

Fischer Rista AG
Hauptstrasse 90
5734 Reinach AG

Dimensionnement du système d'armature contre le poinçonnement FIDECA® selon la norme SIA 262:2013

Muttoni & Fernández

Ingénieurs conseils SA

Aurelio Muttoni, Dr-ing. Professeur à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Miguel Fernández Ruiz, Dr-ing. UPM

Route du Bois 17
CH-1024 Ecublens
Tel. ++41 21 691 84 70

<http://mfic.ch/>

Rapport MFIC_10-A01-R2-F

7 décembre 2016

Table des matières

1.	Préface.....	1
2.	Introduction	1
3.	Description du système.....	2
4.	Bases utilisées	2
5.	Justification des nouveaux paramètres.....	3
	Poinçonnement à l'intérieur de la zone renforcée	3
	Valeur limite supérieure de la résistance au poinçonnement	4
6.	Dispositions constructives.....	4
7.	Méthode de dimensionnement et limites d'application.....	5
	Dimensionnement de l'armature transversale	5
	Dérogação pour des ruptures avec rotations faibles	7
	Valeur limite supérieure de la résistance au poinçonnement	7
	Vérification à l'extérieur de l'armature de poinçonnement.....	8
8.	Comparaison des essais avec le modèle de dimensionnement proposé	8
9.	Conclusions	9
	Annexe A.....	10

1. Préface

Le présent document étudie le comportement du système d'armatures contre le poinçonnement FIDECA® sur la base d'essais effectués en laboratoire. La validité de ce document reste par conséquent restreinte aux essais considérés (essais de poinçonnement axisymétrique, sous charge monotone de courte durée, effectués sur des échantillons avec bétons et aciers d'armature ordinaires).

Pour une utilisation des considérations de ce rapport dans des cas réels ainsi que pour son implémentation dans des logiciels, il faudra considérer tous les aspects et les particularités spécifiques.

2. Introduction

La norme SIA 262:2013 préconise au chiffre 4.3.6.5.7 des valeurs maximales de résistance valables pour des armatures de poinçonnement ordinaires. Au chiffre suivant, il est défini que ces valeurs « peuvent être augmentés pour une armature de poinçonnement particulièrement efficace, qui devra en général répondre à des dispositions constructives plus sévères que celles définies aux chiffres 5.5.3.7 à 5.5.3.12. Il est dans ce cas nécessaire de certifier par des essais qu'un niveau de sécurité comparable à celui du cas de dimensionnement des dalles sans armature de poinçonnement est atteint. »

Plusieurs séries d'essais sur des dalles renforcées au poinçonnement avec le système FIDECA® ont été effectuées dans des laboratoires de recherche reconnus. Ces séries ont permis d'étudier la résistance des dalles renforcées avec le système FIDECA® vis-à-vis des différents modes de rupture potentiels, ainsi que l'influence de divers paramètres : épaisseur et élancement de la dalle, taille de la surface d'appui, taux d'armature à la flexion etc. Les résultats montrent que des valeurs plus élevées que celles définies dans le chiffre 4.3.6.5.7 sont possibles. En outre, la performance de l'ancrage des armatures suivant le principe constructif des paniers FIDECA® a été vérifiée par des essais spécifiques [13]. Ces essais montrent une très bonne performance, même en cas de présence de fissures de flexion jusqu'une ouverture de 1 mm et sans devoir disposer des barres longitudinales dans la zone de pliage. Ce document décrit la détermination des paramètres de

dimensionnement selon le chiffre 4.3.6.5.8, définit les règles constructives correspondantes ainsi que propose une dérogation aux chiffres 4.3.6.5.2-4 pour les cas avec très faibles rotations ψ . Cette dérogation est justifiée par le chiffre 0.4.1 de la norme SIA 262:2013.

3. Description du système

FIDECA® est un système d'armatures contre le poinçonnement composé par une ou plusieurs cages d'étriers fermés, voir figure 1. Chaque cage est composée par un ensemble des barres façonnées de diamètre 10 ou 12 mm, espacées entre elles de 75, 100, 150 ou 200 mm. Les différents brins verticaux de chaque barre (voir figure 1a) ont aussi un espacement de 100, 150 ou 200 mm [2]. L'acier utilisé pour la confection des barres façonnées est nervuré de classe B500B avec une valeur caractéristique de la limite d'écoulement $f_{sk} = 500 \text{ N/mm}^2$.

Des barres de diamètre 6 mm sont également utilisées dans la confection de la cage, voir barres horizontales dans la figure 1. Ces barres assurent le correct espacement entre les barres façonnées, mais n'ont pas de rôle statique.

Plus de détails du système FIDECA® peuvent être trouvés dans la description du produit [3].

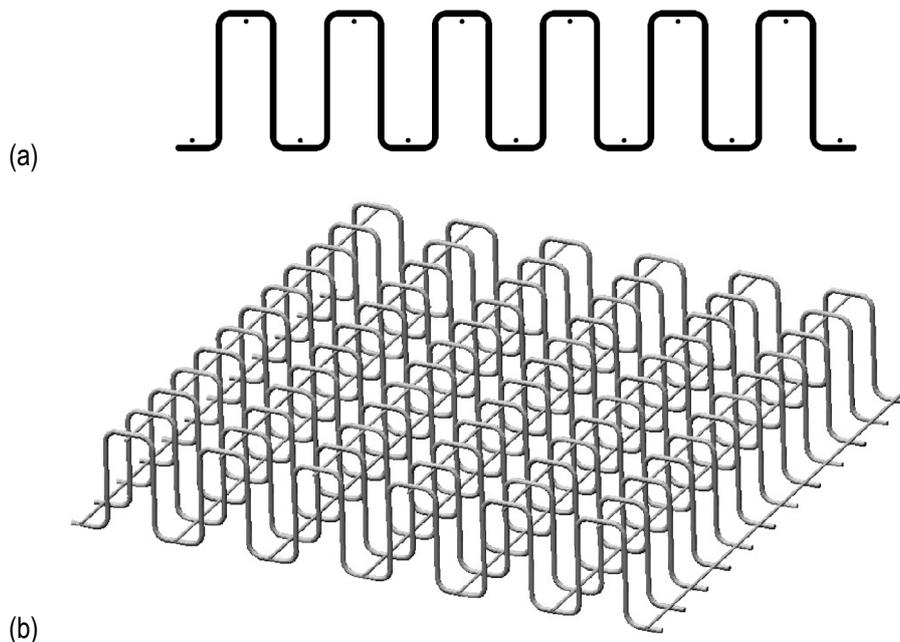


Figure 1: Système FIDECA® : (a) vue d'une barre façonnée; et (b) vue d'une cage assemblée

4. Bases utilisées

- [1] SIA 262, « Construction en béton », Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 2013, 102 p.
- [2] Fischer Rista AG, « FIDECA® Korbsortiment für Gutachten EPFL nach SIA 262:2013 », 18.10.2016, 3 p.
- [3] Fischer Rista AG, « FIDECA® Schubkörbe », 2010, 6 p.
- [4] Ladner, M., Hösslin, Th. v., « Untersuchungsbericht Durchstanzversuche an Flachdecken-ausschnitten », Auftrag Nr. 419, Hochschule Technik+Architektur Luzern, Horw, 1998, 38 p.

- [5] Ladner, M., Hösslin, Th. v., « Untersuchungsbericht Durchstanzversuche an Flachdecken-ausschnitten », Auftrag Nr. 419-1, Hochschule Technik+Architektur Luzern, Horw, 1999, 22 p.
- [6] Muttoni, A., Fernández Ruiz, M., Lips, S., « Durchstanzversuche an Deckenausschnitten mit FIDECA® Durchstanzbewehrung », École Polytechnique Fédérale de Lausanne, IBETON, Bericht EPFL_IBETON_09.21-R1, 25.2.2010, 55 pages
- [7] Lips S., Fernández Ruiz M., Muttoni A., « Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs », ACI Structural Journal, Vol. 109, USA, 2012, pp. 889-900.
- [8] Fernández Ruiz M., Muttoni A., Kunz J., « Strengthening of flat slabs against punching shear using post-installed shear reinforcement », ACI Structural Journal, V. 107 N° 4, USA, 2010, pp. 434-442
- [9] Fernández Ruiz, M., Muttoni, A., « Applications of the critical shear crack theory to punching of R/C slabs with transverse reinforcement », American Concrete Institute, Structural Journal, Vol. 106, No. 4, 2009, pp. 485-494
- [10] Muttoni, A., Fernández Ruiz, M., Burdet, O., « Poinçonnement des planchers-dalles: nouveaux acquis et applications pratiques », Polycopié de la journée d'études de 10.9.2008, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008, 102 p.
- [11] Einpaul J., Brantschen F., Fernández Ruiz M., Muttoni A., « Performance of Punching Shear Reinforcement under Gravity Loading: Influence of Type and Detailing », ACI Structural Journal, V. 113, Farmington Hills, USA, 2016, pp. 827-838
- [12] Simões, J. T., Faria, D.M.V., Fernández Ruiz, M., Muttoni, A., « Strength of reinforced concrete footings without transverse reinforcement according to limit analysis », Engineering Structures, Elsevier, Vol. 112, 2016, pp. 146-161
- [13] Brantschen F., Viúla Faria D., Fernández Ruiz M. and Muttoni A., « Bond Behaviour of Straight, Hooked, U-Shaped and Headed Bars in Cracked Concrete », Structural Concrete, in press.

5. Justification des nouveaux paramètres

L'entreprise Fischer Rista AG a fait effectuer 8 essais de poinçonnement sur des éléments de dalle renforcés avec le système FIDECA® ayant des dimensions raisonnables (épaisseurs entre 0.25 et 0.40 m, largeur des échantillons entre 3.00 et 3.30 m). Les essais ont été effectués par des instituts de recherche reconnus et les résultats sont documentés dans des rapports d'essais [4-6]. En outre, les résultats de cinq essais avec une géométrie identique, mais sans armature de poinçonnement sont disponibles dans la littérature scientifique.

Tous les essais considérés montrent que, pour le système FIDECA®, des valeurs de résistance maximale plus élevées que celles définies au chiffre 4.3.6.5.7 de la norme SIA 262:2013 sont justifiées. Afin de garantir l'applicabilité de ces valeurs, les règles constructives décrites dans le chapitre 6 doivent être respectées

Poinçonnement à l'intérieur de la zone renforcée

La SIA 262:2013 § 4.3.6.5.4 considère une armature de poinçonnement activable dans une surface comprise entre une distance égale à $0.35d_v$ et d_v du bord de la surface d'appui. La limite inférieure de cette distance peut toutefois être dérogée sur la base de la théorie de la fissure critique et tenant compte de l'épaisseur de la dalle et de l'enrobage effectif de l'armature de poinçonnement.

En complément aux règles de la SIA 262:2013, des développements théoriques effectués dans le cadre de la théorie de la fissure critique ont montré que pour des dalles peu élancées [12] ou précontraintes, la considération de la rupture par ouverture seulement flexionnelle de la fissure critique peut s'avérer trop sécuritaire. Dans ces cas, un mécanisme de translation peut être déterminant. Pour ce contexte, certaines considérations spécifiques additionnelles aux règles de la SIA 262:2013 seront précisées dans le chapitre 7 de ce rapport.

Valeur limite supérieure de la résistance au poinçonnement

Selon SIA 262:2013, les considérations suivantes s'appliquent pour le calcul de la résistance maximale au poinçonnement (écrasement des bielles comprimées) :

- § 4.3.6.5.7 « La résistance au poinçonnement est limitée par la résistance ultime de la première bielle de compression du béton adjacente à la surface d'appui et définie de la manière suivante:

$$V_{Rd,c} = 2 k_r \tau_{cd} d_v u \leq 3,5 \tau_{cd} d_v u \quad (69) \text{ »}$$

- § 4.3.6.5.8 « Les facteurs 2 et 3,5 dans l'équation (69) peuvent être augmentés pour une armature de poinçonnement particulièrement efficace, qui devra en général répondre à des dispositions constructives plus sévères que celles définies aux chiffres 5.5.3.7 à 5.5.3.12. Il est dans ce cas nécessaire de certifier par des essais qu'un niveau de sécurité comparable à celui du cas de dimensionnement des dalles sans armature de poinçonnement est atteint. »

L'évaluation des essais montre, en accord avec le § 4.3.6.5.8, que les limites du § 4.3.6.5.7 peuvent être augmentées à condition de respecter les règles constructives décrites dans le chapitre 6.

6. Dispositions constructives

Les dérogations décrites dans ce document sont justifiées à condition de respecter les dispositions constructives supplémentaires à celles de la SIA 262:2013 définies ci-dessous:

1. Le système ne peut pas être utilisé pour des dalles où la hauteur statique demeure inférieure à 160 mm (cette limite est plus stricte de celle du chiffre 5.5.3.12 de la norme SIA 262:2013).
2. Les parties horizontales des barres façonnées doivent entourer la 2^{ème} et 3^{ème} nappe d'armature, voir figure 2a
3. Les dispositions du chiffre 5.5.3.11 concernant l'enrobage des barres façonnées dans la zone comprimée c_v (voir figure 2) doivent être remplacées par les règles suivantes :

- pour des valeurs de la résistance au poinçonnement $v_{Rd} \leq 2 \cdot k_r \cdot \tau_{cd} \cdot d$:

$$c_v \leq \frac{d}{6} \quad (1)$$

- pour le cas où $v_{Rd} = 2.6 \cdot k_r \cdot \tau_{cd} \cdot d$, cette condition devient:

$$c_v \leq \frac{d}{8} \quad (2)$$

- pour des valeurs intermédiaires de la résistance au poinçonnement, la limite pour c_v peut être interpolée comme indiqué dans la figure 2b.

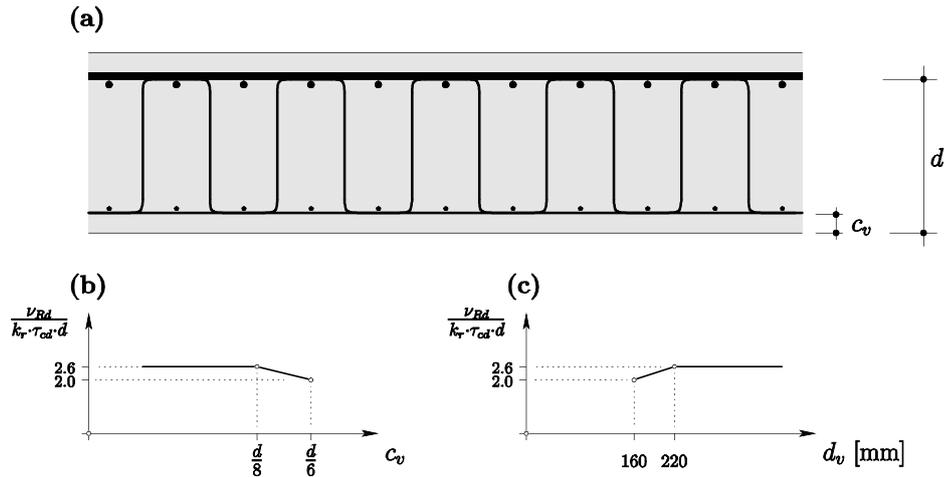


Figure 2 : Règles constructives et influence du niveau de sollicitation : (a) disposition des barres façonnées ; (b) valeur de l'enrobage de la zone comprimée en fonction du niveau de sollicitation ; et (c) sollicitation maximale admissible en fonction de la hauteur statique effective de la dalle

7. Méthode de dimensionnement et limites d'application

La méthode de dimensionnement des armatures FIDECA® est basée sur la SIA 262:2013 § 4.3.6, avec certaines adaptations tenant compte des particularités de ce système d'armature. Ces adaptations sont effectuées en cohérence avec la théorie de la fissure critique [8-11], support théorique de la norme SIA 262:2013 pour la partie du poinçonnement.

Dimensionnement de l'armature transversale

La résistance à l'intérieur d'une zone renforcée par une armature de poinçonnement ($V_{Rd,int}$) peut être calculée à partir d'une contribution du béton à la reprise de l'effort tranchant ($V_{Rd,c}$) et d'une contribution des armatures de poinçonnement ($V_{Rd,s}$) selon les chiffres 4.3.6.5.2-4:

$$V_{Rd,int} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \quad (3)$$

La figure 3 montre la valeur de ces contributions selon la théorie de la fissure critique [9]. Selon cette approche, une armature de poinçonnement peut être dimensionnée en calculant la rotation (ψ_d) développée par la dalle pour la charge de dimensionnement (V_d). De ce fait, la résistance du béton associée à cette rotation ($V_{Rd,c}$) peut être déterminée et la résistance de l'armature ($V_{Rd,s}$) doit ainsi être supérieure au reste de la sollicitation ($V_d - V_{Rd,c}$) :

$$V_{Rd,s} \geq V_d - V_{Rd,c} \quad (4, \text{SIA 262 Eq. 65})$$

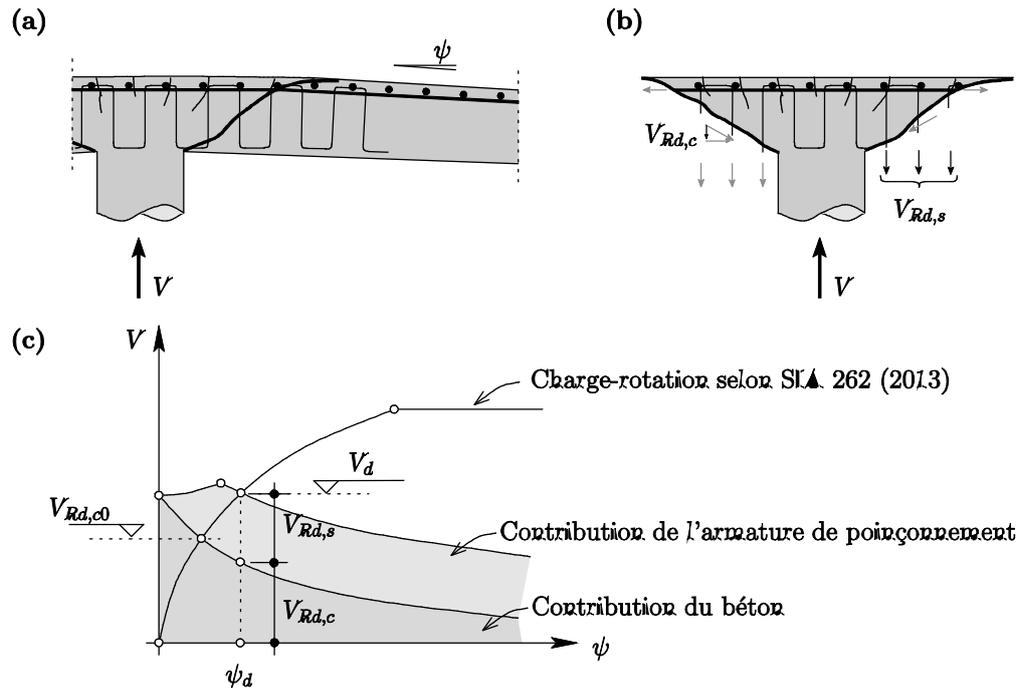


Figure 3 : Contributions du béton et de l'armature de poinçonnement à la reprise des charges : (a) activation des armatures ; (b) contributions du béton et de l'armature ; et (c) détermination des contributions sur la base de la théorie de la fissure critique

Par rapport à la résistance de l'armature, elle peut être calculée selon la SIA 262:2013 comme :

$$V_{Rd,s} = \Sigma A_{sw} \cdot k_e \cdot \sigma_{sd} \quad (5, \text{SIA 361 Eq. 67})$$

devant toutefois respecter la quantité minimale d'armature transversale précisée dans le § 4.3.6.5.3 de la SIA 262:2013. Dans l'Éq. (5) il a été considéré que l'armature FIDECA® est perpendiculaire au plan de la dalle ainsi que les aspects suivants :

- A_{sw} correspond selon la théorie de la fissure critique à l'aire de l'armature correctement ancrée qui se trouve à l'intérieur du cône de poinçonnement (pour lequel un angle de 45° est admis). Le calcul de la surface de cette armature peut être effectué en multipliant le taux d'armature transversal (ρ_w) par la surface effective du béton (A_{eff} , voir figure 4), où :

$$d_{eff} = d_v - c_v - 3\phi_w \quad (6)$$

- k_e se réfère à la valeur du coefficient d'excentricité selon § 4.3.6.2.4 de la SIA 262:2013
- σ_{sd} se réfère à la contrainte qui peut être mobilisée dans l'armature transversale par le biais de l'ouverture de la fissure critique. Cette valeur peut être estimée sur la base de la SIA 262:2013 § 4.3.6.5.4 comme :

$$\sigma_{sd} = \frac{E_s}{6} \psi \left(1 + \frac{f_{bd}}{f_{sd}} \frac{d}{\phi_{sw}} \right) \leq f_{sd} \quad (7, \text{SIA 262 Eq. 68})$$

Où E_s se réfère au module d'élasticité de l'armature transversale (205'000 N/mm²), f_{sd} à sa valeur de calcul de la limite d'écoulement et ϕ_{sw} à son diamètre (10 resp. 12 mm pour les paniers FIDECA®). Il est à noter que cette équation décrit une phase d'activation des armatures de poinçonnement ($\sigma_{sd} < f_{sd}$) suivie par une phase où les armatures de poinçonnement ont atteint leur limite d'écoulement, voir figure 3c.

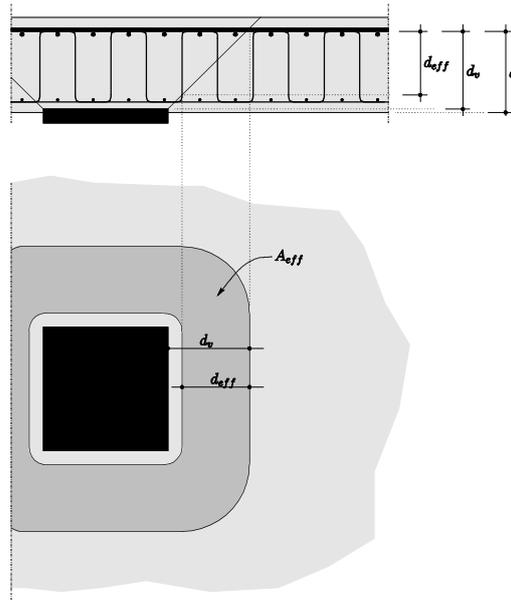


Figure 4 : Cône de rupture et zone d'ancrage efficace de l'armature transversale

Dérogation pour des ruptures avec rotations faibles

L'état de connaissances a montré que l'activation des armatures transversales dans une dalle peut avoir lieu non seulement par des mécanismes avec déformations flexionnelles prédominantes [9] (figure 5a), mais aussi quand un mécanisme de translation se produit [12], voir figure 5b.

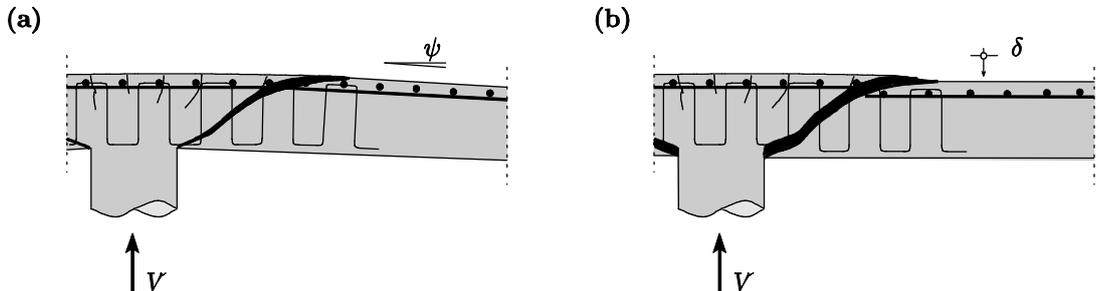


Figure 5 : Mécanismes de rupture potentielles : (a) flexionnel ; et (b) translationnel

Dans ces cas, le dimensionnement de l'armature peut être effectué en considérant que tout l'effort tranchant est repris par l'armature de poinçonnement et que celle-ci atteint sa limite d'écoulement :

$$V_d \leq \Sigma A_{sw} \cdot k_e \cdot f_{sd} \quad (8)$$

La valeur minimale de l'armature transversale obtenue par les Eq's (4) et (8) sera ainsi à considérer.

Valeur limite supérieure de la résistance au poinçonnement

L'évaluation des essais [4-7] montre que la limite de résistance proposée par la SIA 262:2013 dans l'équation (69) ($V_{Rd} = 2 k_r \tau_{cd} d_v u$) peut être augmentée grâce à la bonne performance du système FIDECA®. Pour des dalles dont la hauteur statique est égale ou supérieure à 220 mm, l'équation (69) de la norme SIA 262:2013 peut être remplacée par :

$$V_{Rd} = 2.6 \cdot k_r \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot u \leq 3.5 \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot u \quad (9)$$

Pour des dalles dont la hauteur statique est égale à 160 mm, la limite de la norme SIA 262:2013 demeure applicable :

$$V_{Rd} = 2 \cdot k_r \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot u \leq 3.5 \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot u \quad (10, \text{SIA 262 Eq. 69})$$

Pour des cas où la hauteur statique se situe entre 160 mm et 220 mm, une interpolation linéaire entre les deux expressions peut être admise (voir figure 2c).

Vérification à l'extérieur de l'armature de poinçonnement

L'étendue de la zone pourvue d'une armature de poinçonnement sera déterminée par une vérification du poinçonnement à l'extérieur de la zone renforcée selon l'approche proposée par la norme SIA 262:2013, chiffre 4.3.6.5.9:

$$V_{Rd} = k_r \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot u_{ext} \quad (11)$$

où d_v est la hauteur statique réduite définie dans la figure 25 de la norme SIA 262:2013.

8. Comparaison des essais avec le modèle de dimensionnement proposé

Les résultats obtenus avec la méthode de dimensionnement proposée dans le chapitre 7 et avec la norme SIA 262:2013 [1] sont comparés dans le tableau 1 aux résultats des essais effectués avec le système FIDECA® [4-7]. Pour la comparaison du modèle de dimensionnement proposé, deux colonnes sont présentées. Une $(V_{Rtest}/V_{Rmod})_m$ dont le critère de rupture moyen de la théorie de la fissure critique est utilisé (selon [9], voir annexe A), ainsi qu'une autre $(V_{Rtest}/V_{Rmod})_k$ avec la méthode de dimensionnement présentée dans le chapitre 6 sur la base de la SIA 262:2013 et basée également sur la théorie de la fissure critique (en adoptant un critère de rupture caractéristique). La première colonne permet une estimation de la qualité du modèle théorique tandis que la deuxième permet une évaluation du niveau de sécurité atteint avec la méthode de dimensionnement proposée.

Tableau 1: Comparaison des essais [4-7] avec la méthode proposée dans le chapitre 7 de ce document

Référence	Dalle	d [mm]	Mode de rupture	$(V_{Rtest}/V_{Rmod})_m$	$(V_{Rtest}/V_{Rmod})_k$
[4]	V1	240	Poinçonnement	1.14	1.30
	V2	240	Rupture 1 ^{er} bielle	1.05	1.22
[5]	V4	240	Extérieur zone renforcée	1.00	1.15
[6-7]	PF1	209	Activation armature	0.94	1.05
	PF2	208	Rupture 1 ^{er} bielle	1.05	1.22
	PF3	209	Rupture 1 ^{er} bielle	1.02	1.18
	PF4	277	Rupture 1 ^{er} bielle	1.00	1.17
	PF5	354	Activation armature	1.22	1.28
Moyenne :				1.05	1.20
CdV :				0.089	0.079
Min :					1.05
percentile 5% :					1.07

Le tableau 1 montre que le modèle proposé pour le dimensionnement permet des prédictions de très bonne qualité de la résistance des dalles renforcées avec le système FIDECA®. La valeur moyenne du rapport V_{Rtest}/V_{Rmod} est égale à 1.05 avec un coefficient de variation de 8.9%. Le niveau de sécurité (percentile 5% de la formulation caractéristique) est égal à 1.07 > 1.0 et demeure donc admissible. Ces valeurs sont similaires à celles obtenues en comparaison de la méthode de

dimensionnement des dalles sans armature de poinçonnement selon SIA 262:2013 avec les résultats obtenus dans les essais de référence (voir tableau 2).

Tableau 2: Comparaison des essais des références sans armature de poinçonnement [6-7] avec la méthode de dimensionnement de la SIA 262:2013

Référence	Dalle	d [mm]	Mode de rupture	$(V_{Rtest}/V_{Rmod})_m$	$(V_{Rtest}/V_{Rmod})_k$
[6-7]	PL1	210	Poinçonnement	0.95	1.09
[8]	PV1	210	Poinçonnement	1.08	1.24
[6-7]	PL3	210	Poinçonnement	1	1.16
	PL4	277	Poinçonnement	1.07	1.24
	PL5	354	Poinçonnement	0.99	1.15
Moyenne :				1.02	1.18
CdV :				0.055	0.064
Min :					1.09
percentile 5% :					1.07

9. Conclusions

1. Le dimensionnement et la vérification des dalles avec armatures contre le poinçonnement FIDECA® peuvent être effectués sur la base des règles décrites dans ce document avec un niveau de sécurité satisfaisant et comparable à celui de la norme SIA 262:2013.
2. Ces règles de dimensionnement et de vérification sont compatibles avec le format adopté par la norme SIA 262:2013 [1] pour des dalles avec armature de poinçonnement.
3. Les dérogations décrites dans ce document sont justifiées à condition de respecter les dispositions constructives supplémentaires définies.

Lausanne, le 7 décembre 2016



Prof. Dr Aurelio Muttoni



Dr Miguel Fernández Ruiz

Annexe A

Dans cette annexe, les résultats des essais des tableaux 1 et 2 sont comparés à la prédiction de résistance obtenue selon la méthode décrite dans cette expertise. La comparaison est effectuée utilisant le critère de rupture déterminant (valeurs moyennes, colonne $(V_{Rtest}/V_{Rmod})_m$ des tableaux 1 et 2) et en exprimant les résultats en fonction d'une rotation et résistance normalisées de la dalle [8].

