

Maurizio Acito
Alberto Franchi
Antonio Migliacci

Procedura numerico-sperimentale della fase di riallineamento delle travi dell'impalcato del 26° piano del grattaciolo Pirelli a Milano

Experimental Numerical procedure used in the realignment of the deck beams of the 26th floor of the Pirelli skyscraper in Milan

Sommario

La memoria presenta in modo dettagliato la procedura seguita per ottenere il riallineamento delle travi dell'impalcato del 26° piano del grattaciolo Pirelli, danneggiate con grandi spostamenti verso il basso a causa dell'incidente avvenuto il 18 aprile 2002, quando un piccolo aereo ha colpito la facciata su Piazza Duca d'Aosta del Palazzo Pirelli. Scopo della memoria è quello di presentare le analisi e le procedure utilizzate per tale fase di riallineamento.

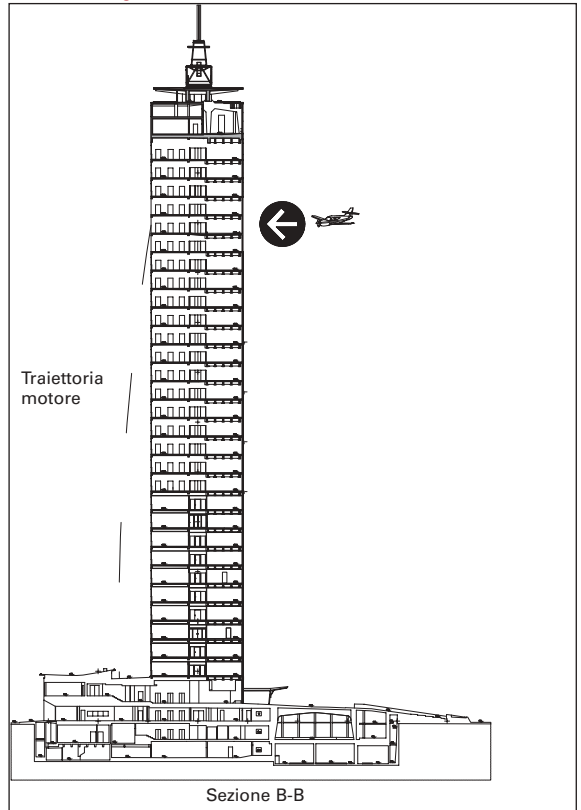
Premessa

Il giorno 18 aprile 2002, alle ore 17,47, un monomotore Commander 112 Tc ha colpito la facciata del grattaciolo Pirelli su piazza Duca d'Aosta [Figura 1'], tra l'impalcato del 26° piano e quello del 27° piano, sulla mezzeria dell'edificio, penetrando all'interno [Figura 2'].

In seguito all'urto e all'esplosione dei due serbatoi, posizionati in prossimità delle ali, il motore dell'aereo si è separato dalla fusoliera, fuoriuscendo dalla facciata opposta, lato via Fabio Filzi.

I danneggiamenti prodotti sulle strutture ([1], [2] e [3]), dell'impalcato del 26° piano, erano caratteriz-

1.
Sezioni verticali edificio
(sez. B-B di Figura 2)
Vertical section of building
(sez. B-B of Figure 2)

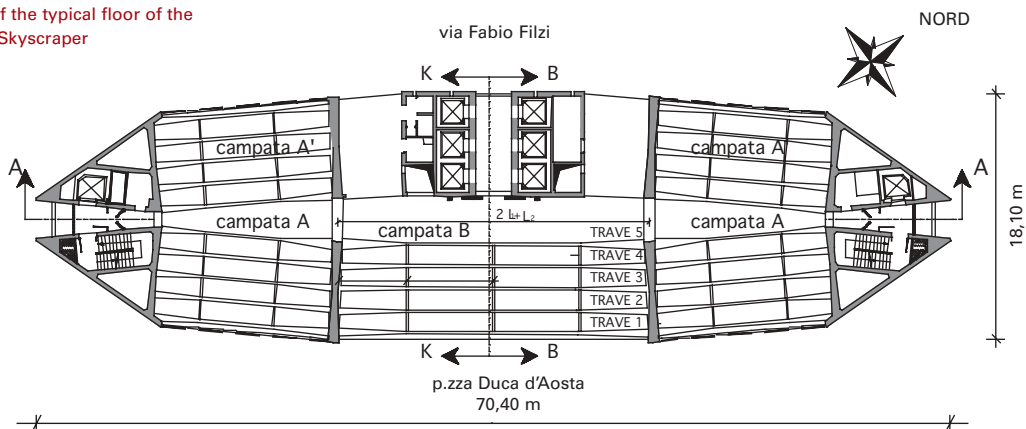


Summary

The paper presents in detail the procedure followed in order to obtain the realignment of the deck beams on the 26th floor of the Pirelli skyscraper, which were damaged by being violently shifted downwards in the accident that occurred on 18th April 2002, when a small plane ploughed into the façade overlooking Piazza Duca d'Aosta of the Pirelli building. The purpose of the paper is to analyze the procedures employed in effecting the realignment.

2.

Pianta dell'impalcato tipo del grattacielo Pirelli
Deck of the typical floor of the Pirelli Skyscraper



zati da uno stato fessurativo delle travi localizzato a cavallo della mezzeria, e da uno stato di deformazioni delle travi tali da determinare, nelle sezioni di mezzeria, frecce comprese fra i 25 cm della trave più interna, e i 14 cm della trave esterna (P. zza Duca d'Aosta). Per le travi dell'impalcato del 27° piano, lo stato deformativo, oltre che invertito (in quanto prodotto da un carico verso l'alto, [1], [2], e [3]) si presentava con spostamenti residui verso l'alto di 5-6 cm in mezzeria della trave 5, la più deformata. Il problema del riallineamento delle travi della campata B dell'impalcato del 26° piano [Figura 2'], risultato fondamentale nel momento in cui ci si è orientati in direzione di una conservazione delle strutture esistenti. In tale ottica, è risultato essenziale il recupero delle deformazioni residue verso il basso, mediante una forzatura con dei martinetti su una puntellazione di contrasto. Come si vedrà nel prosieguo, il raggiungimento di tale obiettivo è stato possibile confidando sulla possibilità di potere assegnare una deformata plastica, in verso opposto a quella residua dopo lo scoppio, tale da garantire che allo scarico le travi assumessero la posizione voluta (configurazione obiettivo). Si è altresì ipotizzato di stimare in modo attendibile

Foreword

On 18th April 2002, at 17.47 hours, a 112 TC Commander single-engine plane struck the facade of the Pirelli skyscraper overlooking Piazza Duca d'Aosta [Figura 1'] between the deck beams of the 26th floor and those of the 27th floor, near the central cross-section, penetrating inside the building [Figura 2'].

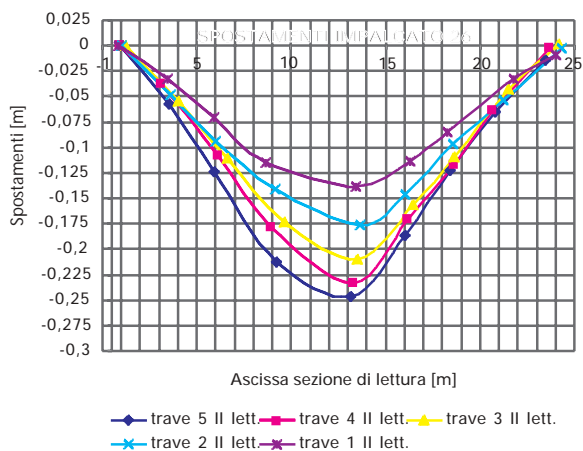
As the result of the collision and the explosion of the two fuel-tanks, located near the wings, the plane's engine was severed from the fuselage, ending up outside the opposite façade, that is facing Via Fabio Filzi.

The damage caused to the structures ([1], [2] and [3]) of the beams on the 26th floor indicated cracks in the beams located across the centre, as well as deformation of the beams so severe that, in central cross-sections, it caused displacements ranging from 25 cm for the internal beams to 14 cm for the external beams (on the Piazza Duca d'Aosta side). As regards the deck beams on the 27th floor, the deformation, in addition to being inverted (inasmuch as it was caused by an upward thrust [1], [2], and [3]), evidenced upward residual displace-

3.

Deformazioni residue impalcato 26° piano

Residual deformations of the 26th floor



la storia delle forze e i corrispondenti stati di sollecitazione e deformazione indotti dalla forzatura, anche in relazione al progetto della puntellazione e la scelta del tipo e portata dei martinetti. Nel prosieguo si illustrano le analisi e le procedure seguite per ottenere il raggungimento di tale obiettivo.

Aspetti metodologici della fase di riallineamento

Obiettivi del riallineamento

Di fronte alla vistosa deformazione del 26° piano nella campata B [Figura 3'], condizione preliminare necessaria per il risanamento era il recupero della configurazione orizzontale dell'impalcato. Infatti, solo nella configurazione orizzontale, una volta ricostruite le sezioni danneggiate e sigillate le fessure, poteva realmente risultare efficace, per restituire l'originaria portanza alle strutture, il sistema di rinforzo costituito da cavi post-tesi esterni alle travi.

Il raggungimento del riallineamento delle travi presentava necessariamente notevoli difficoltà sia sul piano teorico concettuale che sul piano pratico esecutivo.

Innanzitutto, per quanto riguarda gli aspetti teorico-concettuali, occorre evidenziare che la difficoltà maggiore era costituita dalla valutazione, attraverso modelli teorici e numerici, della deformata finale da raggiungere, ossia della escursione in campo plastico da imporre alla struttura, con i carichi dei martinetti dal basso verso l'alto, tale per cui alla rimozione della forzatura, la struttura per effetto degli scarichi elastici raggiunse la configurazione obiettivo.

Dal lato operativo, invece, la difficoltà maggiore era sicuramente legata al fatto di non disporre di 15+4 [Figura 4'] martinetti a spostamento imposto.

ments of 5-6 cm at the centre of beam 5, the most severely deformed one. The problem of realigning the beams of span B of the deck beams on the 26th floor [Figure 2'] appeared to be of fundamental importance inasmuch as the initial intention was to attempt to preserve the existing structures. With this in mind, it was essential to force the residual deformations downwards by using hydraulic jacks on a pack prop.

As the sequel of this article will show, achievement of this objective was made feasible by relying on plastic displacements set up in the opposite direction in relation to the situation remaining after the explosion, in such a way as to ensure that, upon relieving the pressure on the beams, they would then subside into the desired position (target configuration). Moreover, the reasoning was that it should be possible to arrive at a reliable estimate of the behaviour of the forces exerted and the corresponding stresses and deformations induced by forcing, among other things in relation to the pack-prop design and the choice of the type and the strength of the hydraulic jacks. The procedures followed in order to achieve this result will now be described and analysed.

Methodological Aspects of the Realignment Phase

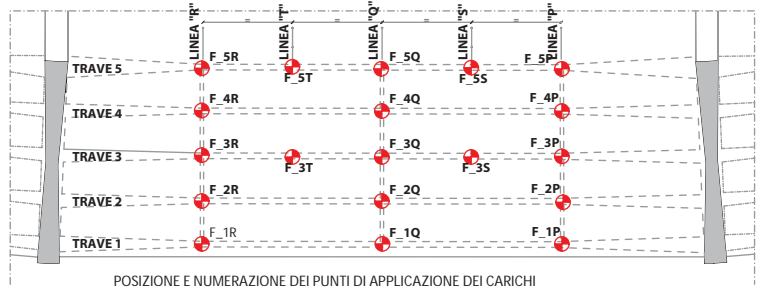
Objectives of the Realignment

To cope with the spectacular deformation of the 26th floor of Span B [Figure 3'], the initial requirement for the repair was to restore the horizontal configuration of the deck beams.

Indeed, only with the horizontal configuration, once the damaged sections had been reconstructed and the cracks sealed, could the reinforcing of the system consisting of the post-tension cables outside

4.

Posizione dei puntelli di forza
Pack-prop position



Stima numerica delle forze dei martinetti e procedura della fase di riallineamento
Ipotesi base per la costruzione del modello numerico

Una corretta modellazione numerica, data l'entità delle deformazioni avvenute, e quindi da recuperare, doveva necessariamente considerare sia la non linearità meccanica che la non linearità geometrica. In particolare, per la non linearità meccanica, a partire dai legami costitutivi dell'acciaio, per il quale si è potuto ipotizzare un legame costitutivo elastico perfettamente plastico, e del calcestruzzo, per il quale si è adottato un legame costitutivo del calcestruzzo confinato [4], si è valutato, per ciascun concio in cui si sono suddivise le travi, il legame $M-\vartheta$ momenti-curvature [Figura 5*].

Modello numerico per l'analisi statica in regime non lineare

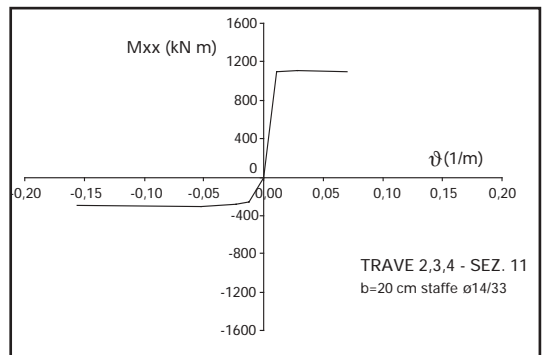
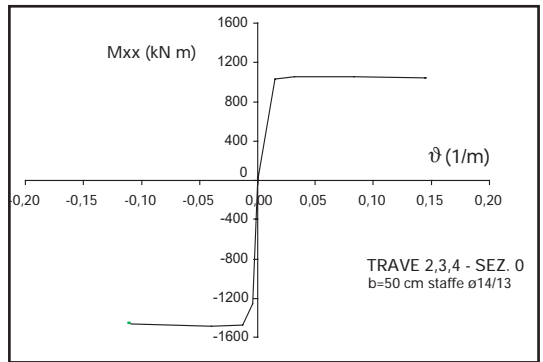
Il modello numerico è stato realizzato con l'ausilio del codice di calcolo STRAUS7.

In particolare, ciascun concio di trave, con cui si sono suddivise le travi (struttura discretizzata), è stato modellato con elementi beam, adottando i legami $M-\vartheta$ precedentemente determinati. Elementi sempre tipo beam sono stati utilizzati per i traversi, mentre, per i setti verticali e la soletta di piano sono stati utilizzati elementi plate/shell [Figura 6*].

Lo studio della risposta strutturale per effetto del riallineamento dell'impalcato è stato eseguito attraverso un'analisi statica non lineare. Incrementando le forze che simulano i martinetti a controllo di forze o i cedimenti imposti dai martinetti a controllo di spostamenti (a seconda del modello di carico), mediante un determinato numero di step,

5.

Tipico legame $M-\vartheta$ (momenti-curvature)
Typical $M-\vartheta$ law



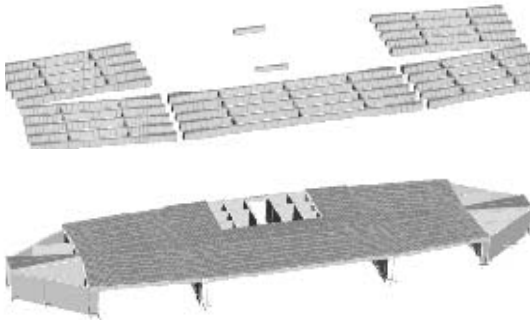
6.

Modello con discretizzazione delle travi

FE. beams model

Modello degli elementi finiti dell'intero impalcato

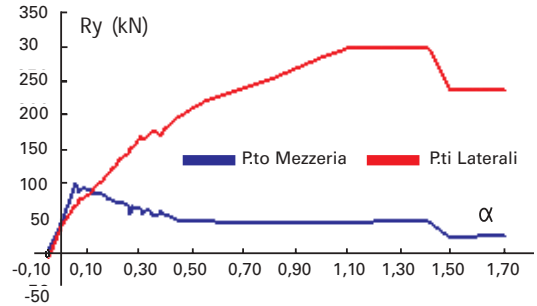
FE. model of full deck



7.

Leggi di carico

Load laws



si è portata la struttura a plasticizzazione con una configurazione deformata tale che allo scarico riuscisse a recuperare gli spostamenti fino ad ottenere il riallineamento prefissato.

Risultati delle elaborazioni numeriche

Il primo modello analizzato è quello di trave singola, ad esempio la trave 4, vincolata agli estremi con incastrati e soggetta a cedimenti vincolari nei punti di intersezione con i tre traversi della campata centrale.

Ad ogni step i^{mo} i cedimenti imposti sono ottenuti come frazione percentuale del cedimento di progetto attraverso il fattore α . Al valore $\alpha=1$, corrisponde il valore dello spostamento di progetto δ^P che si vuole ottenere in un determinato punto. Imponendo gli spostamenti sono state ricavate le storie di carico [Figura 7'] dalla lettura delle reazioni vincolari; si osserva che nel punto di forzatura centrale (martinetto che opera in mezzeria) la forza corrispondente alla storia di spostamenti imposto ipotizzata risulta, al massimo, circa 1/3 di quella dei punti di forzatura laterale. Si osserva inoltre che la somma delle forze per i tre punti di forzatura risulta compresa fra i 500 e i 650 kN.

the beams be really effective for restoring the original load capacity of the structures.

Achieving the realignment of the beams of necessity presented considerable difficulties, both from the theoretical point of view and in terms of practical execution.

Above all, as regards the theoretical and conceptual aspects, it has to be made clear that the greatest difficulty lay in the evaluation, by means of theoretical and numerical models, of the final deflection to be achieved: that is, the plastic deformation could be imposed on the structure, with the hydraulic jack loads working from the bottom up, in such a way that, with the removal of the imposed forces, the structure, due to the effect of elastic unloading, was able to reach the target configuration.

From the operational angle, on the other hand, the main difficulty certainly lay in the fact that no 15+4 [Figure 4'] imposed displacement hydraulic jacks were available.

In alternativa si è analizzato un modello in cui ad essere imposta è una storia di carico. In particolare, si è studiato un modello numerico con uno schema di carico con tre forze uguali applicate in corrispondenza dei traversi con valore di partenza pari a 20 kN. Sono stati diagrammati gli spostamenti in funzione del fattore moltiplicativo dei carichi α [Figura 8*].

Tali diagrammi, se confrontati con i risultati dell'analisi a controllo di spostamento, consentono di osservare che le storie di carico dei martinetti per il riallineamento, pur presentando andamenti piuttosto diversi tra di loro, confermano il valore del carico totale necessario per il riallineamento.

Analizzando i digrammi forza-spostamento [Figura 8*] si possono sviluppare alcune considerazioni. Innanzitutto, se si individua la pendenza iniziale per ciascuna delle due curve, si può avere una prima stima dell'andamento del ramo di scarico e del corrispondente valore del recupero elastico. Ad esempio, nel caso in esame, se si pone come obiettivo il recupero della freccia plastica della sezione di mezzera della trave 4, pari a circa 22 cm (circa 10 cm sui traversi), allora occorre raggiungere un carico in mezzera di circa 140 kN (retta di scarico tratteggiata) a cui corrisponde uno spostamento di circa 24 cm (recupero elastico di soli 2 cm).

In realtà il recupero elastico di elementi in c.a. è sempre maggiore di quello ottenibile con tale ipotesi in quanto il ramo di scarico di elementi in c.a. è sempre caratterizzato da una rigidità inferiore a quella della fase elastica di carico.

Ad esempio, se si sviluppa una elaborazione della fase di scarico con un modello numerico che tiene conto del comportamento del c.a. allo scarico, definito con il modello isteretico di Takeda [5], si può osservare che il ramo di scarico risulta molto più pendente (retta punteggiata in Figura 8).

In tal caso, anche se il valore della forza da applicare risulta poco diverso (circa 170 kN), per ottenere allo scarico il recupero della freccia plastica di 22 cm occorre raggiungere uno spostamento totale verso l'alto di circa 40 cm. In tal caso, risulterebbe un recupero elastico di circa 18 cm, ossia 9 volte quello ottenuto col modello con rigidità iniziale al carico. Il dato comune ai due modelli è che il carico totale corrispondenti alle frecce plastiche da recuperare, risulta di circa (600-700 kN). Già sulla base di tali analisi è stato possibile stimare che il carico di forzatura totale per le 5 travi, necessario per rag-

Numerical Estimate of the Forces of the Hydraulic Jacks and Procedure for the Realignment Phase Basic Assumption for the Construction of the Numerical Model

Correct numerical modelling, given the extent of the deformations that had taken place, which had therefore to be corrected, was bound to take into consideration both mechanical and geometrical non-linearity.

In particular, as regards mechanical non-linearity, starting with the structural steel binders, for which a perfectly plastic elastic binder could be assumed, and the reinforced concrete, for which a confined concrete link was used [4], the link $M-\vartheta$ bending moment was estimated in respect of each quoin into which the beams were subdivided [Figure 5*].

Numerical Model for Static Analysis in the Non-linear State

The numerical model was made using the STRAUS7 computing code.

In particular, each beam quoin, into which the beams were subdivided (discrete structure) was modelled using *beam* elements and with the $M-\vartheta$ links previously established.

Beam components were again used for the transversal girders, while, for the seven shear walls and the floor slab, plate/shell components were employed [Figure 6*].

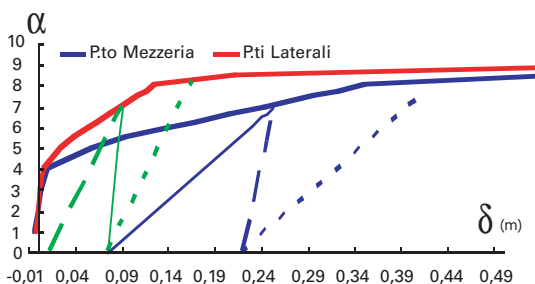
Research on the structural response due to the effect of deck beam realignment was carried out by non-linear static analysis. By increasing the forces simulating the *controlled force* hydraulic jacks or the displacements imposed by the jacks controlling the same (depending on the load model), by means of a given number of steps, the structure was brought to plasticization with a deformed configuration such that, after unloading, it was possible to restore the displacements until the planned realignment was obtained.

Results of the Numerical Processing

The first model analysed was that of the individual beam, for example beam 4, tied at its extremities with fixed ends and subject to supported displacements at the points of intersection with the three girders of the central span.

At each i^{th} step, the displacements imposed were obtained as percentages of the design displacement via factor α . Corresponding to the value $\alpha = 1$ is the value of the design displacement δ^P , which it is

8.
Curve forza - spostamento
con scarico
Force - displacement curve
with unloading



giungere la configurazione obiettivo dovesse essere, cautelativamente, dell'ordine di 3500 kN.

Così pure, sempre sulla base di tali analisi, assumendo una pendenza di scarico intermedia fra le due descritte in precedenza, è possibile stimare in circa 10-12 cm lo spostamento verticale verso l'alto (per le sezioni di mezzeria), da aggiungersi allo spostamento permanente iniziale, affinché allo scarico dei martinetti si ottenga la configurazione obiettivo (circa 3-4 cm di monta finale permanente). Per le sezioni in corrispondenza dei traversi laterali, invece, la stima della maggiore escursione plastica è di circa 1-2 cm.

Un ulteriore modello per lo studio della fase di riallineamento è stato predisposto con riferimento alla struttura nella sua spazialità, tenuto conto delle condizioni al contorno per effetto delle preliminari demolizioni con apertura delle fessure lungo il perimetro della soletta. In tal caso, le elaborazioni numeriche, anche se con tempi di elaborazione maggiori, permettono di considerare le interazioni fra le travi. I risultati ottenuti confermano la stima della forzatura totale.

Procedura operativa del riallineamento

Descrizione del sistema di forzatura e di puntellazione

Come si è accennato, la forzatura è stata ottenuta con l'applicazione a ciascuna delle travi 1-2-3-4 e 5 di una forza posta in corrispondenza dei traversi [Figura 4'], per un totale perciò di tre forze per ogni trave e quindi, complessivamente, di 15 punti di carico. A tali punti, in fase di sollevamento, si sono aggiunti altri 4 punti di forzatura applicati alle travi 3 e 5 [Figura 4']. In tutti questi punti

sought to obtain at a given point.

By imposing the displacements, the load histories [Figure 7'] were obtained by reading the support reactions; it may be noted that, at the imposed central forces (the hydraulic jack operating in the centre) the force corresponding to the history of the imposed displacements is, at the most, about $1/3$ of that of the lateral forces. In addition, it may be noted that the sum of the forces for the three points is between 500 and 650 kN. As an alternative, an analysis was carried out of a model in which a load history is imposed. In particular, a study was made of a numerical model with a load pattern with three equal forces applied at the transversal girders with a starting value of 20 kN. Diagrams were made of displacements as a function of the load multiplication factor α [Figure 8'].

These diagrams, compared with the results of the displacement analysis control, makes it possible to see that the load histories of the realignment jacks, while registering somewhat different trends from each other, confirm the total load value required for realignment.

If we analyze the force-displacement diagrams [Figure 8'], the following considerations emerge. Above all, if we identify the initial slope for each of the two curves, we can obtain an initial estimate of the unloading branch trend and the corresponding value of the elastic recovery. For example, in the case in question, if we take as our objective the recovery of the plastic displacements in the middle cross-section of beam 4, equal to about 22 cm (about 10 cm on the girders), we have to reach a central load of about 140 kN (unloading indicated by dashed line), to which a displacement of about 24 cm corresponds (elastic recovery of only 2 cm). In reality the elastic recovery of reinforced-concrete parts is always greater than that obtainable on this assumption, inasmuch as the unloading branch of r.c. parts is always characterized by less stiffness than that of the elastic loading phase. For example, if we develop by processing the unloading phase using a numerical model that takes into account the behaviour of the r.c. when unloading, defined by Takeda's hysteretic model [5], it will be noticed that the unloading branch hangs down much more (dotted line in Figure 8). In this case, even if the value of the force to be applied is not very different (about 170 kN), to obtain, when the unloading, the plastic displacement recovery of 22 cm, it is necessary to achieve

sono stati controllati in tempo reale gli spostamenti via via recuperati.

I puntelli di sicurezza sono stati previsti del tipo regolabili per poter seguire il sollevamento ottenuto passo-passo, anche ai fini di potere consentire il recupero della corsa dei martinetti posizionati secondo lo schema di figura 4 e collegati al sistema di alimentazione e controllo come illustrato in Figura 9.

La stima del carico totale di forzatura di circa 3500 kN, peraltro confermata nella fase di sollevamento, comporta un carico di contrasto per gli impalcati sottostanti (impalcati piani 25°, 24°, 23° e 22°) attivati dalla puntellazione, di circa $3500/4=875$ kN, ovvero un carico distribuito di circa $875/251$ m²=3,5 kN/m², di poco superiore al carico di servizio (3,00 kN/m²).

Cosicché, la puntellazione su ulteriori tre piani sottostanti, ha consentito di ripartire il carico di contrasto dei martinetti su quattro impalcati (25°, 24°, 23° e 22° piano) in modo da riportare il carico, per ciascun impalcato, a valori compatibili con i carichi di servizio delle travi.

Attrezzatura per il carico e strumentazione di controllo

Per quanto riguarda le caratteristiche dell'attrezzatura utilizzata per attuare il sollevamento, si sono impiegati martinetti idraulici a singolo effetto alimentati tramite un distributore da un'unica centralina di pompaggio. Il circuito idraulico permetteva di disconnettere tutti i martinetti tranne uno o più di uno per i quali poteva essere variata la pressione secondo le esigenze [Figura 9*].

Poiché la corsa dei pistoni dei martinetti non era sufficiente a coprire l'intero spostamento da recuperare è stato necessario recuperare la corsa dei martinetti introducendo degli spessori metallici [Figura 10*].

Nella fase di ripresa della corsa dei pistoni il carico fornito dai martinetti veniva surrogato dall'attivazione dei puntelli regolabili. In generale, comunque, via via che si procedeva nel sollevamento i puntelli venivano regolati in modo da essere portati a contatto con la struttura.

La strumentazione di controllo degli spostamenti e delle forze applicate alla struttura era costituita da trasduttori di spostamento posti al piano superiore (in corrispondenza dei punti di carico), collegati ad una centralina di acquisizione digitale dei dati in grado di acquisire, con frequenza di campionamento

an upward displacement of about 40 cm.

In that case, the result would be an elastic recovery of about 18 cm, that is 9 times that obtained with the model with initial loading stiffness. The figure common to both models is that the total load corresponding to the plastic displacements to be recovered is about (600-700 kN). Based on this analysis, it was found possible to estimate that the total forcing load for the 5 beams required in order to reach the target configuration would, at a conservative guess, be about 3500 kN.

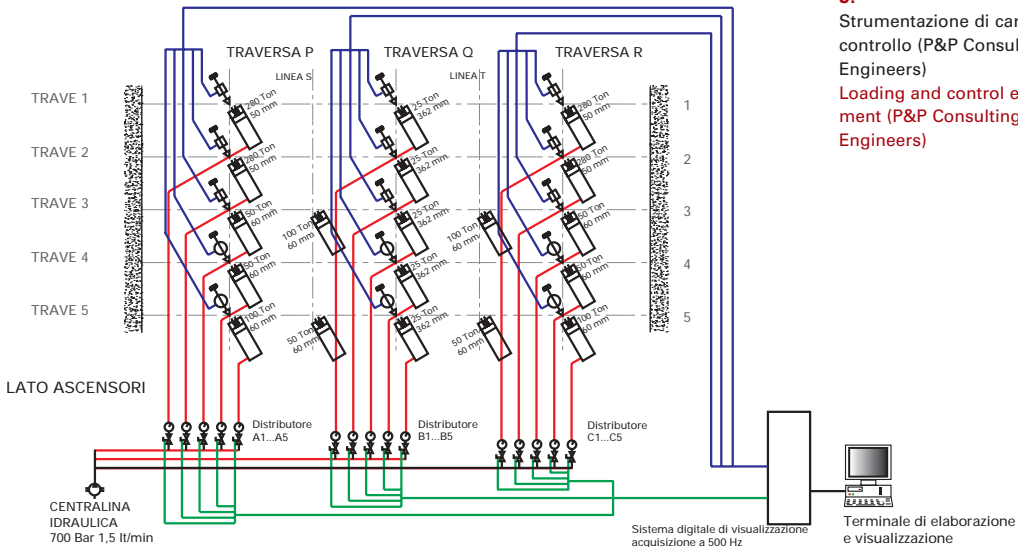
Likewise, again based on the same analyses, assuming an intermediate unloading gradient somewhere between the two already described, the vertical upward displacement (for the central sections) may be put at 10-12 cm, to be added to the initial permanent displacement in order to obtain the target configuration upon unloading the hydraulic jacks (about 3-4 cm permanent upward displacement). For the sections corresponding to the lateral girders, on the other hand, the estimate of the maximum plastic amplitude is about 1-2 cm.

Another model for researching the realignment phase was set up with reference to the spatiality of the structure, taking into consideration the boundary conditions due to the effect of the preliminary demolition work with the opening of the cracks along the floor perimeter. In this case, the numerical calculations, even when longer processing times are involved, make it possible to consider the interaction between the beams. The results obtained bear out the total forcing estimate.

Realignment Operating Procedure Forcing System and Pack Prop

As stated, the forcing was obtained by means of the application to each of the beams 1-2-3-4 and 5 of a force set to correspond to the transversal girders [Figure 4*], for a total, therefore, of three forces for each beam and thus 15 loading points altogether. To these points, during hoisting, 4 extra forcing points were applied to beams 3 and 5 [Figure 4*]. At all these points, checks were carried out in real time on the displacements as they were gradually recovered.

The security pack props were made adjustable to be able to follow the hoisting process step by step, as well as to make it possible to keep to the course followed by the hydraulic jacks, positioned in accordance with the layout in Figure 4 and connected to the feed and control system as shown in Figure 9.



9. Strumentazione di carico e di controllo (P&P Consulting Engineers)
Loading and control equipment (P&P Consulting Engineers)

LEGENDA SIMBOLI	
	CILINDRO A SEMPLICE EFFETTO
	VALVOLA DI INTERCETTAZIONE
	GRUPPO DI MISURA: MANOMETRO + CELLA DI PRESSIONE
	GRUPPO POMPA
	TRASDUTTORE DI SPOSTAMENTO CORSA 500 mm RISOLUZIONE 0,05 mm
	TRASDUTTORE DI SPOSTAMENTO CORSA 500 mm RISOLUZIONE 0,01 mm
	LINEA IDRAULICA DI ALIMENTAZIONE
	CABLAGGIO CELLE DI PRESSIONE
	CABLAGGIO TRASDUTTORI DI SPOSTAMENTO

di 500 Hz, i segnali elettrici dei vari sensori e di restituire in tempo reale l'andamento delle grandezze misurate. Inoltre, per il controllo delle deformazioni dei piani collaboranti per effetto della puntellazione, sono stati posizionati dei comparatori centesimali in corrispondenza della mezzeria delle travi 4 e 5 dell'impalcato del piano 24°, ed è stata eseguita una lettura ottica dello spostamento della sezione di mezzeria della trave 4 dell'impalcato del 23° e 22° piano.

Sequenza di carico ed effetti sulle strutture

La fase di sollevamento è durata circa 30 ore (tre giornate), durante le quali, con continuità, sono stati acquisiti i dati relativi agli spostamenti e alle intensità dei carichi applicati nei diversi punti, distinti per ciascuna trave, nonché l'andamento temporale dei carichi totali applicato alla struttura.

The estimate of the total forcing load of about 3500 kN, confirmed, incidentally, by the hoisting phase, involves an offset load for the deck beams located below (beams on the 25th, 24th, 23rd, and 22nd floors), activated by pack prop, of about $3500/4=875$ kN, that is, a distributed load of about $875/251 \text{ m}^2=3,5 \text{ kN/m}^2$, slightly higher than the service load ($3,00 \text{ kN/m}^2$).

Thus the pack prop system on another three lower floors made it possible to distribute the offset load of the hydraulic jacks over the four deck beams (on the 25th, 24th, 23rd, 22nd floors) in such a way as to give the load for each deck beam a value compatible with the service loads.

Equipment for Loading and Control Instruments

With regard to the characteristics of the equipment used for the hoisting, single-effect hydraulic jacks were used, supplied by a distributor from a single pumping-station.

The hydraulic circuit made it possible to disconnect all the hydraulic jacks with one or more exceptions, for which the pressure could be varied according to requirements [Figure 9'].

Since the stroke of the hydraulic jack pistons was

La durata così elevata della fase di sollevamento è sostanzialmente riconducibile al fatto che la tipologia dei martinetti disponibili era così diversa che l'apertura del circuito idraulico contemporaneamente avrebbe prodotto forze notevolmente diverse fra di loro. Tale limitazione ha determinato la necessità di procedere all'applicazione della forzatura procedendo trave per trave, dove era comunque garantita la possibilità di procedere con carico simmetrico (almeno i due martinetti posti sui traversi laterali erano di uguale tipologia e quindi potevano produrre contemporaneamente due forze uguali). Il processo di carico ha subito così una dilatazione temporale notevole. A favore c'è stato il fatto che procedendo per singola trave si è avuto modo di controllare degli step di carico molto contenuti con il risultato di una più efficace possibilità di guidare il processo stesso. Il programma di forzatura è stato impostato in modo da procedere con l'applicazione della forzatura a partire dalle travi più deformate (travi 5, 4 e 3) per poi procedere, sempre forzando trave per trave, con step che permettessero di procedere con recuperi delle frecce tali da limitare al massimo l'impegno dei traversi. Nelle Figure 11 e 12 sono riportati, rispettivamente, un esempio di monitoraggio dei valori dei carichi e un esempio di monitoraggio degli spostamenti recuperati per la trave 4 in alcuni step significativi della fase di riallineamento.

In particolare, nella Figura 12, sono riportate le deformate corrispondenti alla massima deformata raggiunta, la quale è confrontata sia con la deformata iniziale che con quella obiettivo.

Nella Figura 13 sono evidenti le plasticizzazioni (cerniera plastica) delle barre patite per effetto dell'incidente ed evidenziatesi in fase di riallineamento. Tale circostanza ha reso necessario, per le travi 4 e 5, procedere al taglio di tali gomiti e successiva saldatura di spezzoni di barre $\varnothing 26$ per ricostruire la continuità delle barre e quindi della sezione di calcestruzzo. Durante tali fasi la struttura è stata congelata nella configurazione obiettivo mediante i puntelli regolabili ai quali, per effetto degli indebolimenti dovuti alle demolizioni e al taglio delle armature, è stato trasferito la quasi totalità del peso proprio delle strutture. Era quindi plausibile attendersi che alla rimozione dei puntelli, intervenisse il peso proprio della struttura, che anche se applicato alla struttura risanata è tale da produrre degli spostamenti in mezz'ora dell'ordine dei 2 cm. A ciò si aggiunge che sulla struttura dovevano ancora agire

10.

Martinetti e puntelli regolabili
Idraulic jack and adjustable
pack-prop



not sufficient to cover the entire displacement to be recovered, it was necessary to retrace the course followed by the jacks by inserting metal spacers [Figure 10*].

In the process of resuming the course followed by the pistons, the load supplied by the jacks was replaced by setting in motion adjustable props.

In general, however, as the hoisting process proceeded, the props were adjusted in such a way as to bring them into contact with the structure.

The instrumentation for controlling the displacements and the forces applied to the structure consisted of displacement transducers positioned on the upper level (corresponding to the loading points), connected to a digital data acquisition system capable of acquiring, with a 500 Hz sampling frequency, the electric signals of the various sensors and of picking up the rhythm of the magnitudes measured in real time. In addition, in order to control the deformations of the levels working together due to the effect of the pack propping, centesimal comparators were positioned at the centre of beams 4 and 5 of the 24th floor, and an optical reading was taken of the displacement of the central section of beam 4 of the 23rd and 22nd floors.

Loading Sequence and Effects on Structures

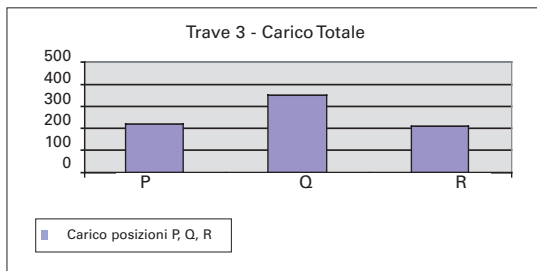
The hoisting phase lasted about 30 hours (three days), during which, continuous, data were acquired regarding displacements and the applied load intensities at the various points for each beam separately, as well as the timing of the total loads applied to the structure.

Such a long duration of the hoisting phase was

11.

Esempio di monitoraggio delle forze applicate

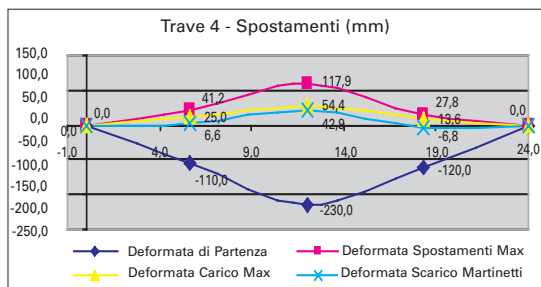
Monitoring of applied load steps values



12.

Esempio di spostamenti recuperati con la fase di sollevamento

Recovered displacements with the realignment phase



ai carichi permanenti del massetto. Tutto ciò considerato si comprende che una configurazione con una leggera monta verso l'alto poteva essere ritenuta soddisfacente l'obiettivo che il progetto si è posto per la fase di riallineamento.

Conclusioni

Il presente lavoro ha illustrato i problemi e le tecniche operative per il riallineamento delle travi del solaio del 26° piano dell'edificio Pirelli. In particolare sono stati affrontati i seguenti punti:

- la stima, mediante modelli numerici in regime non lineare, delle forze massime da applicare

mainly to be attributed to the fact that the types of jack available were so different from each other that opening the hydraulic circuit at the same time would have produced widely differing forces.

This limitation led to the need to apply the forcing technique beam by beam while making sure it would be possible to proceed with a symmetrical load that is, at least two jacks arranged on the lateral girders would have to be of the same type and therefore produce equal forces at the same time. The loading process was thus greatly prolonged.

On the plus side was the fact that by operating beam by beam it was possible to keep a check on strictly limited loading steps, thus achieving more effective control of the process itself. The forcing program was accordingly set up in such a way as to apply the forcing starting with the more deformed beams (beams 5, 4 and 3) and then to proceed, again with beam-by-beam forcing, in steps that made it possible to recover displacements, at the same time limiting as far as possible the strain on the girders.

In Figures 11 and 12, respectively, we find examples of the monitoring of load values and of the displacements, recovered for beam 4 in a few steps that were significant for the realignment phase. In particular, in Figure 12, we see the deflection configurations corresponding to the maximum deflection achieved, which is compared both with the initial one and with the target configuration. Figure 13 shows the plasticization (plastic hinge) of the bars damaged by the accident that was in evidence during the realignment phase.

This circumstance made it necessary, for beams 4 and 5, to cut elbow pieces and subsequently to weld bar sections 26 cm in diameter to restore the continuity of the bars and therefore of the r.c. sections. During these stages, the structure was locked within the target configuration by means of adjustable props to which, due to the weakening effect of the demolitions and the cutting of the falsework, almost the whole weight of the structures was transferred. It was therefore only to be expected that, when the props were removed, the structure's own weight would come into play, which, even if applied to the repaired structure, is such as to produce displacements of approximately 2 cm in the centre. To this must be added the fact that the concrete layers under the floor also weighed on the structure. Taking all this into consideration, it is easy to understand how a configuration with a

all'impalcato;

- la stima mediante modelli numerici in regime non lineare degli spostamenti totali verso l'alto necessari affinché allo scarico la struttura raggiungesse la configurazione obiettivo;
- il controllo e gestione in tempo reale dell'evoluzione degli spostamenti in relazione ai carichi di forzatura applicati.

La soluzione tecnica di quest'ultimo aspetto ha trovato nella P & P Consulting Engineers - ISMES - LMC un esperto e indispensabile supporto per la messa in pratica del sollevamento dell'impalcato nei tempi ristretti (prima settimana di Agosto 2003) che la committenza aveva richiesto.

Si ringrazia l'Ingegnere Alfonsina di Fusco per il contributo allo sviluppo dei modelli numerici in campo non lineare.

13.

Danneggiamenti emersi nella fase di riallineamento sezioni di mezzeria (travi 4 e 5)

Middle sections damages showed after realignment phase (beams 4 and 5)



slight upward gradient came to be considered a desirable objective for the project during the realignment phase.

Conclusions

This article has described the problems and operating techniques involved in realigning the beams on the 26th floor of the Pirelli skyscraper.

The following specific points have been considered:

- An estimate, using numerical models in non-linear analysis, of the maximum forces to be applied to the deck beams;
 - An estimate, using numerical models in non-linear analysis, of the total upward displacements required for the structure, when being unloaded, to reach the target configuration;
 - Control and management in real time of the displacements in relation to the forcing loads applied. The technical solution for the latter aspect was accomplished thanks to expert and indispensable assistance from P & P Consulting Engineers - ISMES-LMC, especially when it came to hoisting the deck beams in accordance with the strict time-schedule (deadline: first week in August 2003), requested by the client.
- Our thanks go to the Engineer, Alfonsina di Fusco, for her contribution to the development of the numerical models for the non-linear analysis.

BIBLIOGRAFIA / BIBLIOGRAPHY

[1]

A. Migliacci, M. Acito - La Vicenda del grattacielo Pirelli - il restauro, Mancosu Editore Roma, 2003

[2]

A. Migliacci, M. Acito, A. Franchi- Il progetto di risanamento delle strutture del grattacielo Pirelli. del grattacielo Pirelli -Studies and Researches V. 24, Italcementi S.p.A., Bergamo - 2004

[3]

M. Acito, A. Migliacci - Il progetto di risanamento strutturale dell'impalcato del 26° piano del grattacielo Pirelli - Congresso AICAP - VERONA 2004

[4]

Park R., et Altri (1992), Ductility of Square Confined Concrete Columns, Journal of the Structural Division, ASCE Vol.108 n°ST4. April 1982, pp.929-950

[5]

Takeda T., et Altri, Response concrete response to simulated earthquakes Journal of structural division, ASCE, Vol. 96, No. ST12, December