cobiax®

Tratto da:/Tiré à part : Betonwerk + Fertigteil-Technik, 10/2005, pages 50–59



Piastre biassiali alleggerite, teoria e test

Plancher en béton allégé bi-axial – théorie et tests

Martina Schnellenbach-Held, Markus Aldejohann



Fig. 1. Alleggerimenti dopo la posa Image 1. Plancher allégé bi-axial en chantier

> Il principale vantaggio delle piastre biassiali alleggerite, paragonate alle piastre biassiali massicce (o alle piastre alleggerite portanti in una sola direzione), è il significativo risparmio di peso proprio. Allo stesso tempo, le piastre biassiali alleggerite offrono sia la stessa capacità delle piastre massicce di sopportare carichi elevati sia la stessa flessibilità dei pannelli prefabbricati. A differenza delle classiche piastre alleggerite con portata monodirezionale, nelle piastre alleggerite bidirezionali il carico viene ripartito in ogni direzione.

> Tutto ciò risulta significativo nel momento della scelta e configurazione dello schema statico della struttura. Un sistema a piastra di questo tipo permette la realizzazione di strutture portanti più snelle e di campate più ampie. Il principio su cui si basa la progettazione delle piastre alleggerite con elementi sferici è la produzione industriale di gabbie, realizzate con rete elettrosaldata, all'interno della quale si inseriscono sfere cave in polietilene ad alta densità. Con queste gabbie si producono dei moduli che vengono collegati all'armatura flessionale positiva del solaio. L'armatura può essere o posizionata in cantiere o saldata al modulo stesso in sede di produzione. Infine, l'armatura negativa a flessione si lega alla parte superiore dei moduli posizionati sui casseri. In questo modo, le sfere cave vanno a sostituirsi al calcestruzzo in una zona del solaio in cui il calcestruzzo non esplica funzione di tipo strutturale.

Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held; 1982 Diplom und 1991 Dissertation an der Ruhr-Universität Bochum; 05/92 bis 07/97 Philipp Holzmann AG Düsseldorf; 08/97 bis 04/04 Universitätsprofessorin am Institut für Massivbau der TU Darmstadt; seit 04/04 Universitätsprofessorin am Institut für Massivbau der Universität Duisburg-Essen

Plancher en béton allégé bi-axial – théorie et tests

L'avantage principal des dalles allégées bi-axiales comparées aux dalles pleines est le gain significatif en économie de poids. De plus, elles peuvent supporter de très grosses charges et offrent une grande adaptabilité dans l'utilisation. Contrairement aux dalles allégées conventionnelles avec transfert de poids à direction unique (dalles alvéolaires), les dalles allégées bi-axiales permettent le transfert de charge dans toutes les directions.

Ceci induit un bénéfice significatif en termes de choix et configuration d'élément structurel de support. Ce type de système de dalle permet des structures de support plus fine et une plus grande portée. Leur concept technique repose sur des corps sphériques creux produits industriellement à partir de plastiques combinés avec des cages de positionnement linéaires. Celles-ci sont placés sur les barres d'armature inférieure soit lors de la préfabrication en usine ou sur site (solution de béton pure in-situ) ou directement sur des pré-dalles finies. Les barres d'armature supérieures sont ensuite placées directement sur les cages modulaires de positionnement. Le corps creux se com-

Dipl.-Ing. Markus Aldejohann; 2001 Diplom an der RWTH Aachen; 11/97 bis 04/98 Auslandspraktikum, Bauer Spezialtiefbau, Philippinen; 06/01 bis 08/02 Technisches Büro der Philipp Holzmann AG; 09/02 bis 03/04 wiss. Mitarbeiter am Institut für Massivbau der TU Darmstadt; seit 04/04 wiss. Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Universität Duisburg-Essen



Negli ultimi anni, gli autori hanno realizzato un'ampia gamma di studi sul comportamento strutturale delle piastre biassiali alleggerite: i parametri studiati riguardano il comportamento flessionale, a taglio ed il punzonamento. Inoltre, si sono esaminati più dettagliatamente l'ancoraggio delle barre di armatura nelle vicinanze delle sfere e la resistenza al punzonamento del solaio in presenza di un carico concentrato. Si è verificata l'applicabilità della normativa europea agli stati limite DIN 1045-1 ed i risultati ottenuti hanno confermato la possibilità di utilizzare il solaio alleggerito con successo.

Flessione

Comportamento flessionale

La resistenza flessionale delle piastre alleggerite a portata bidirezionale è stata determinata sperimentalmente. Negli esperimenti si sono studiati solai di diverso spessore e, quindi, alleggerimenti (sfere) di vario diametro.

Il comportamento strutturale ed il carico di collasso delle piastre alleggerite, determinati attraverso questi test, differiscono di poco da quelli di una piastra massiccia con caratteristiche simili. In ogni caso, il calcolo strutturale per questo tipo di solaio deve includere la verifica della posizione dell'asse neutro della sezione. Infatti, l'asse neutro non deve ricadere all'interno della zona di solaio occupata dalle sfere e, nel caso in cui questo avvenga, si rende necessario considerare nel calcolo allo stato limite ultimo una sezione equivalente di solaio. Abbiamo realizzato dei grafici che fungano da aiuto per il dimensionamento del solaio alleggerito, coerenti con il dimensionamento di una piastra massiccia. Ad esempio, nella Fig. 2 viene rappresentato un diagramma, calcolato secondo la normativa europea agli stati limite DIN 1045-1, che descrive il dominio di validità per diversi gradi di sollecitazione flessionale, in relazione alle diverse posizioni dell'armatura a flessione e al diametro delle sfere.

Freccia di inflessione

La freccia di inflessione del solaio alleggerito è stata esaminata con studi teorici e attraverso dei test. Si è giunti alla conclusione che, con identico carico totale (peso proprio + sovraccarico variabile), la freccia di inflessione della piastra alleggerita è approssimativamente il 15% maggiore di quella di una piastra massiccia.

In ogni caso, per effetto della significativa riduzione di peso proprio della piastra alleggerita rispetto ad una massiccia, le prove di laboratorio e le analisi agli elementi finiti effettuate, hanno dimostrato che, sotto le medesime condizioni di carico, la freccia di inflessione del solaio alleggerito è minore di quella del solaio massiccio. Per valutare il campo di applicabilità del solaio alleggerito nei confronti di un solaio massiccio, si fa riferimento alla **Fig. 3** : la curva più in basso rappresenta il rapporto tra il peso totale del solaio alleggerito e quello del solaio massiccio, quella sopra il rapporto tra le frecce.

Come evidenziato nella figura, fino ad un valore di 1.5 del rapporto tra il sovraccarico ed il peso proprio massiccio, il solaio alleggerito mostra frecce di inflessione minori rispetto quelle di un solaio massiccio di pari spessore.

In effetti, nelle costruzioni di tipo standard, il rapporto tra il sovraccarico ed il peso proprio è generalmente inferiore a 1.5. In pratica questo significa che la freccia di inflessione totale del nostro solaio è usualmente minore di quella di un solaio massiccio con medesime caratteristiche.

Resistenza al punzonamento

Gli studi iniziali sulla resistenza al punzonamento sono stati effettuati considerando il caso peggiore, cioè posizionando gli alleggerimenti sferici fino al perimetro dell'elemento che supporta il solaio (pilastro). Sono stati effettuati una serie di sei test al punzonamento su due piastre di spessore differente, realizzate utilizzando sfere di diametro pari a 18 cm e 36 cm. Con



Fig. 2. Grafico per il dimensionamento [1] Image 2. Diagramme de dimensionnement général [1]

porte comme un corps de refoulement avec pour but l'économie de matériel là où pour des raisons statiques il n'est pas nécessaire.

Au travers de ces dernières années, l'auteur a porté à bien et supervisé une large étendue d'études ([1], [2], [8], [11], [13]) sur le comportement structurel des dalles allégées bi-axiales. Les paramètres qui ont été étudiés incluent le comportement face à la flexion, au poinçonnement ainsi qu'à l'effort tranchant. Des cas précis, comme l'ancrage des barres d'armature ou le poinçonnement local dû aux points de concentration des charges ont également été examinés.

L'applicabilité de la norme DIN 1045 a été étudiée et des recommandations à la conception pratique ont été élaborées. Les résultats ont confirmé que la norme DIN 1045 peut effectivement être utilisée. Cependant, une application stricte de la norme DIN 1045, en particulier pour les calculs d'effort tranchant, négligerait les bénéfices du transfert de charge multidirectionnel et sous-estimerait de manière significative la capacité portante.

Flexion

Capacité portante

La résistance à la flexion des dalles allégées bi-axiales a été



Fig. 3. Confronto prestazionale allegerito/massiccio [8] Image 3. Champ d'application pour planchers allégés bi-axiales [8]



Fig. 4. Resistenza a punzonamento in funzione della progressiva rimozione delle sfere

Image 4. Courbe charge – déformation, élimination successive de sphères

queste sfere si sono realizzate due piastre rispettivamente di 24 e 45 cm.

Gli schemi di rottura evidenziati durante i test, hanno rivelato un comportamento della piastra alleggerita del tutto similare a quello di una piastra di tipo massiccio. Infatti, come per una piastra massiccia, nella piastra alleggerita, soggetta ad un carico concentrato elevato, si generano delle linee di rottura inclinate di 30°–45° rispetto al piano del solaio. Si è inoltre evidenziato che, rispetto al comportamento a punzonamento di una piastra massiccia, nel solaio alleggerito la frattura si sviluppa più velocemente perché la sezione, indebolita dalla presenza delle sfere, raggiunge prima la rottura delle « bielle compresse ». Per la piastra massiccia, invece, la rottura avviene solo quando si raggiunge la massima resistenza a compressione del calcestruzzo in corrispondenza dell'appoggio.

Basandosi sui valori medi del carico di rottura ottenuti attraverso questi test, si è evidenziato il fatto che il carico di rottura della piastra alleggerita è pari a circa il 50% di quello di una piastra massiccia con le medesime caratteristiche geometriche. Per determinare in modo più preciso il carico limite al punzonamento della nostra piastra, sono state realizzate, in aggiunta ai test, delle analisi non lineari agli elementi finiti. I risultati ottenuti sono stati confermati effettuando ulteriori test. Per le analisi successive si sono progressivamente eliminate parte delle sfere dalla zona in corrispondenza dell'appoggio. Come evidenziato nella **Fig. 4**, che mostra i risultati di queste analisi, persino dopo l'eliminazione di una sola striscia di sfere, si è avuto un incremento molto significativo della capacità portante della piastra.

Una volta eliminati tutti gli alleggerimenti dalla regione interes-



Fig. 5. Geometria Image 5. Géométrie, définitions

déterminée de manière expérimentale. La taille des sphères et l'épaisseur de la dalle ont été variées.

La capacité portante et la charge critique des dalles allégées déterminées par les tests diffèrent très légèrement comparé aux dalles pleines. Cependant, les calculs statiques pour ce type de dalle devraient inclure une vérification pour confirmer si la zone de compression due à la flexion est à l'intérieur de la région occupée par les sphères.

Des diagrammes pour le design général ont été préparés comme aide au dimensionnement pour les dalles allégées biaxiales en accordance avec le dimensionnement des dalles pleines. En guise d'illustration, **Im. 2** montre un diagramme sans dimension pour l'application d'après la norme DIN 1045-1. Pour des charges avec faibles moments les procédures de design conventionnelles peuvent être utilisées.

Déformation

Le comportement déformationnel des dalles allégées bi-axiales a été examiné aux travers d'études théoriques et de tests. Avec une charge totale identique (poids propre + charge imposée) la déformation des dalles allégées est approximativement 15% plus grande comparé aux dalles pleines.

Cependant, en raison du poids propre nettement inférieur des dalles allégées bi-axiale, avec des conditions aux bornes identiques ainsi qu'à charge effective égale, la déformation est plus faible que pour les dalles pleines, comme indiqué par les analyses des études de paramètre non linéaire pour les dalles allégées bi-axiales. Avec un ratio différent entre le poids imposé et le poids mort, ceci induit pour les dalles allégées une déformation moins grande que pour des dalles pleines comparable (voir **Im. 3**).

Pour un rapport entre poids imposé et poids propre d'environ 1.5 ou plus, les déformations des dalles allégées sont identiques ou plus grandes que celles des dalles pleines. Toutefois, dans la construction de bâtiment courante le rapport entre le poids imposé et le poids propre est généralement très inférieur à 1.5. En pratique, ceci implique que la déformation totale des dalles allégées bi-axiale est généralement inférieure à celle de dalles pleines comparables.

Poinçonnement

Des études préliminaires concernant le poinçonnement ont été basées sur le pire scénario, c'est-à-dire avec les corps creux placés aux extrémités du support. Un total de six tests de poinçonnement avec deux différentes dimensions de dalles ont été effectué en utilisant les plus petites et plus grandes tailles disponibles de sphères. Les dalles utilisées avaient une épaisseur de 24 cm et 45 cm respectivement.

Les modes de rupture révélés par ces tests étaient similaires à ceux obtenus lors de test sur des dalles pleines. Comme pour les dalles pleines, dans les dalles allégées bi-axiales sujettes à de grandes charges concentrées, une section conique se détache de la dalle avec un angle de 30° à 45°. Néanmoins, contrairement au processus de poinçonnement chez les dalles pleines, la fracture est déclenchée si les efforts de traction obliques ne peuvent plus être absorbés par la section transversale affaiblie par les corps creux. Pour les dalles pleines, ceci se produit seulement après défaillance des bielles de compression obliques près de la colonne (voir [7]).

Une analyse de base de données [6] permit d'obtenir une valeur moyenne pour la charge critique des dalles pleines d'après la norme DIN 1045-1. D'après la valeur obtenue, la charge critique pour les dalles allégées bi-axiales correspond à 50% de celle des dalles pleines en considérant les mêmes dimensions. Afin de déterminer la résistance au poinçonnement des dalles allégées bi-axiales, des calculs d'éléments finis non linéaires ont été entrepris en plus des tests. Les calculs ont été validés au travers de la vérification des tests. Pour les calculs postérieurs, les corps creux ont été successivement enlevés. Même après l'enlèvement d'une unique rangée de

sata dal punzonamento (corrispondente al perimetro ottenuto intersecando la superficie superiore della piastra con una linea che si sviluppa a 30° dal bordo dell'appoggio) si raggiunge la stessa resistenza al punzonamento di una piastra massiccia. Ne consegue la raccomandazione che, nei solai alleggeriti, vengano eliminate le sfere dalla regione interessata dal punzonamento. Eliminati gli alleggerimenti, si può effettuare un classico calcolo al punzonamento, come previsto per una piastra massiccia. Per le altre zone del solaio contenenti gli alleggerimenti, deve comunque essere effettuata una verifica della resistenza al taglio.

Resistenza al taglio

Considerazioni

In accordo con le principali normative europee, il calcolo della resistenza al taglio della sezione alleggerita di calcestruzzo dovrebbe essere effettuato considerando la minor larghezza disponibile di solaio pieno bw (Fig. 5). In effetti questa sezione, con larghezza così ridotta, coincidente approssimativamente al 10% della larghezza della sezione di una piastra massiccia, è presente solo localmente in quei punti del solaio alleggerito che si trovano in corrispondenza dell'asse di due sfere adiacenti. Se si ipotizza di spostarsi leggermente da questo punto, allora la larghezza disponibile per la resistenza al taglio aumenta fino a raggiungere quella di una soluzione massiccia.

In conclusione, per determinare con più precisione la resistenza al taglio della soluzione alleggerita, sono stati effettuati dei test specifici : i primi su piastre realizzate con sfere da 18 cm, i secondi su piastre realizzate con sfere da 36 cm. In ogni serie di test sono state esaminate 4 piastre con identica geometria, armatura e configurazione di carico.

Il primo test di ogni serie è stato realizzato su una piastra massiccia, in modo da poter poi confrontare i risultati ottenuti con quelli derivanti dai test sulle piastre di tipo alleggerito. Tutti i test sono stati realizzati su piastre prive di specifica armatura resistente a taglio. La **tabella 1** mostra il programma dei test realizzati.

Risultati dei test e analisi

In termini di fessurazione e di resistenza al taglio, il comportamento della piastra alleggerita è stato quasi identico a quello di una piastra massiccia sebbene, come ci si aspettava, con un carico di rottura più basso.

In tutti i test (piastra massiccia e alleggerita) la fessurazione per flessione ha inizio all'atto dell'applicazione del carico. Lo sviluppo della fessurazione è avvenuto, a partire dal punto di

Tabella 2. Risultati dei test la serie Table 2. Résultas d'essai série l					
	MD 450 V-1	CB 450-V1	CB 450-V2	CB 450-V3	
Freccia <i>Déformation</i> w _{max} [mm]	16.84	13.68	13.92	13.90	
V _{struttura} V _{structure} [kN]	16.86	16.86	16.86	16.86	
Carico di rottura Charge de fissuration V _{cr} [kN]	654	340	328	316	
Carico di rottura in % del MD Charge de fissuration en % of MD	100%	52%	50%	48%	
Carico di collasso V _u Charge de rupture V _u [kN]	654	367	359	416	
Carico di collasso in % del MD Charge de rupture en % de MD	100%	56%	55%	64%	

Definizione Définition	Descrizione Description
MDx-V1	Piastra massiccia senza corpi cavi Dalle pleine sans corps creux
CBx-V1	Piastr con corpi cavi, prodotta in un unico getto, h = 450 mm o 250 mm Dalle avec corps creux, produite dans une phase de fabrication, h = 450 mm resp. 250 mm
CBx-V2	Piastra con corpi cavi, prodotta in due fasi: 1.: Produzione dell'elemento prefabbricato 2.: Completamento della piastra dopo la posa dell'elemento semi-prefabbricato h = 450 mm o 250 mm Dalle avec corps creux, produite dans deux phases de fabrication, 1.: Production de la pré-dalle 2.: Finissage de la dalle après poser les composants pré-dalle h = 450 mm resp. 250 mm
CBx-V3	come CBx-V2 comme CBx-V2

sphère, la capacité portante a été nettement améliorée, les résultats sont indiqués en **Im. 4**.

Dès qu'aucune sphère n'est présente dans la zone de poinçonnement (ligne de connexion entre le coin de la colonne et la face supérieure de la dalle sous un angle de 30°), la capacité portante comparable à une dalle pleine est obtenue. Ainsi, la recommandation générale est d'enlever les corps creux de la zone de poinçonnement. Un calcul conventionnel de poinçonnement peut dès lors être entrepris pour la zone solide. Pour la zone adjacente contenant les sphères, l'effort tranchant dans les dalles allégées doit être vérifiée.

Effort tranchant

Intention

D'après la norme DIN 1045-1, les calculs d'effort tranchant des dalles allégées bi-axiales doivent être basés sur la plus petite largeur de réseau de section transversale b_w (voir Im. 5). Cependant, en termes de force de cisaillement ceci représente environ 10% de la largeur de la section transversale d'une dalle pleine dans le pire des cas (avec réduction maximum du poids), bien que cette petite largeur de section transversale soit seulement présente en un point, entre deux sphères. Même à de petites distances éloignées de ce point, la largeur de section transversale disponible augmente rapidement. C'est pourquoi des tests d'effort tranchant ont été conduit sous le

Disultati dai tast IIs

Table 3. Résultas d'essai série II					
	MD 250 V-1	CB 250-V1	CB 250-V2	CB 250-V3	
Freccia <i>Déformation</i> w _{max} [mm]	15.64	11.68	10.40	10.68	
V _{struttura} V _{structure} [kN]	6.47	6.47	6.47	6.47	
Carico di rottura Charge de fissuration V _{cr} [kN]	263	157	154	150	
Carico di rottura in % del MD Charge de fissuration en % of MD	100%	60%	60%	57%	
Carico di collasso V _u <i>Charge de rupture</i> V _u [kN]	350	210	192	198	
Carico di collasso in % del MD Charge de rupture en % de MD	100%	60%	55%	57%	





Fig. 6. Rottura per taglio, MD 450-V1 (sinistra), 450-V3 (destra) Image 6. Fissuration d'effort tranchant, MD 450-VI (à gauche), dalle allégé 450-V (à droite)

massima flessione e lungo una traiettoria leggermente inclinata rispetto il piano, ogni volta che il carico è stato incrementato.

Dai test si è rilevato che il carico di rottura al taglio della piastra alleggerita è pari ad un valore compreso tra il 55% e il 64% rispetto a quello di una piastra massiccia (**Tabella 2 e 3**). Questo valore è significativamente maggiore di quello che si può ricavare attraverso l'applicazione delle formule dedotte dalle DIN 1045-1 (approssimativamente +10%). In tutti i calcoli realizzati seguendo le DIN 1045-1 sono stati applicati i coefficienti più sfavorevoli per il calcolo della resistenza a taglio.

Le fessure dovute al taglio, nelle piastre realizzate con elementi semi-prefabbricati, si sono generate indipendentemente ed assolutamente non influenzate dalla presenza del secondo getto di completamento (Fig. 6). Si deduce che non si ha una riduzione della capacità portante nelle piastre che presentano elementi prefabbricati (Tabella 2 e 3). Le diverse forme di fessurazione comparse nei test effettuati sono mostrate nella Fig. 7 (la forma delle fessure è quasi identica in tutti i test). Inoltre, la fessurazione dovuta al taglio ha la forma di una curva, che si sviluppa tra il punto di applicazione del carico e l'appoqgio della piastra.

Una fessura orizzontale si è generata in corrispondenza dell'appoggio della piastra, come risultato della presenza delle forze di ancoraggio che si generano dove sono posizionate le armature longitudinali della piastra.

Nella **Fig. 8 e Fig. 9** sono riportate le curve che rappresentano la deformazione della piastra in funzione del carico applicato. Queste curve si riferiscono ai test realizzati sulla piastra MD250 ed ai tre test realizzati sulle piastre alleggerite CB250-V1, CB250-V2, CB250-V3.

Le diverse fasi della formazione delle fessure sono rappresentate nei diagrammi dalle curve A, B, C e D. Il punto A rappresenta la prima fase di carico, in cui si è raggiunta completamente la condizione di fessurazione per flessione (ma non per taglio) e dopo la quale si annulla il carico applicato. In corrispondenza contrôle de l'auteur afin de déterminer l'actuelle résistance au cisaillement des dalles allégées bi-axiales ([11, 12]).

Deux séries de tests ont été entrepris (diamètre de la plus petite sphère, d = 18 cm et diamètre de la plus grande, d = 36 cm). Dans chaque série de tests, quatre dalles de géométrie identiques ainsi que l'armature longitudinales et configuration de charge ont été examinés.

Le premier spécimen pour chaque série de test a été produit sans corps creux. Pour cette raison, les résultats du test pour les dalles pleines purent être utilisés pour une comparaison directe avec les résultats obtenus avec les dalles allégées. Tous les spécimens ont été produits sans armature d'effort tranchant. La charge critique fut déterminée à l'aide d'un montage expérimental comme pour un test de flexion appuyé en quatre points. Le déroulement du test est indiqué en (**Table 1**).

Résultats et analyses

En termes de formation de fissure et force de cisaillement, le comportement des dalles allégées bi-axiale fut quasi identique à celui des dalles pleines, bien que, comme attendu la charge de rupture fut inférieur.

Dans tous les tests (dalles pleines et allégées) des fissures de flexion ont commencé à se former quand la charge fut appliquée, elles se sont propagées à un léger angle vers le point de transfert de charge alors que la charge fut augmentée. Indépendamment à ce motif de fissure, une fissure courbée de cisaillement apparut soudainement dans l'un des deux champs de cisaillement quand la charge fut encore augmentée.

Avec de 55% à 64% de la charge de rupture d'une dalle pleine (**Table 2 et Table 3**), elle fut néanmoins nettement supérieur à celle prédite par la norme DIN 1045-1 (i.e. environ 10%). Dans tous les tests, les scénarios les moins favorables ont été utilisés pour tous les paramètres en relation avec la force de cisaillement.

Les fissures de cisaillement dans les dalles avec composantes préfabriquées (pré-dalle) se sont formées presque indépen-



Fig. 7. Schemi di rottura, serie I e II Image 7. Disposition des fissures, série I et série II



del punto B si è formata la prima fessura dovuta al taglio, in una delle due regioni della piastra interessate da questo tipo di sforzo. Il punto C identifica la formazione della fessura per taglio nella seconda regione interessata dallo sforzo tagliante e il punto D identifica lo stato finale di collasso della piastra.

Nei test CB250-V1 e CB250-V2 non si è formata la seconda fessura per taglio prima che fosse raggiunto il collasso della piastra.

Il comportamento a deformazione della piastra, in funzione dell'applicazione del carico, è all'incirca identico nei diversi test effettuati sulle piastre alleggerite. Le differenze che si sono evi-



Fig. 8. Deformazione sotto carico, MD250-V1 Image 8. Courbe de charge – déformation



Fig. 9. Deformazione sotto carico, da CB250-V1 a CB250-V3 Image 9. Courbe de charge – déformation, CB250-V1 à CB250-V3

denziate tra il test effettuato sul campione realizzato in opera (CB250-V1) ed i test effettuati sui campioni prodotti utilizzando in parte elementi prefabbricati (CB250-V2 e CB250-V3) sono insignificanti.

Il fattore che influenza maggiormente la riduzione di resistenza al taglio delle piastre alleggerite (senza specifica armatura a taglio) è la ridotta area di calcestruzzo disponibile nella sezione perpendicolare al piano di fessurazione, che non consente il passaggio delle tensioni. La sezione a 45° che attraversa una riga di sfere (Fig. 10) corrisponde approssimativamente al piano lungo il quale si genera la fessurazione per taglio. Sulla parte a destra della Fig. 10 è rappresentata l'area resistente effettiva della nostra piastra.

I rapporti tra le aree resistenti effettive dei due tipi di piastra (alleggerita e massiccia) sono mostrati nella **Tabella 4**. Si nota che questi rapporti corrispondono approssimativamente ai rapporti tra i carichi di collasso delle piastre alleggerite e i carichi di collasso delle piastre massicce ottenuti nei test.

Bisogna considerare il fatto che questa procedura ignora, ad esempio, l'influenza del comportamento reticolare spaziale che si genera nelle regioni occupate dalle sfere, come rappresentato chiaramente dal traliccio disegnato nella **Fig. 13**. Questo comportamento non può essere descritto solamente attraverso damment du joint (voir **Im. 6**). Aucune réduction en capacité portante n'a été observée en résultat de la préfabrication (voir **Table 2 et Table 3**). Les motifs de fissures pour tous les tests sont montrés en (**Im. 7**). La formation de fissures était quasi identique pour tous les tests. Dans tous les cas, la fissure de cisaillement induisant l'affaissement avait une forme courbée entre le point de transfert de charge et le support. Une fissure horizontale près du support s'est formée en conséquence de l'effet d'ancrage de l'armature longitudinal. Dans tous les tests, l'affaissement a été causé par constriction et disjonction des zones de compression.

Im. 8 et Im. 9 montrent des exemples de déformation pour les tests MD250 et pour les trois tests avec dalles allégées biaxiales CB250-V1 à CB250-V3.

Les différentes étapes de formation de fissures lors des tests sont indiqué sur les diagrammes au travers des points A à D. Le

Tabella 4. Rapporti tra le effettive aree resistenti Table 4. Relation des surfaces transversales effectives				
	A _{CB} [m ²]	A _{MD} [m ²]	A_{CB}/A_{MD}	
Série I	0.515	0.922	56%	
Série II	0.141	0.242	58%	



Fig. 10. Sezione A-A (sinistra), area resistente effettiva (destra) Image 10. Coupe A-A (à gauche), section transversale « effective » (à droite)



Fig. 11. Diagramma cicli forza/deformazione – confronto tra Test e Modelli FEM Image 11. Courbe de charge – déformation essai vs. calcul élément finis (série I + II)



Fig. 12. Analisi a rottura – confronto tra Test e Modelli FEM, CB250 Image 12. Fissuration et mécanisme, calcul élément finis, CB250

i test : il calcolo non lineare agli elementi finiti risulta molto utile per la spiegazione di questo tipo di comportamento. Per verificare il comportamento strutturale evidenziato dai test è stato effettuato un calcolo non lineare agli elementi finiti (**Fig. 12**).

In **Fig. 12** si mostra il confronto tra il piano di frattura comparso nei test e quello che è stato ricavato mediante l'utilizzo del calcolo agli elementi finiti. Il calcolo agli elementi finiti ha inizialmente evidenziato la formazione delle fessure per flessione, ruotate, nelle regioni con elevate sollecitazioni taglianti, nella direzione del punto di applicazione del carico. Successivamente, un ulteriore incremento del carico ha portato alla formazione di una fessura a taglio critica, che si è sviluppata nella direzione del punto di applicazione del carico.

Il collasso è stato segnalato dalla fessurazione per taglio, generata nella zona compressa della sezione. Il carico di collasso è stato raggiunto attraverso la rottura del calcestruzzo nella zona compressa. Ne consegue che i calcoli agli elementi finiti confermano il comportamento strutturale e i carichi di collasso determinati nei test.

La **Fig. 13** mostra, in pianta e in sezione, il modello a struttura reticolare usato per descrivere il puntone curvo compresso che si genera sopra la fessura, dovuta al taglio, immediatamente prima del collasso.

Il puntone inclinato, formato in corrispondenza delle sfere, genera delle sollecitazioni « trasversali » sulle regioni di bordo della piastra. All'interno della piastra stessa, queste forze « laterali » si annullano vicendevolmente.

Anche i calcoli agli elementi finiti hanno evidenziato la formazione di sollecitazioni « trasversali » nella regione occupata dalle sfere, dovute all'inevitabile deviazione del puntone compresso, imposta dalla presenza degli alleggerimenti. In queste condizioni, le sollecitazioni « trasversali » raggiungono, comunque, valori che sono significativamente inferiori alla resi-



Fig. 13. Sistema reticolare spaziale *Image 13. Treillis*

point A décris le premier relâchement de charge à un stade où un motif complet de fissure de traction était présent (mais pas de fissure de cisaillement).

Au point B la première fissure de cisaillement a été formée dans l'une des deux régions d'effort tranchant. Le point C identifie la formation de fissure de cisaillement dans la seconde région et le point D indique le dernier état d'affaissement. Dans les tests CB 250-V1 et CB 250-V2 la deuxième fissure de cisaillement ne s'est pas formée au moment de l'affaissement. Le comportement déformationnel est quasi identique dans tous les tests avec dalles allégées. Les différences observées entre le spécimen produit avec du béton in-situ (CB250-V1) et le spécimen produit à partir d'une pré-dalle combinée avec du béton in-situ (CB250-V2 et CB250-V3) sont toutes négligeables.

Le facteur crucial pour la résistance à l'effort tranchant réduit des dalles allégées bi-axiales sans armature d'effort tranchant est la surface réduite pour le transfert des contraintes de traction dans la section perpendiculaire à la fissure d'affaissement. La section à 45° à travers d'une rangée de sphère montrée en (**Im. 10**) correspond approximativement au motif de fissures de cisaillement et la direction principale de la force de tension vers l'axe central dans l'état I. (**Im. 10**) sur la droite montre la zone transversale à cette section.

Les rapports de surface de section transversale sont indiqués en (Table 4). Les surfaces respectives correspondent approxima-



stenza a compressione del calcestruzzo, cosicché non ha luogo la formazione delle fessure e il conseguente indebolimento dei puntoni compressi. I risultati dei test confermano queste osservazioni, infatti nella piastra non si è riscontrata la formazione di fessure in direzione longitudinale.

Considerazioni finali

Negli ultimi anni, gli autori hanno effettuato numerosi studi riguardanti il comportamento strutturale delle piastre alleggerite.

I test riguardanti la flessione hanno confermato il fatto che, per carichi di tipo « convenzionale », si possono applicare, anche per il calcolo a flessione delle piastre alleggerite, le metodologie di calcolo usate per le sezioni resistenti massicce. In parallelo si sono sviluppati dei supporti di ausilio alla progettazione per tipologie di carichi « non convenzionali ».

Si è inoltre evidenziato che, con gli stessi carichi imposti (peso proprio + sovraccarico variabile), la freccia di inflessione della piastra alleggerita è in genere inferiore a quella di una piastra massiccia. Per valori del rapporto tra sovraccarico variabile e peso proprio massiccio superiori a 1.5, le frecce di inflessione del solaio alleggerito sono superiori a quelle di un solaio massiccio.

Nel caso peggiore, la resistenza al taglio della piastra alleggerita è pari al 50% della capacità di una piastra massiccia con caratteristiche comparabili. Rimuovendo però gli alleggerimenti (sfere) dalle regioni significative dal punto di vista della resistenza al taglio (intorno dei pilastri e dei setti), la stessa può essere incrementata, fino a raggiungere quella di un solaio massiccio.

Per determinare con precisione la resistenza al taglio della piastra alleggerita, sono stati effettuati dei test specifici. Anche da questi test si è dedotto che la resistenza al taglio della piastra alleggerita, nel peggiore dei casi, è pari a circa il 55% di quella di una piastra massiccia: questo valore è significativamente superiore a quello ricavato dai calcoli conformi alle normative (effettuando i calcoli in accordo alle normative DIN 1045 si trova un valore pari a -10% di quello ricavato nei test).

I calcoli realizzati con il programma agli elementi finiti hanno confermato sia il comportamento strutturale sia la resistenza al taglio evidenziati nei test.

REFERENCE

RÉFÉRENCES

 Pfeffer, K.: Untersuchungen zum Biege- und Durchstanztragverhalten von zweiachsigen Hohlkörperdecken, Dissertation, TU Darmstadt, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 4, Nr. 178, VDI Verlag Düsseldorf, 2002

[2] Schnellenbach-Held, M.; Denk, H.; Ehmann, S.; Pfeffer, K.: Untersuchung an Cobiax-Modulen. Unveröffentlichte Untersuchungsberichte, Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 1998–2000

[3] DIN 1045: Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung. Ausgabe Juli 1988

[4] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Juli 2001 [5] DIN V ENV 1992-2: Eurocode 2, Planung von Stahlbeton- und

[5] DIN V ENV 1992-2: Eurocode 2, Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1–1, Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau. Juni 1992

[6] Hegger, J.; Beutel, R.: Durchstanzen – Versuche und Bemessung. Der Prüfingenieur, Oktober 1999, S. 16–33

[7] Kordina, K.; Nölting, D.: Tragfähigkeit durchstanzgefährdeter Stahlbetonplatten. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 371, Ernst & Sohn, Berlin 1986

 [8] Schnellenbach-Held, M.; Pfeffer, K.: Tragverhalten zweiachsiger Hohlkörperdecken. Beton- und Stahlbetonbau, Sept. 2001, S.573–578
 [9] Kani, G.N.J.: Basic Facts Concerning Shear Failure. ACI-Journal, Vol. 63, No. 6, pp. 675–692, 1966

 [10] Reinhardt, H.-W.: Maßstabseinfluss bei Schubversuchen im Licht der Bruchmechanik, Beton- und Stahlbetonbau, S. 19–21, 1981
 [11] Aldejohann, M.; Schnellenbach-Held, M.: Investigations on the

Shear Capacity of Biaxial Hollow Slabs – Test Results and Evaluation –, Shear Capacity of Biaxial Hollow Slabs – Test Results and Evaluation –, Sh International PhD-Symposium in Civil Engineering, Delft, 2004 [12] Schnellenbach-Held, M.; Aldejohann, M.: Precast Biaxial Hollow

[12] Schnellenbach-Held, M.; Aldejohann, M.: Precast Biaxial Hollow Slabs – What about the shear capacity?, International BIBM congress on precast concrete elements, Amsterdam, 2005 tivement au rapport de charge entre les dalles allégées et pleines obtenus dans les tests. Cette procédure ignore, par exemple, l'influence du comportement structurel tridimensionnel de la région occupé par les sphères, comme représenté par un treillis en 3D dans (Im. 13). Ce type d'influence ne peut pas être décrit uniquement au travers des tests. Les calculs d'éléments finis non linéaires sont parfaitement adaptés pour ce but. Le comportement structurel des tests était vérifié par des calculs en élément finis en 3D (voir Im. 12).

La (Im. 12) montre une comparaison du motif de fissure du test est celui déterminé par les calculs d'élément fini. Ces calculs ont indiqué la formation initiale de fissure de flexion, en rotation dans les régions de cisaillement vers le point de transfert de charge. Une augmentation additionnelle de la charge induit la formation de fissure de cisaillement critique qui se propagea vers le point de transfert de charge.

L'affaissement a été signalé par la fissure de cisaillement se développant vers la zone de compression. La charge critique fut atteinte à travers la disjonction de la zone de compression. Les calculs d'éléments finis ont ainsi confirmé le comportement structurel et les charges critiques déterminées dans les tests.

La (**Im. 13**) montre un modèle d'un treillis en trois dimensions vu de dessus et de coté pour la description de la bielle de compression courbé au-dessus de la fissure de cisaillement juste avant la rupture.

La bielle de compression inclinée formée autour des sphères induit une tension transverse dans les bords de la dalle. A l'intérieur de la dalle les composants des forces s'annulent.

Les calculs d'éléments finis ont également indiqué la formation de traction transversale à travers du treillis imaginé due à la déformation des bielles de compression dans la région occupée par les sphères. Sous ces conditions, les tractions transversales ont atteint des valeurs qui étaient nettement inférieures de la résistance à la traction du béton disponible, ainsi aucune fissure et affaiblissement des bielles de compression n'ont eut lieu. Comme la formation d'aucune fissure parallèle à la direction longitudinale de la dalle n'a été observée, les résultats des tests ont confirmé ces observations. L'influence de la sollicitation transversale provenant de force de cisaillement plus importante et par conséquence l'utilisation poussée des bielles de compression (pour des ratios a/d plus petits ou pour des composant avec armature de cisaillement) est en cours d'examen numérique.

Résumé

Au travers de ces dernières années, l'auteur a entrepris et supervisé de nombreuses études sur le comportement structurel des dalles allégées bi-axiales.

Des essais de flexion ont confirmé l'applicabilité des designs conventionnels pour les calculs de flexion pour ces dalles.

Avec charges imposées identiques, la déformation des dalles allégées bi-axiales est généralement inférieure à celle des dalles pleines. Pour un ratio entre charge imposé et poids-mort de plus de 1.5, les déformations des dalles allégées deviennent plus grandes.

Dans la pire des situations, la résistance au poinçonnement des dalles allégées bi-axiales est d'environ 50% celle d'une dalle pleine comparable. En enlevant des rangées de sphères dans les régions autour des colonnes, la capacité portante peut être fortement augmenté jusqu'à atteindre celle de dalles pleines. Des tests ont été conduits afin de déterminer la résistance à l'effort tranchant. La capacité portante obtenue fut d'environ 55% celle d'une dalle pleine comparable. Cette capacité est significativement plus grande que celle prédite par la norme DIN 1045-1 (10%).

Des calculs d'éléments finis non linéaires ont confirmé le comportement structurel dans les tests ainsi que la résistance à l'effort tranchant atteint.

Zollverein School of Management and Design, Essen, Germania/Allemagne, 2005–2006



© SANAA

La spettacolare architettura di SANAA (Giappone) – nella ex miniera di carbone Zollverein ad Essen, sito protetto dall'UNESCO – ha portato alla realizzazione di un prominente cubo in calcestruzzo, con 5 livelli di differente altezza al suo interno. Le luci tra i pilastri raggiungono i 17 metri ed i solai sono attrezzati per il riscaldamento degli ambienti. Una costruzione possente e contemporaneamente armoniosa, con più di 150 finestre che generano, sia dall'interno che dall'esterno, una sensazione di trasparenza.

Big5 – benefici apportati al progetto:

- Luci superiori a 17 metri senza travi
 Peso del solaio a piastra ridotto del 30%
- Velocità di costruzione
- Struttura molto snella
- Solaio attrezzato

L'architecture spectaculaire de SANAA, Japon sur le site d'héritage mondial culturel de l'UNESCO « Zollverein » à Essen a débouché sur un cube de béton avec 5 étages et différentes hauteurs d'étages et une portée de 17m avec des dalles contenant des éléments d'activation thermique. Une construction puissante et sobre avec plus de 150 fenêtres qui génère une transparence autant extérieure qu'intérieur.

Les bénéfices Big5 du projet :

- Portée jusqu'à 17 m sans sommiers
- Réduction de la masse des dalles jusqu'à 30%
- Rapidité de construction
- Structure très fine
- Activation thermique simple des dalles

Novartis Campus WSJ-158, Basilea/Bâle, Svizzera/Suisse, 2005-2006



© SANAA

L'edificio si sviluppa su sei piani, con circa 280 posti di lavoro e superfici ampie. I volumi sono flessibili e le destinazioni d'uso possono essere facilmente ed economicamente cambiate.

Big5 – benefici apportati al progetto:

- Comportamento antisismico ottimizzato
 Riduzione di peso
- Flessibilità resa possibile dalla versatilità dei solai

Un bâtiment de 6 étages avec environ 280 places du travail et de grandes surfaces. Les volumes sont supposé être flexible et devrait être modifié facilement et économiquement.

Les bénéfices Big5 du projet :

- Comportement optimisé lors de tremblement de terre
- Réduction de la masse
- La souplesse d'adaptation permet la construction de dalles complexes

Shopping-Mall Palladium, Praga/Prague, Rep. Ceca/République Tchèque, 2005–2007



© Palladium

Si tratta di un centro commerciale multi-funzionale, realizzato su una superficie di 115.500 mq all'interno del quale sono previsti negozi, uffici e ristoranti, compreso un parcheggio che è il più grande realizzato all'interno della città di Praga. Posizionato nel cuore commerciale della città, è considerato non solo il maggior punto di riferimento architettonico della città, ma anche un luogo vivibile e un punto di incontro.

Big5 – benefici apportati al progetto:

- Riduzione del peso
- Fondazioni speciali meno costose
- Struttura snella
- Maggior valore commerciale stimato

Le projet consiste dans le développement commercial multi-emploi, comportant environ 115.500 m² de magasins, bureaux, restaurants ainsi que le plus grand parking de la ville avec 900 places. Situé au cœur du quartier des affaires, le projet ne repose pas uniquement sur un concept architecturel mais également en la création d'un lieu de rencontre attractif et animé.

Les bénéfices Big5 du projet :

- Réduction du poids
- Fondation spéciales moins chères
- Structure fine
- Coûts d'exploitation optimisés

Torre St. Jakob/Tour St. Jakob, Basilea/Bâle, Svizzera/Suisse, 2006–2008





L'edificio, con i suoi 85 metri di altezza e con la sua maestosa facciata in vetro, diventerà il nuovo punto di riferimento nell'architettura di Basilea. La torre avrà circa 4.000 mq di superficie abitabile e 13.000 mq di superficie commerciale, che comprenderà grandi spazi per uffici oltre a negozi e ristoranti. La struttura dell'edificio è, inoltre, adeguata agli ultimi standard antisismici.

Big5 – benefici apportati al progetto:

- Riduzione del peso

- Comportamento antisismico ottimizzato
- Spessore dei solai ridotto
- Grandi luci
- Flessibilità resa possibile dalla versatilità dei solai

Ce bâtiment de 85 m de haut avec sa façade en verre deviendra le nouveau symbole de Bâle. La tour contiendra a plus de 30 appartements, 4000 m² d'espaces habités et 13 000 m² d'espaces commerciaux qui comprendront essentiellement des bureaux mais aussi des commerces et restaurants. Ce bâtiment de grande hauteur est en norme avec les derniers standards de sécurité en matière de tremblement de terre.

Les bénéfices Big5 du projet :

- Réduction du poids

- Comportement optimisé lors de tremblement de terre
- Portée/épaisseur des dalles
- La souplesse d'adaptation permet la construction de dalles de forme complexes

[©] Herzog & De Meuron

Rye Hill College, Newcastle, Gran Bretagna/Grande-Bretagne, 2005-2006



Il Newcastle College è tra i più grandi del Regno Unito, con più di 40.000 studenti e 1.000 tra insegnanti e personale. Le facoltà del turismo, viaggi, sport ed estetica sono ospitate in un edificio dedicato. All'interno, inoltre, è stato costruito un centro benessere aperto al pubblico ed un ristorante.

Big5 – benefici apportati al progetto:

- Velocità di costruzione
- Alta qualità delle superfici a vista del calcestruzzo
- Riduzione della quantità utilizzata di calcestruzzo
- Riduzione delle emissioni di CO₂

Le Newcastle Collège est l'une des plus grandes hautes écoles du Royaume-Uni avec plus de 40'000 étudiants et 1000 employés. Les facultés de Voyage, Tourisme, Sport et Beauté reçoivent leur propre bâtiment qui contient également un oasis de bien-être ouvert au public ainsi qu'un restaurant gastronomique.

Les bénéfices Big5 du projet :

- Rapidité de construction
- Finition de la surface de haute qualité avec des modules fabriqués en usine
- Réduction de la quantité de béton
- Emission de CO₂ diminuée

IPRONA, Lana (Bz), Italia/Italie, 2005-2006



Iprona è una azienda internazionale che opera nel settore del trattamento e della commercializzazione della frutta. Il successo dell'azienda ha permesso la costruzione di un nuovo edificio produttivo e amministrativo nel cuore delle montagne del Südtirol, una delle più incantevoli località della regione alpina e una delle maggiori aree produttive di frutta in Europa.

Big5 – benefici apportati al progetto: – Riduzione dei tempi di esecuzione del 30%

Iprona est une compagnie internationale dans la commercialisation et le marketing des fruits. Cette entreprise reçoit une nouvelle usine et un bâtiment administratif au cœur des montagnes sud-tyrolienne, une des régions alpines les plus belles ainsi qu'une des plus grande surface de culture de fruits en Europe.

Les bénéfices Big5 du projet :

- Réduction du temps de construction de 30%

Cobiax Group of Companies

Svizzera/Suisse Cobiax Technologies AG Postfach 140 Oberallmendstrasse 20A CH-6301 Zug Tel.: +41 41 767 00 00 Fax: +41 41 767 00 09 info@cobiax.com Germania/Allemagne Cobiax Technologies GmbH Heidelberger Strasse 6-8 D-64283 Darmstadt Tel.: +49 6151 91 816-00 Fax: +49 6151 91 816-22 info.germany@cobiax.com Italia/Italie Cobiax Technologies S.r.l. Via Julios Durst 6/B I-39042 Bressanone Tel.: +39 0472 83 04 04 Fax: +39 0472 20 74 26 info.italy@cobiax.com Austria/Autriche Cobiax Technologies GmbH Rotenturmstrasse 27/5 A-1010 Wien Tel.: +43 1 533 75 82 Fax: +43 1 533 26 03 info.austria@cobiax.com Gran Bretagna/Grande-Bretagne Cobiax Technologies Ltd. Studio 4 The Cooperage 91 Brick Lane GB-London E1 6QL Tel.: +44 20 7877 8575 Fax: +44 20 7375 2759 info.uk@cobiax.com