

REMOCIÓN DE UNA COLUMNA DE HORMIGÓN EN UN EDIFICIO EN ALTURA

Ingeniero Civil y Ph.D. Guillermo Luis Gabrielli Engel
Design Leader y Senior-Project Manager, Departamento de Estructuras, Halsall Associates Ltd, Toronto, Canadá

Ingeniero y Master en Ingeniería Afshin Ebtekar
Manager, Departamento de Estructuras, Halsall Associates Ltd, Toronto, Canadá

Ingeniero y Master en Ingeniería Michael Buckley
Vice-President y Project Principal, Departamento de Estructuras, Halsall Associates Ltd, Toronto, Canadá

RESÚMEN: El proyecto de remoción de una columna de hormigón en la planta baja en un edificio de 12 pisos implica la consideración de muchos aspectos de diseño y de obra. En principio debe elegirse un sistema estructural eficiente que soporte las cargas existentes y las transfiera a las fundaciones a través de una nueva trayectoria. Por otro lado, debe implementarse un procedimiento operativo que permita que la transferencia de la carga en la columna a la nueva estructura se haga con el menor grado de perturbación para los ocupantes y para la estructura existente (especialmente en los pisos superiores).

Hay varios aspectos que deben resolverse para la resolución exitosa del proyecto como ser: la evaluación precisa de la carga existente en la columna al momento de la remoción; la influencia que tendrá el sistema estructural circundante con su interacción con el suelo a través de las fundaciones; la correcta caracterización de la relación tensión-deformación en una columna de hormigón armado que con el paso del tiempo y bajo cargas permanentes, considerando efectos de fluencia lenta y contracción por fragüe, ha transferido carga desde el hormigón al acero de las armaduras y finalmente los aspectos constructivos, especialmente el método de fijación de la carga y de corte de la columna, que para el resultado final será de suma importancia.

Este trabajo presenta el desarrollo completo de un proyecto de descarga y remoción de una columna, en la planta baja de un edificio ocupado, para dar lugar a un nuevo estudio de TV que requería un espacio amplio y sin obstrucciones. Como aditamento se destaca la voluntad demostrada por el propietario y su equipo de arquitectos, ingenieros y constructores para que la estructura de transferencia, un doble reticulado de acero tipo Pratt, quedase expuesta como objeto arquitectónico prominente en la antesala de la sala de control del estudio de TV.

ABSTRACT: *This paper describes the entire process followed to remove a ground floor reinforced concrete column in a 12 storey fully occupied building to create an open and unobstructed studio space for the Rogers™ Sportnet TV studio. Side by side, twin steel Pratt trusses spanning 18 metres, with a total weight of 70 tons, formed the main transfer structure that was used to transfer the loads from the concrete column above the TV-studio level to retrofitted existing concrete columns at each truss support location.*

This project involved the development and integration of precise methodologies that included structural modeling, analysis, design, construction methods and monitoring techniques for the precise preloading of the transfer trusses. An elaborate testing

and monitoring system was developed in order to determine the precise preload at which the transfer structural system was to be locked in place and connected to the steel jacketed remaining column before the column below was to be cut and removed. The project was completed with the final jacking operation of the trusses to the precise load that was determined using data collected with the monitoring program in conjunction with a specifically developed strain/stress analysis algorithm (that incorporated the long term behaviour of reinforced concrete, including concrete shrinkage and creep analysis). The end result of this process was a very smooth operation where neither the occupants nor those carrying through the work could tell what had happened since there were no jerks, noises or floor displacements that could be detected during and after the column was removed.

1. INTRODUCCIÓN:

Para el proyecto que se describe a continuación, *Rogers™ Communications*, una de las empresas líderes de telecomunicaciones en Canadá, requería un nuevo espacio para su canal deportivo *Rogers™ Sportnet* (fig. 1). El lugar elegido era la planta baja y el 1er piso de la Torre Isabella (fig. 2), ubicada en el complejo de *Rogers™ Communications* en el centro de la ciudad de Toronto, Ontario, Canadá, donde funciona ininterrumpidamente, los siete días de la semana - las 24 horas, el centro de operaciones de la sede central. El nuevo estudio de TV se ubicaría en la planta baja y requeriría un espacio abierto que ofreciera a las cámaras ángulos puros, sin interrupciones ni obstáculos. La sala de control se ubicaría por encima del estudio, en el primer piso.



Fig. 1: Canal Deportivo Rogers™ Sportnet (terminado y en operación)



Fig. 2: Rogers™ Communications Campus, Torre Isabella (edificio de la derecha)

El esquema aprobado requería la remoción de una columna central en la planta baja, de sección cuadrada de 900mm de lado, (figs. 3 y 4), soportando los 12 pisos superiores, que en su mayoría estaban ocupados permanentemente y que no debían ser afectados por el proyecto. Dicha columna continuaba hasta la fundación del edificio a través de 4 niveles de estacionamiento en el sub-suelo del edificio.



Fig. 3: Columna central de planta baja. Fig. 4: Estado final con la columna removida.

La remoción de una columna implica resolver adecuadamente varios aspectos del proyecto entre los que pueden citarse:

1. Desarrollo de una nueva estructura de transferencia considerando aspectos de capacidad estructural, rigidez, durabilidad, resistencia al fuego, factibilidad constructiva y estéticos.
2. Sistema de soporte y sujeción y para transferencia de las cargas de la columna a una nueva estructura de transferencia.
3. Creación de una nueva trayectoria de cargas para que la carga en la columna descargue a la fundación.
4. Determinación precisa de la carga en la columna.
5. Efecto de recuperación elástica de la fundación después de la descarga.
6. Prefabricación en taller, construcción y erección.
7. Sistema para monitoreo, prueba y medición de cargas y deformaciones
8. Metodología de precarga de la estructura de transferencia.
9. Operación de fijación de la carga y corte de la columna.

Cada uno de esos aspectos citados debe encuadrarse dentro de un planteo integral de resolución. El presente trabajo delinea el esquema de trabajo que fue utilizado con éxito en el citado proyecto.

2. POSIBLES ESQUEMAS ESTRUCTURALES PARA LA ESTRUCTURA DE TRANSFERENCIA:

La necesidad de crear un espacio abierto en planta baja, libre de obstrucciones tanto en su extensión como en altura, obligaba a que la estructura de transferencia se ubicara en el 1er. Piso del edificio, por encima de la columna central y que quedara

adosada a cada lado de la misma, extendiéndose entre las columnas adyacentes a la misma (fig. 5).

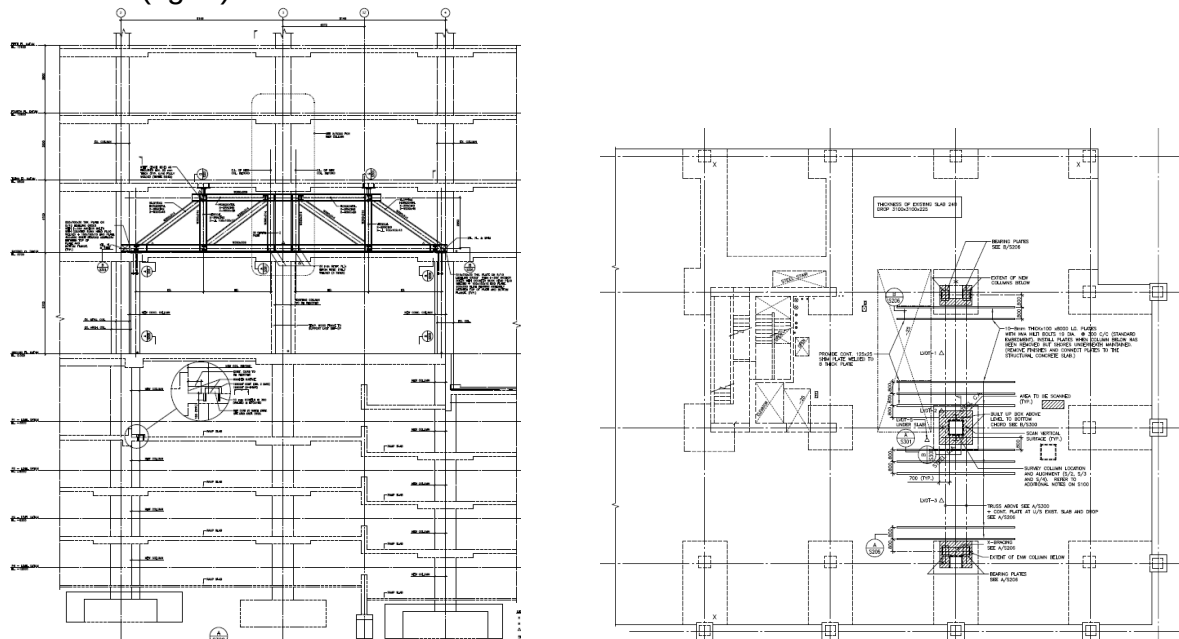


Fig. 5: Corte vertical de la estructura del edificio y esquema parcial en planta del 1er. piso.

Dos esquemas estructurales fueron originalmente considerados para la estructura de transferencia. Uno basado en una viga-muro continua de dos tramos de hormigón armado pretensado encajada entre las columnas adyacentes ubicadas a cada lado de la columna central. El segundo esquema, que fuera el finalmente adoptado, consiste en un doble reticulado tipo Pratt, de doble vano, adosado al tramo superior de la columna central que se va a remover (figs. 6 y 7).

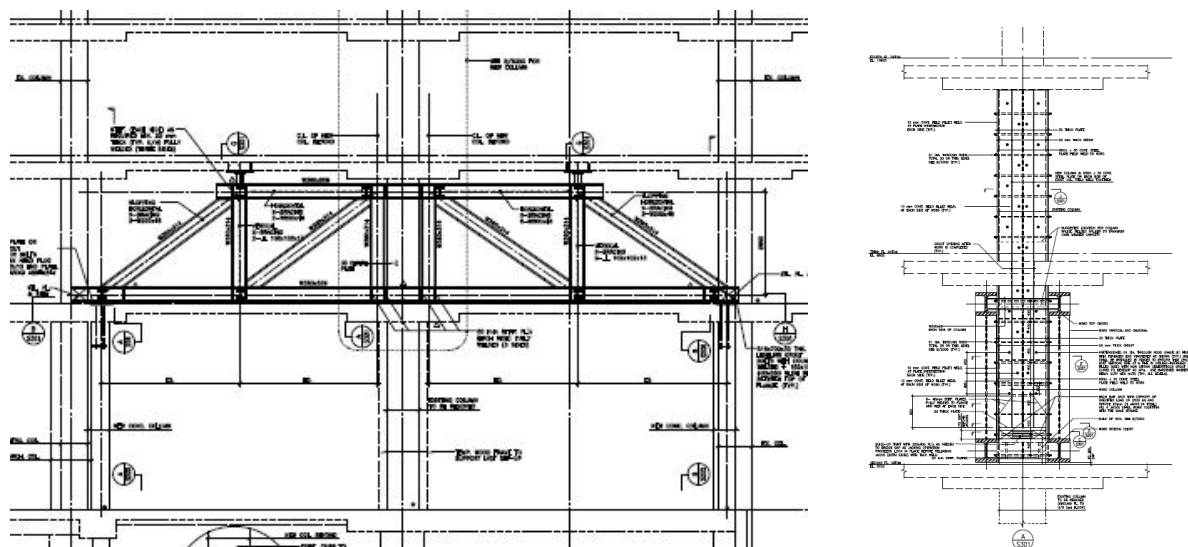


Fig. 6: Esquema estructural con reticulados Pratt de dos vanos, adosados a cada lado de la columna (vista frontal).

Fig. 7: Esquema de soporte y para aplicación de la precarga a cada lado de la columna (corte transversal).

Una ventaja del primer esquema era que ocuparía menor espacio pues quedaría “encajado” entre las columnas sin necesidad de proyectarse, en sentido transversal, más allá del ancho de las mismas. Sin embargo, presentaba ciertas dificultades. En lo arquitectónico, por su volumen sólido y difícil de realzar estéticamente; y en lo constructivo, por su masividad y las dificultades que presentaba para aplicar la precarga que descargara completamente a la columna antes de ser removida. El segundo esquema tenía como principales ventajas la posibilidad de que gran parte del mismo pudiera ser fabricado en el taller, reduciendo así los costos y los tiempos de obra, de permitir una imponente expresión arquitectónica dentro del espacio ocupado (fig. 8), admitir el paso de conductos eléctricos y mecánicos entre los claros del reticulado; y facilitar la aplicación de cargas preliminares para la determinación precisa de la carga en la columna y para hacer ajustes necesarios antes del corte definitivo de la misma.



Fig. 8: Extremo del reticulado Pratt visto desde la sala de control hacia la antesala de espera y desde la antesala hacia la sala de control.

3. PRINCIPALES ASPECTOS DEL PROYECTO ESTRUCTURAL:

Como se mencionara anteriormente los aspectos estructurales de dimensionamiento considerados en este proyecto fueron en primer término, obviamente, el dimensionamiento de la estructura de transferencia para cargas últimas (las mismas cargas con las que se dimensionara la columna original); en segundo término, fue importante limitar las deformaciones diferenciales verticales ante las cargas de servicio de manera que no se causara daño a los elementos no estructurales de los pisos superiores. Hacemos notar que aunque no es necesario ni económicamente posible tratar de equiparar la rigidez del sistema original (rigidez axial de la columna en el punto de transferencia) a la de la estructura de transferencia debe sin embargo procurarse que la misma sea lo suficientemente rígida como para que las deformaciones debido a cargas de servicio sean pequeñas (no mayores a un orden superior al de la columna original). Otros aspectos de importancia considerados fueron la durabilidad de la estructura y su resistencia contra el fuego.

4. ESQUEMA DE SOPORTE Y CONEXIÓN DE LA COLUMNA (SOBRE EL NIVEL DE REMOCIÓN):

El esquema de soporte consiste en sustentar la carga de la columna en el nivel directamente por encima del de remoción transfiriéndola a los reticulados. El esquema de conexión utilizado permitió la aplicación de la precarga a través de

gatos hidráulicos instalados entre los reticulados, a cada lado de la columna, y entre los puntales y vigas de transferencia (figs. 7, 9 y 10). Una vez equilibrada la carga de la columna se insertaron placas de acero para fijar la misma (fig. 10) y así proceder a conectar por soldadura los verticales de los reticulados a la columna chapada (fig.11).

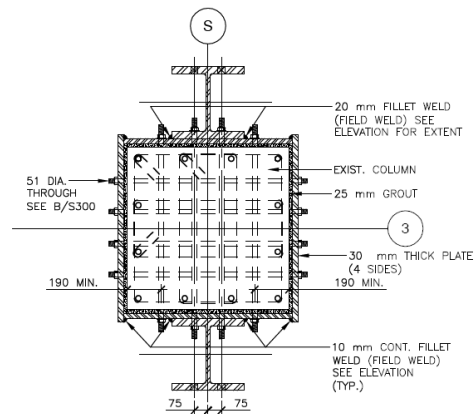


Fig. 9: Puntal de transferencia soldado a placa de acero a cada lado de la columna. Esquema – corte transversal.

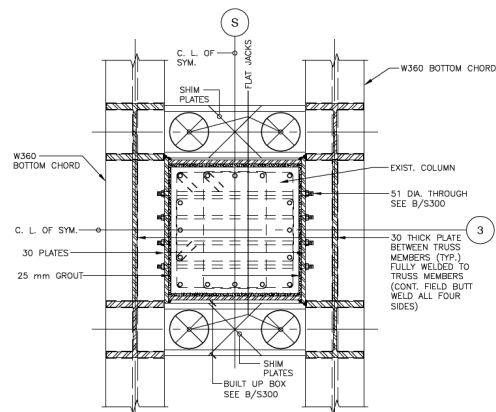


Fig. 10: Sistema para aplicación de la precarga a través de gatos hidráulicos (2 por lado): Puntal con ménsulas y viga de transferencia conectada al cordón inferior de los reticulados. Esquema – corte transversal.

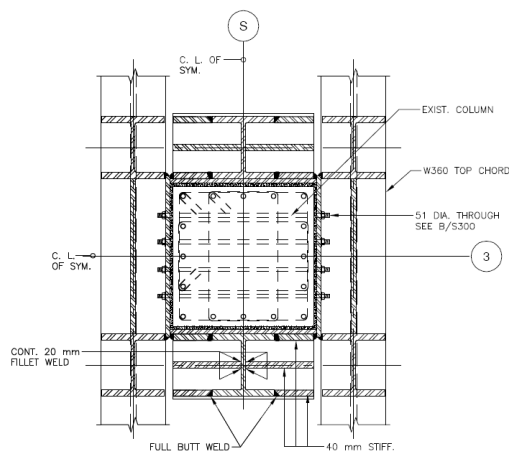
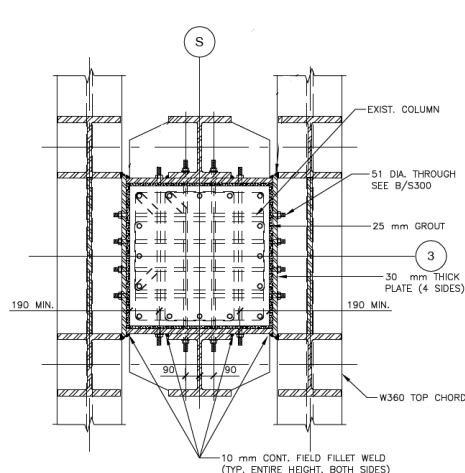


Fig. 11: Detalle de conexión por soldadura (en cada esquina) entre placas de acero y verticales de los reticulados.

5. TRANSFERENCIA Y ANULACIÓN DE LA CARGA POR PRECARGA - NUEVA TRAYECTORIA:

El principio estático es sencillo; la aplicación de la precarga equilibra la carga en la columna en el nivel de conexión y la anula en el nivel de corte. La descarga se hace a través de los reticulados hacia las columnas adyacentes (fig. 12), que fueron debidamente reforzadas, y por estas a las zapadas de fundación también reforzadas (fig. 13).

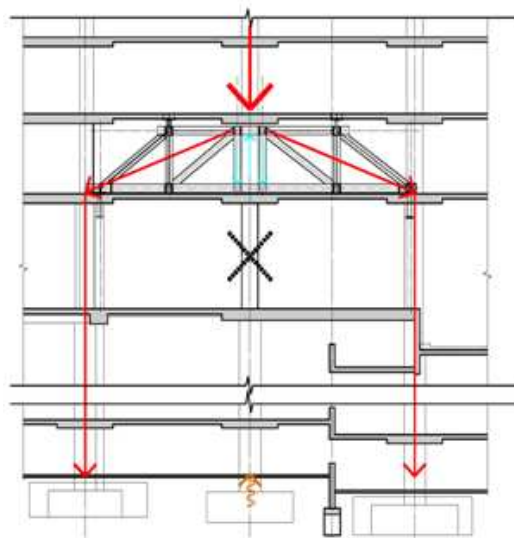


Fig. 12: Esquema de anulación de la carga por precarga; desvío y nueva trayectoria de la carga. Efecto de recuperación elástica de la fundación.

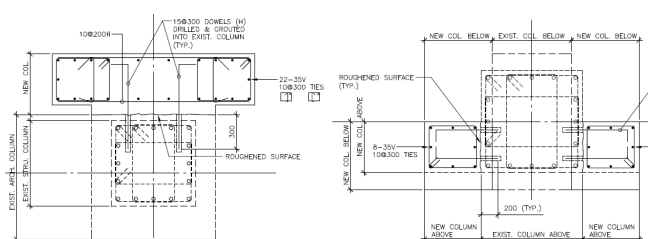


Fig. 13: Detalles para refuerzo de las columnas adyacentes. Zapata de fundación reforzada preparada para ser hormigonada.

6. EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN PRECISA DE LA CARGA EN LA COLUMNA:

Es necesario hacer una evaluación preliminar ajustada de la carga en la columna basándose en las cargas de diseño establecidas para cada uno de los niveles y considerando el sistema estructural de piso (utilizar áreas tributarias puede no ser preciso tratándose de la primera columna interior, contigua a la de borde). Otra consideración que debe hacerse es la determinación de los valores reales de las sobrecargas (debido al cielorraso suspendido, tabiques divisores, conductos

eléctricos y mecánicos, etc.) y de la carga viva actuante cuando hubiera ocupantes en forma permanente. Es recomendable establecer valores máximos y mínimos para acotar la carga y establecer la capacidad de los gatos hidráulicos que debieran utilizarse. Por razones que daremos más adelante recomendamos utilizar un sistema de gatos con capacidad de carga 50% mayor al de la carga máxima establecida.

La evaluación precisa de la carga en la columna debe establecerse a través de mediciones preliminares que involucren tanto la medición de deformaciones en el reticulado como de extensiones en las armaduras expuestas de la columna que va a ser descargada y cortada.

La razón principal para determinar en forma precisa la carga que lleva la columna es la de asegurarse que en los pisos superiores ocupados no se produzcan desplazamientos apreciables que puedan afectar su función y que los elementos no estructurales sujetos a los mismos, como ser tabiques de mampostería, mamparas de vidrio, etc., especialmente los cercanos a la línea de la columna en cuestión, no sufran figuración o daño alguno.

7. EFECTO DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA DE LA FUNDACIÓN POR DESCARGA DE LA COLUMNA CENTRAL:

La descarga de la columna central aliviará la carga de su correspondiente zapada de fundación lo que producirá una recuperación elástica del suelo y por consiguiente un desplazamiento ascendente de los pisos debajo del nivel de corte. En casos en que fuera necesario contrarrestar este efecto la fundación debe anclarse a la roca subterránea. En este proyecto debido a que los niveles de sub-suelo eran para estacionamiento y que la planta baja estaba desocupada y sin terminar se optó por dejar que la recuperación elástica ocurriera sin impedimento. Aún cuando el desplazamiento sea inconsecuente es conveniente hacer un análisis aproximado de su magnitud. Tal análisis requiere un buen conocimiento de las características del suelo para que se pueda modelar la interacción entre el suelo y estructura del edificio. En este proyecto se determinó que el desplazamiento vertical rondaría los 5 milímetros.

8. DESARROLLO DE DETALLES CONSTRUCTIVOS Y DESCRIPCIÓN PORMENORIZADA DE LOS PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO:

Un aspecto inusual que se le presenta al ingeniero estructural para este tipo de proyectos es la necesidad de incluir planos estructurales sumamente detallados de manera que los distintos rubros puedan presupuestar la obra y desarrollar planos de fabricación y obra muy precisos (Nota: en Canadá no es usual desarrollar la documentación estructural con demasiados detalles). Mas aún, es inusual la incorporación de procedimientos de proyecto sumamente detallados incluyendo metodologías y tareas de trabajo paso a paso para cada uno de los aspectos críticos del mismo.

9. FABRICACIÓN DE LOS RETICULADOS:

Los reticulados Pratt fueron fabricados en taller por mitades (fig. 14) con una junta horizontal para permitir su transportación y facilitar el izamiento, maniobra e ingreso

al edificio a través de un claro creado en la fachada (fig. 15). Una vez montadas las mitades y que estas quedaran perfectamente alineadas se procedía a abulonar las conexiones en diagonales y verticales. El vano central del reticulado se componía con una placa sólida de acero soldada en sus cuatro lados (fig. 16).



Fig. 14: Reticulado Pratt con junta horizontal en el taller (montado temporalmente y alineado para detallado de las juntas). Detalle de juntas abulonadas.



Fig. 15: Transportación e Izamiento del Reticulado Pratt por Mitades. Montaje de las Mitades.



Fig. 16: Reticulados Pratt terminados con protección ignifuga.

10. PREPARACIÓN DE LA ESTRUCTURA:

La estructura del edificio debía ser preparada para recibir a la estructura de transferencia. El trabajo incluía:

- Refuerzo de las columnas donde se apoyarían los reticulados y de sus zapatas de fundación (fig. 13).
- Preparación de la columna (en el primer piso, por encima de la columna a remover) a la que se conectaría la estructura de transferencia, en este caso los reticulados tipo Pratt (fig. 9). La preparación consistía en:
 - o localización de la armadura por medio no destructivos. Aun cuando se disponía de los planos de obra, en el presente proyecto, se utilizó la técnica de radar de subsuelo (GPR: ground penetrating radar) para ubicar la armadura y determinar la localización óptima de los pernos para anclaje de las placas.
 - o perforación precisa de lado a lado, colocación de los pernos de fijación e inyección con lechada de cemento a presión, (fig. 17)
 - o colocación de las placas de acero en cada cara de la columna con perfecta alineación a los montantes verticales del reticulado. Rellenado a presión del espacio dejado entre las placas y las caras de la columna con lechada de cemento.
 - o ajuste de los pernos, (fig. 9).



Fig. 17: Perforación precisa de la columna. Colocación de los pernos de fijación e inyección con lechada de cemento a presión

11. PREPARACIÓN DE LA COLUMNA A SER REMOVIDA:

Antes de ser removida, la columna deberá descargarse completamente para que la carga proveniente de los pisos superiores se transfiera a las columnas adyacentes debidamente reforzadas. Los reticulados cargados y deformados a su estado final, con la carga exacta que lleva la columna, posibilitaran el corte fácil de la misma y evitaran que los pisos superiores descendan cuando esta sea removida. La descarga completa se realizará a través de gatos hidráulicos que accionaran sobre los puntales fijados a la columna del primer piso y reaccionaran contra la viga de conexión entre los reticulados, (fig. 10). La descarga de la columna será evaluada a través de mediciones en las armaduras verticales de misma. En este proyecto se colocaron extensómetros (strain gauges) de resistencia eléctrica en varias de las armaduras principales de la columna, (figs. 18, 19 y 20), a media altura, para medir cambios en las deformaciones unitarias (relativos a la condición de carga inicial) en

función de la carga impuesta y para que a partir de estos se pueda determinar si la misma se corresponde con la descarga total de la columna. Como se explica mas adelante, para determinar la carga remanente en la columna es necesario tomar mediciones bajo distintas condiciones, tanto en función de la carga impuesta como de la sección transversal remanente correspondiente a la progresión del corte. Se colocaron un total de 8 extensómetros (dos por armadura) en 4 armaduras diferentes; en dos armaduras de esquina (diagonalmente opuestas) y en dos ubicadas en el centro de las caras (en lados opuestos) (fig. 19). Para medir las deformaciones de los reticulados se instalaron transductores lineales de desplazamiento (LVDT-Linear Voltage Displacement Transducer), (fig. 18).



Fig. 18: Ubicación de los extensómetros en la sección media de la columna y de los LVDT y viga de referencia para medición de las deformaciones en el reticulado.

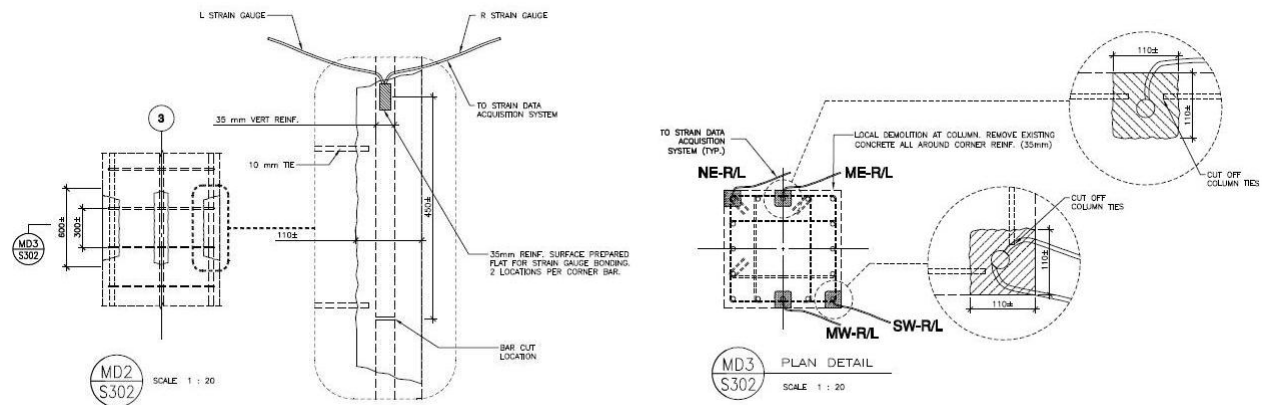


Fig. 19: Esquema para ubicación de los extensómetros en la sección media de la columna.

El sistema de monitoreo se complementa con un transductor de presión que se instaló en el colector múltiple, a la salida de la bomba de presión que alimenta a los gatos, un extensómetro testigo de temperatura para poder anular cualquier efecto de temperatura en las mediciones y un transductor lineal de desplazamiento para medir cambios de longitud (alargamientos) de la columna de planta baja. Los distintos tipos de señales (voltaje, resistencia), provenientes de cada elemento de medición, son recogidos por un sistema de adquisición de datos de varios canales y

transformados por software a sus correspondientes unidades de medición (carga en [kN], desplazamiento en [mm] y extensión unitaria en micro extensión [$\mu\epsilon$]), (fig. 20).

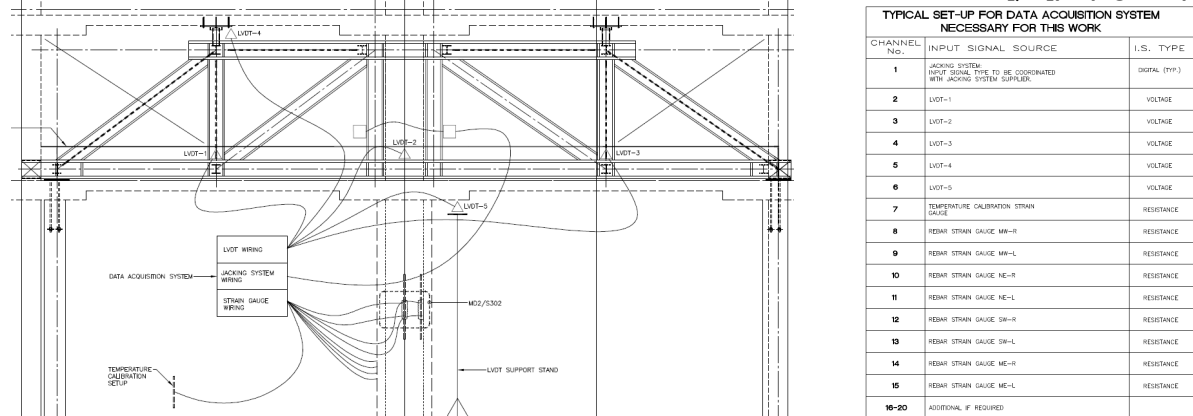


Fig. 20: Sistema de monitoreo en la columna. Descripción de los canales de entrada.

12. PLAN DE CARGA DE LOS RETICULADOS Y DESCARGA DE LA COLUMNA:

Se estableció un plan de ensayo (carga y descarga) para verificar el correcto funcionamiento de la estructura de transferencia, de los sistemas de monitoreo y medición y de la metodología utilizada para determinar la carga en la columna. Se establecieron cuatro fases, (fig. 21).

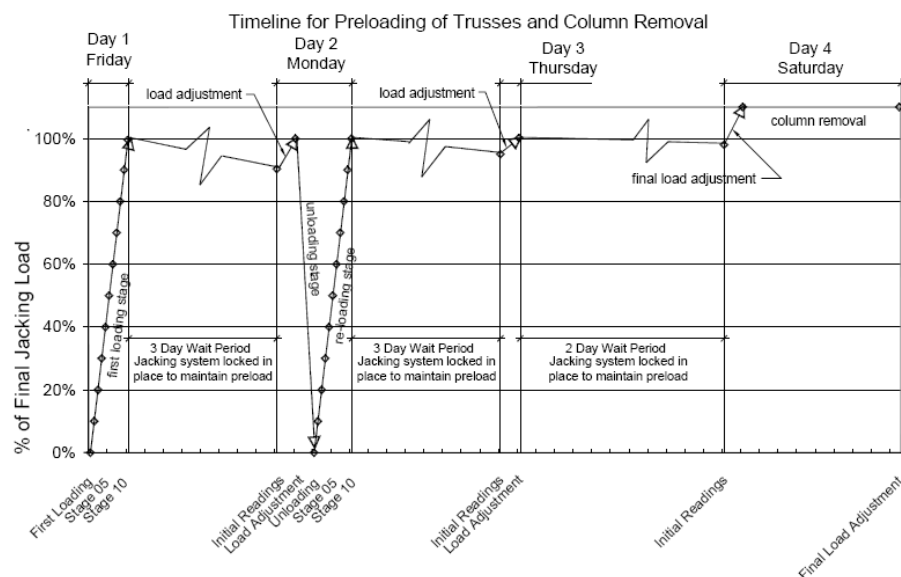


Fig. 21: Esquema del plan de carga, descarga y monitoreo en la columna.

La primera fase, de carga y descarga, era para permitir que la estructura se acomodara y en términos generales, verificar/establecer la relación carga-deformación de los reticulados y carga-deformación unitaria en la columna en relación a los modelos de análisis. Al final de esta fase, al descargar volviendo al estado inicial, se cortaría la armadura de una de las esquinas para así establecer el estado original de tensión-deformación del acero en la columna. La segunda fase, de carga, era para dejar mejor establecida la relación entre la carga de estructura de transferencia y la descarga en la columna y para que el sistema permaneciera en un

estado cercano al final antes del corte definitivo. La tercera etapa tenía como propósito ajustar la carga a partir de las mediciones preliminares y permitir ajustes finales en la metodología de cálculo de la carga final. La etapa final era para hacer el ajuste final de la precarga y comenzar el proceso de corte progresivo y controlado de la columna, (fig. 22).

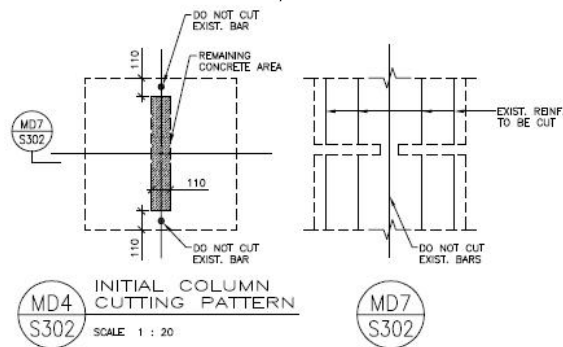


Fig. 22: Progresión del corte a través de la sección.

13. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINACIÓN PRECISA DE LA PRECARGA:

Establecer en forma unívoca la relación carga deformación en una columna de hormigón armado acarrea muchas dificultades. Entre las principales razones podemos mencionar: a.) las dificultades para el conocimiento fidedigno de las características mecánicas del hormigón en la columna a través de la curva tensión-deformación del hormigón incluyendo su capacidad a tracción, b) el efecto y la magnitud de la contracción por fragüe, c) el efecto y la magnitud de la fluencia lenta en el hormigón.

Si no se tuvieran datos mas precisos, ni se considerara hacer ensayos sobre probetas extraídas de la misma columna, la curva completa tensión-deformación (f_c vs ϵ_f) del hormigón debe inferirse a partir de un único valor el de la resistencia característica del hormigón utilizado en el proyecto (f'_c). A partir de la capacidad a compresión del hormigón, con una ecuación confiable, se infiere el módulo de elasticidad tangencial inicial del hormigón, de corto plazo, (E_c). Asumiendo que la relación (f_c vs ϵ_f) es parabólica, se puede calcular la deformación unitaria para el valor de máxima compresión (ϵ'_c) y a partir de esta definir en forma completa la curva tensión deformación. Así es que:

$$E_c [MPa] = 5500 \sqrt[3]{f'_c [MPa]} ; \epsilon'_c = 2f'_c / E_c ; f_c / f'_c = 2 \epsilon_{cf} / \epsilon'_c - \left(\epsilon_{cf} / \epsilon'_c \right)^2 \quad (1)$$

El efecto de contracción por fragüe puede considerarse en forma simplificada a través del término (ϵ_{sh}) que define la diferencia absoluta entre las deformaciones unitarias del hormigón y el acero. Este desfase en las deformaciones unitarias efectivas (aquellas que producen tensiones) ocasiona que el estado de descarga completa en la columna no se corresponda con el de deformaciones nulas en las armaduras (ni en el hormigón). Es decir, cuando la deformación unitaria de las armaduras sea nula no corresponderá al estado de la columna descargada, como lo sería si la misma estuviera compuesta sólo de materiales que no experimenten un efecto de desfase entre sus deformaciones unitarias. De esta manera las

deformaciones unitarias en el hormigón quedan definidas por la ecuación:

$\varepsilon_c = \varepsilon_{cf} + \varepsilon_{sh}$; y en el acero por: $\varepsilon_s = \varepsilon_{sf}$; siendo que la relación entre ambas, cuando existe perfecta compatibilidad, es: $\varepsilon_c = \varepsilon_s$ la curva carga-deformación de la columna presenta un desfaseaje como puede verse en la fig. 23.

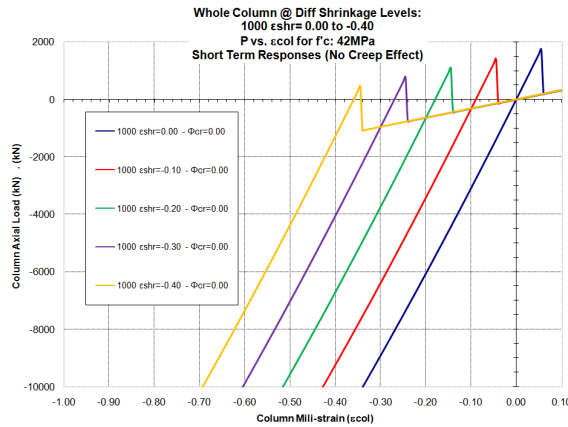


Fig. 23: Curvas de carga en la columna en función de las deformaciones unitarias en el acero para diferentes valores de la contracción por fragüe.

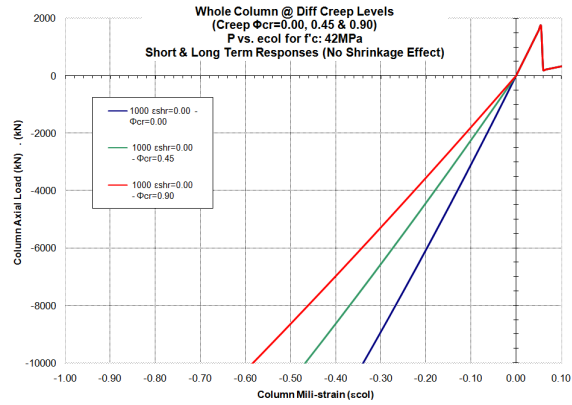


Fig. 24: Curvas de carga en la columna en función del efecto de fluencia lenta (sin considerar el efecto de contracción por fragüe).

El efecto de fluencia lenta hace que a través del tiempo se produzca un traspaso paulatino de la carga desde hormigón hacia las armaduras. Dicho efecto puede considerarse en forma aproximada a través de un módulo de elasticidad tangencial del hormigón reducido (E_{ct}) que se calcula a partir del módulo de elasticidad tangencial inicial del hormigón, de corto plazo, (E_c) y del coeficiente de fluencia lenta, creep, (Φ_{cr}) de la siguiente manera:

$$E_{ct} = E_c / (1 + \Phi_{cr}) \quad (2)$$

El efecto de la fluencia lenta del hormigón en la curva carga deformación de la columna se presenta como una relajación de la misma como puede verse en la fig. 24.

Dado el grado de incertidumbre que existe en la definición de estos tres efectos los mismos deben considerarse en forma aproximada, para establecer los rangos de valores posibles. En el presente trabajo se estableció que la deformación unitaria de contracción por fragüe (ε_{sh}) oscilaba alrededor del 0.35‰ y que el coeficiente de fluencia lenta (Φ_{cr}) variaría entre 0.4 y 0.8.

Aun cuando la relación carga deformación de la columna presenta una marcada concavidad si se considera su rango completo de carga, en el rango de cargas de servicio su concavidad es poco apreciable y la relación puede considerarse lineal. Sin embargo, la descarga debe ser lineal y con pendiente resultante de la composición entre el acero y el hormigón correspondiéndose con la siguiente ecuación:

$$P(\varepsilon) = A_s E_s \varepsilon + A_c E_{ct} (\varepsilon - \varepsilon_{sh}) \quad (3)$$

Sin dar mayores detalles, los que se presentaran en una publicación adicional, en el presente proyecto se determinaron varias curvas que representaban la descarga de la columna a partir de una supuesta carga original para diferentes niveles de descarga. Para cada uno de esos niveles fijos de descarga, que establecían un valor constante de carga remanente en la columna, se graficaba la variación (incremento) de las deformaciones unitarias en las armaduras centrales por efecto de la disminución del área de hormigón de la columna causada por la progresión del corte, (fig. 25).

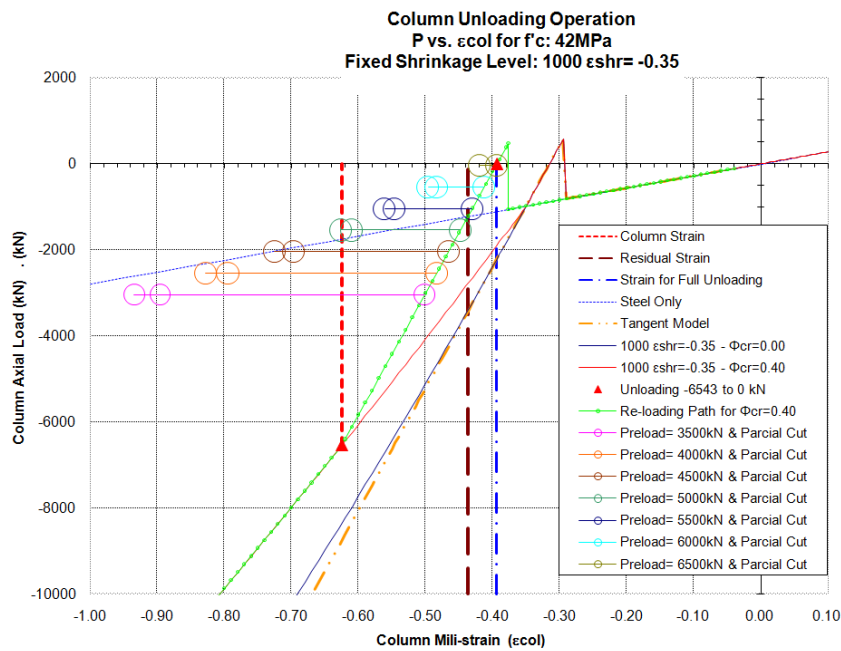


Fig. 25: Curvas de carga y descarga en la columna en función de las deformaciones unitarias en el acero. Cambio (incremento) de las deformaciones en las armaduras con la progresión del corte de la sección para diferentes niveles de precarga.

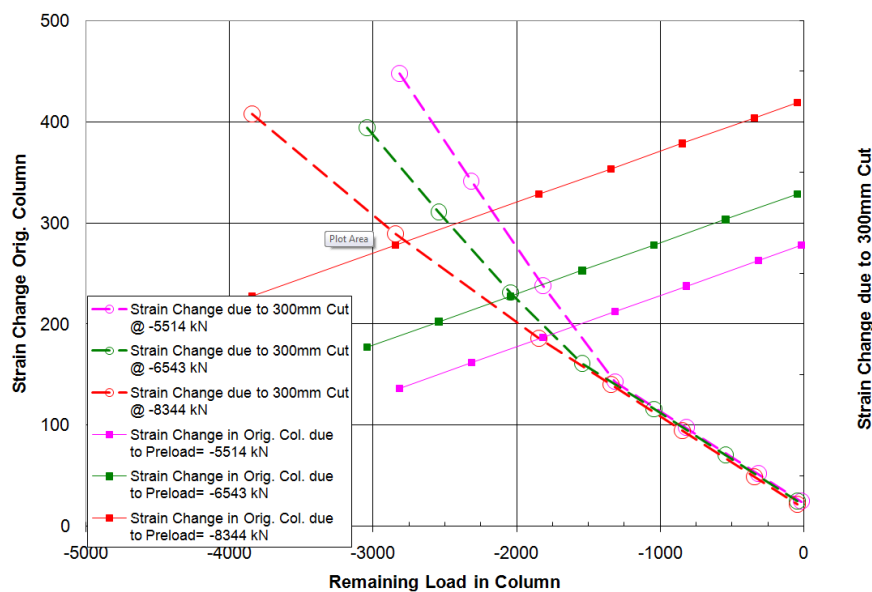


Fig. 26: Curvas de descarga en relación al valor original de la deformación unitaria (curvas solidas) y de cambio en la deformación unitaria en las armaduras centrales en relación a la carga remanente (curvas discontinuas).

De estas gráficas se extrajeron dos curvas, una representando la descarga en relación al valor original de la deformación unitaria en la armadura de esquina (curvas solidas) y otra representando el cambio en la deformación unitaria en las armaduras centrales en relación a la carga remanente (curvas discontinuas), (fig. 26). A partir de esta gráfica y con los valores provenientes de las mediciones en los extensómetros pudo establecerse el valor de ajuste de la precarga para fijar la misma y proceder al corte final de la columna.

14. OPERACIÓN DE CORTE DE LA COLUMNA Y PROCEDIMIENTO DE AJUSTE FINAL DE LA PRECARGA:

Para el corte de la columna se utilizó una sierra de disco y puntas de diamante de gran diámetro (52 pulgadas), montada a un bastidor que fue fijado a la columna, (fig. 27). El procedimiento de corte se hizo en dos etapas así establecidas para que en la progresión del corte hubiera pausas donde tomar mediciones y reevaluar la carga, ajustándola si fuera necesario. El corte comenzó por el lado donde se corto la primera armadura de esquina y progresó hasta llegar a unos 55mm del eje medio de la sección. Luego se cambió de lado y se procedió en forma análoga hasta unos 55mm del eje medio de la sección dejando un área remanente de columna de unos 110mm por el ancho restante de la misma (disminuido en 100mm por lado debido a las hendiduras producidas inicialmente para exponer las armaduras medias donde se colocarían los extensómetros), (fig. 22). Luego de realizar nuevas mediciones por el corte de las dos últimas armaduras (las centrales), cálculos y evaluaciones finales con las gráficas y de ajustar la carga se procedió a fijar la carga a través de chapas de ajuste y subsiguientemente al corte final de la misma. Sin embargo, con todos los recaudos mencionados, antes de que se produjera la pasada final del disco para hacer el encuentro con el corte en el lado opuesto, a milímetros de completarse el corte total, se produjo la clavada del disco. La solución definitiva fue crear nichos a cada lado de la columna, por debajo del plano de corte inicial, para instalar gatos hidráulicos que imposibilitaran el cierre sobre el disco y facilitarían el uso de una perforadora de cilindro para realizar el corte final, (fig. 27). Los gatos fueron descargados sin que se produjeran desplazamientos perceptibles ni mensurables en los pisos superiores, (fig. 28).

15. CONCLUSIÓN

Se ha presentado un proyecto de corte y remoción de una columna en un edificio ocupado, que fuera ejecutado en forma exitosa en abril del 2007. El éxito del proyecto se basa en lo siguiente: 1) la remoción de la columna se realizó estando el edificio ocupado, sin necesidad de evacuar a sus ocupantes ni que estos supieran lo que había ocurrido; 2) no se produjeron desplazamientos verticales apreciables en los pisos superiores; 3) el método para evaluar la carga en la columna fue preciso como se deduce del punto anterior; 4) la estructura de transferencia quedó expuesta realizando la arquitectura del lugar; y 5) el proyecto se llevo a cabo dentro de los plazos establecidos y del presupuesto original.



Fig. 27: Corte final de la columna. Perforación del núcleo de hormigón remanente de la columna.



Fig. 28: Remoción del primer pedazo de la columna.