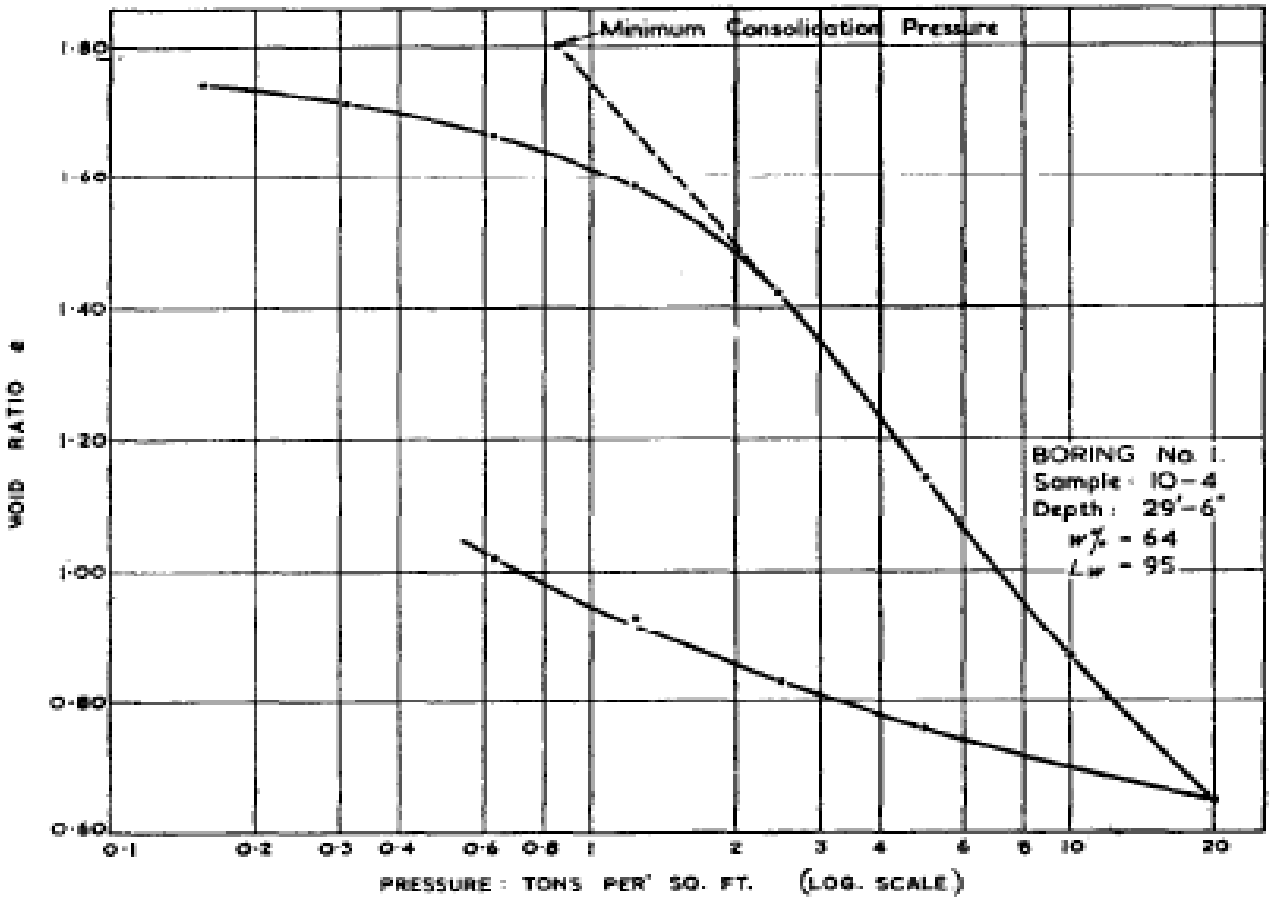


Ref.: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

Ensayo de consolidación en la parte inferior del depósito de arcilla

curva e log-p



Referencia: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE CARGA DESPUES DE LA FALLA

Los silos de Transcona, aproximadamente contenía 26.000 toneladas de peso, la carga muerta de la estructura era de 20.000 toneladas. La suma de estas cargas distribuidas sobre el área (77 pies por 195 pies) representaba una carga de **3.06 ton/pie^2**. Considerando la excavación a 12 pies por debajo del suelo y asumiendo un peso unitario de 120 lb/pie^3, la reducción de carga es **de 0,72 ton/pie^2**. Por lo cual la carga neta aplicada a 12 pies de profundidad es de **2.34 ton/pie^2**.

Ref.: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE CARGA DESPUES DE LA FALLA

La capacidad de soporte neta expresada por la ecuación de Terzaghi,1943 :

$$q_n = cN_c = \frac{1}{2} q_u N_c$$

Donde:

q_n = Capacidad de soporte límite teórica en kg/cm^2

q_u = Resistencia a la compresión sobre muestras sin soporte lateral en kg/cm^2

El valor de N_c se obtiene de la siguiente expresión (Skempton, 1951)

$$N_c = 5\left(1 + \frac{B}{5L}\right)\left(1 + \frac{D}{5L}\right)$$

En el caso de Transcona: B=77 pies , L=195 pies y D=12 pies , siendo

N_c=5.56

Ref.: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE CARGA DESPUES DE LA FALLA

El valor promedio de q_u para la arcilla gris es de **1.13 ton/pie²**, y para la arcilla gris blanda subyacente es **0.65 ton/pie²**; y el promedio ponderado para el espesor total de 35 pies es **0.93 ton/pie²**.

$$q_n = \frac{1}{2} q_u N_c$$

$$q_n = 0.5 * 0.93 * 5.56 = 2.57 \text{ ton/pie2}$$

Este valor es superior a la carga neta aplicada :

$$2.57 \text{ ton/pie}^2 > 2.34 \text{ ton/pie}^2$$

Ref.: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

Sin embargo tomando en cuenta el valor de 0.65 ton/pie^2 correspondiente a la arcilla subyacente se tiene

$$q_n = 0.5 * 0.65 * 5.56 = 1.80 \text{ ton/pie}^2$$

De estos resultados se puede concluir que es más seguro utilizar los valores mínimos para el cálculo de la capacidad de carga.

Ref.: Peck y Bryant (1953)

GRANERO DE TRANSCONA

TRABAJOS DE REPARACIÓN

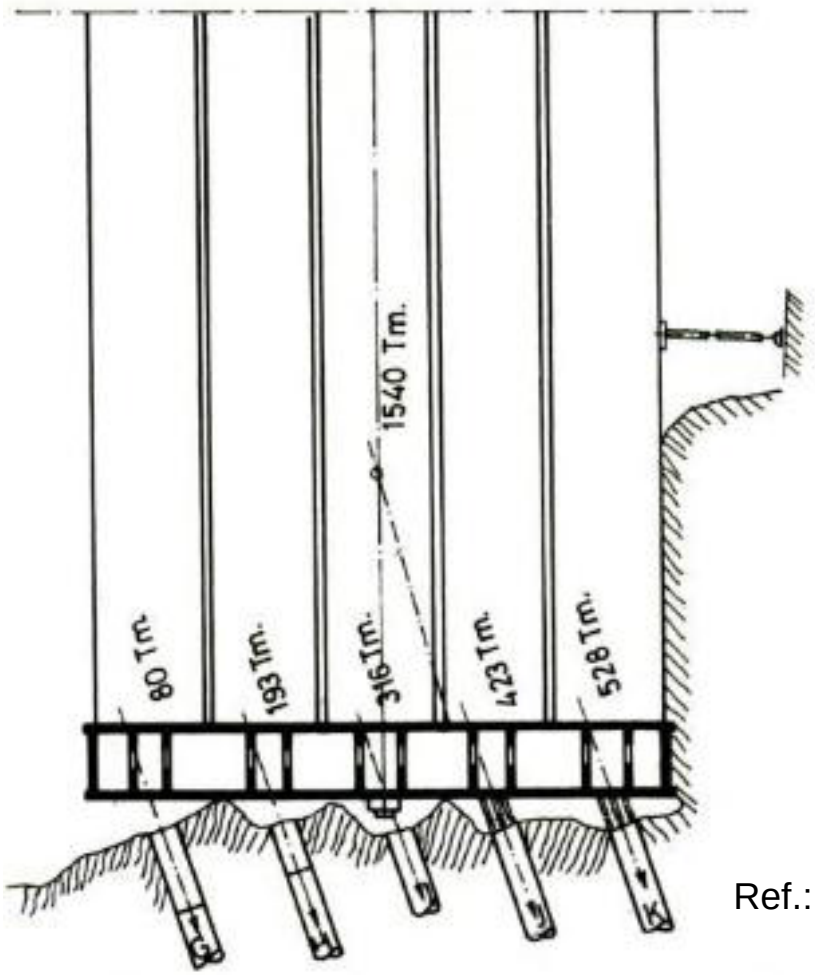
Las obras de reparación fueron ejecutadas mediante galerías por debajo del sótano de la casa de silos.

La estructura se intentó enderezar con gatos hidráulicos y se recalzó con pilotes de hinca que llegaban al sustrato calizo a 16.0 m de profundidad. La estructura se dejó a 4.0 m por debajo de su nivel original y un desnivel de 1.20 m entre los extremos.

La instalación se puso nuevamente en marcha en 1916.

GRANERO DE TRANSCONA

TRABAJOS DE REPARACIÓN



Sistema utilizado para colocar la casa de silos a su posición original.

Ref.: Ravenet (1978).

GRANERO DE TRANSCONA

EL GRANERO DE TRANSCONA EN LA ACTUALIDAD

Ref.: Manitoba Historical Society (November 2015)

GRANERO DE TRANSCONA

EL GRANERO DE TRANSCONA EN LA ACTUALIDAD

Ref.: Manitoba Historical Society (November 2015)

GRANERO DE TRANSCONA

LECCIONES APRENDIDAS

- Se formuló la teoría de que la fricción interna de la arcilla saturada es igual a cero en condiciones no drenadas.

- Ralph Peck en 1953 usó los datos recolectados del suelo antes y después de la falla, para demostrar que esta teoría era realmente cierta.

- La prueba de esta teoría permite formular una variedad de nuevas suposiciones y teorías acerca de las complicadas formas en que se comporta el suelo.

- El desarrollo de la mecánica de suelos después de la falla de Transcona finalmente proporcionó una base para calcular la capacidad de carga última de los suelos arcillosos en condiciones no drenadas.

GRANERO DE TRANSCONA

CONCLUSIONES

- La construcción del silo comenzó en 1911 y se completó en el otoño de 1913. El silo tiene una planta de 24 m por 60 m y tiene una capacidad de 1,000,000 de fanegas. Consta de 65 contenedores circulares y 48 contenedores intermedios.

- La base era una losa de concreto armado de 0.60 m de espesor y se cimentó a una profundidad de 3.66 m por debajo de la superficie del suelo.

- El peso del silo era de 20 000 toneladas, que era el 42,5 % del peso total cuando se llenó.

- El llenado del silo comenzó en septiembre de 1913, y en octubre, cuando el silo contenía 875.000 fanegas (40 000 toneladas de carga total). y la tensión sobre el suelo era del 94% de la tensión de diseño, se notó un asentamiento vertical de 0.30 m.

GRANERO DE TRANSCONA

CONCLUSIONES

- La estructura comenzó a inclinarse hacia el oeste y en 24 horas estaba en un ángulo de 27° desde la vertical, el lado oeste estaba 7.32 m por debajo y el lado este 1.5 m por encima del nivel original (Szechy, 1961).

- Cuando el silo de granos Transcona comenzó a inclinarse el 18 de octubre de 1913, se había escrito un lugar en la historia, el cambio drástico en el nivel del suelo que condujo a su inclinación ha hecho que esta falla sea una de las fallas del suelo más estudiadas en la historia. Permitió a la comunidad de ingenieros obtener un poco más de comprensión del comportamiento del suelo.

- Se determinó que la falla ocurrió cuando la tensión de la base era aproximadamente igual a la capacidad de carga máxima calculada de un estrato subyacente de arcilla plástica (Peck y Byrant, 1953), y fue esencialmente una falla por corte.

GRANERO DE TRANSCONA

REFERENCIAS

- Allaire A. (1916): The Failure and Righting of a Million-Bushel Grain Elevator, Transactions, ASCE.
- Arvind Kumar Jha (2012): Geotechnical Investigation Report On Failure of The Transcona Elevator, Winnipeg, Canada, Indian Institute of Science, Bangalore.
- Barucos A. (1957): The foundation failure of the Transcona grain elevator, National Research Council, Canada.
- Blatz J. y Skaftfeld K. (2003): The Transcona Grain Elevator Failure: A Modern perspective 90 years later, 56th Canadian Geotechnical Conference.
- Reyes Martínez C. (2013): Tesis de Grado, Análisis de fallas en cimentaciones para silos, UNAM.
- Manitoba (2015): Historical Society.
- Bosela Paul A., Pamalee A. Brady, Norbert J. Delatte, M. Kevin Parfitt, P.E.(2013): Failure Case Studies in Civil Engineering, Structures, Foundations, and The Geoenvironment, ASCE.
- Peck R. B. y Bryant F.G. (1953): The Bearing Capacity Failure of the Transcona Elevator, Geotechnique, Vol 3.

GRANERO DE TRANSCONA

REFERENCIAS

- Ravenet J. (1978): Silos deformaciones, fallas, explosions, prevención de accidents, Editores Técnicos Asociados.
- White L.S. (1953): Transcona Elevator Failure: Eye-witness Account, Geotechnique, Vol 3.
- Skempton A.W. (1951): The Bearing Capacity of Clays, Building Research Congress, London.
- Szechy C. (1961): Fallas en Fundaciones, Editora Tecniciencias.