

Simulation des efforts dus aux variations de température dans les parois extérieures

Dan Preda Ștefănescu¹, Cristina Busuioc²

¹Faculté de Constructions Civiles et Industrielles, Université Technique "Gh. Asachi", Iași, 700050, Roumanie

²Faculté de Constructions Civiles et Industrielles, Université Technique "Gh. Asachi", Iași, 700050, Roumanie

Résumé

Depuis quelque temps on enregistre souvent la dégradation de revêtements céramiques des façades. Alors les personnes se trouvant à proximité des bâtiments à plusieurs niveaux sont en danger. Les auteurs ont développé un modèle théorique pour établir le comportement des parois extérieures de ce genre mettant en évidence les mécanismes de destruction (distribution des efforts, déplacements et déformations).

En utilisant un programme de calcul performant, on a effectué des simulations pour un bâtiment à trois niveaux. De cette manière on a mis en évidence les tensions dans le placage et dans le mortier qui fixe le placage. On présente en détail, pour la saison chaude et froide, les modalités de déformation et les états de tension dans le mortier support et dans le revêtement de la façade mettant en évidence les zones dans lesquelles peuvent se produire des dégâts.

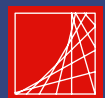
Mots clés: façades plaquées avec la céramique, mortier support, actions mécaniques et thermiques, distribution des efforts, déformations.

1. L'ANALYSE DU COMPORTEMENT THERMO-ELASTIQUE AUX ACTIONS MECANIQUES

A fin d'obtenir des effets esthétiques et pour assurer une protection durable contre la pluie, pour divers bâtiments (social culturels, administratifs, résidentiels, etc.), on peut utiliser les revêtements céramiques des façades.

Toutefois, il existe bien de cas où, après une certaine période d'exploitation, ce placage est détérioré sous une forme ou une autre pouvant provoquer des accidents et impliquant des dépenses considérables.

Au cas où le placage, disposé sur une couche de mortier de ciment, est constitué par des éléments céramiques (briques de placage ou des petites plaques), les causes des éventuelles dégradations avec le temps peuvent être diverses:



D. P. Ștefănescu, C. Busuioc

- utilisation de matériaux de mauvaise qualité (par exemple des mortiers de marque inférieure);
- des conditions non conformes à l'exécution (températures trop basses ou trop élevées, séchage trop rapide, etc.);
- exécution impropre (couche de mortier non uniforme, le montage de plan pour les éléments de placage, les joints non conformes, etc.).

Ces déficiences initiales peuvent conduire, ultérieurement, aux détériorations des placages céramiques par:

- fissuration des joints dans certaines zones;
- détachement du mortier de la couche support;
- fissuration des plaques céramiques;
- détachement de plaques céramiques, etc.

Dans cette étude on a essayé de localiser les zones ayant un risque élevé en ce qui concerne l'apparition des phénomènes mentionnés ci-dessus par simulation, par du comportement mécanique de l'ensemble de la paroi (support) – mortier – éléments de placage, sous l'action combinée du poids, des variations de température saisonnières et des variations d'humidité qui peuvent être assimilées aux variations thermiques. Les modelages ont été effectués avec un programme performant, capable d'effectuer l'analyse statique, thermique et en final thermo-elastique, par la méthode des éléments finis.

Le domaine étudié est constitué par un tronçon de paroi extérieure ayant une épaisseur de 30 cm réalisé avec des briques. A la surface extérieure de la paroi, on a considéré une couche de mortier de ciment de 2 cm d'épaisseur et un placage céramique de 1 cm d'épaisseur. A l'endroit des ceintures, les ponts thermiques étaient corrigés avec des bandes de polystyrène extrudé de 5 cm d'épaisseur (Figure 1).

Les caractéristiques élastiques et thermiques des matériaux sont présentées dans le Tableau 1.



Simulation des efforts dus aux variations de température dans les parois extérieures

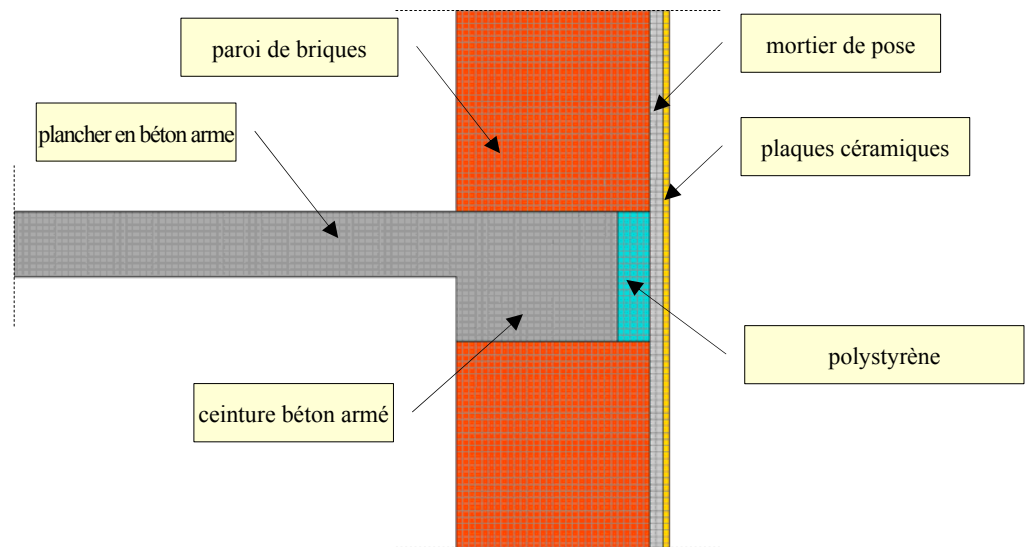


Figure 1. Le domaine modelé (détail). Intersection de la paroi extérieure avec le plancher

Tableau 1. Les caractéristiques élastiques et thermiques des matériaux

Numéro critique	Matériaux	Coefficient d'élasticité (daN/cm ²)	Coefficient de Poisson (-)	Coefficient de conductivité thermique (W/m·K)	Coefficient de dilatation thermique (1/K)
1	Maçonnerie de brique	20.000	0,3	0,6	6,0E-6
2	Béton	200.000	0,2	1,7	1,1E-5
3	Mortier	100.000	0,2	0,9	1,2E-5
4	Placage céramique	20.000	0,3	0,6	6,0E-6
5	Polystyrène	1.000*	0,3	0,044	1,0E-6

*) conventionnel

Les études ont été effectuées sur un bâtiment d'habitation à trois niveaux, avec une hauteur par niveau de 2,8 m. Le champ courant de paroi a été modelé (domaine plan), avec un pas petit de discrétisation de 1 cm (Figure 2).

D. P. Ștefănescu, C. Busuioc



Figure 2. L'hypothèse de modelage pour le domaine plan

Les charges gravitationnelles considérées, avec des valeurs conformes aux valeurs standard actuelles, étaient celles:

- données par le poids propre des éléments composant;
- utiles, uniformément réparties sur les planchers.

Les charges thermiques (les conditions de contour):

- intérieure – condition à la limite de la III – ème espèce (Fourier):

$$\alpha_i = 8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}; T_i = (273 + 20) \text{ K};$$

- extérieure – saison froide, condition limite de la I – ère espèce (Dirichlet):

$$T_e = (273 - 20) \text{ K};$$

- extérieure – saison chaude, condition limite de la I – ère espèce (Dirichlet):

$$T_e = (273 + 60) \text{ K}.$$

Les étapes de la simulation numérique sont les suivantes:

- la détermination de l'état de tensions et déformations sous charges gravitationnelles;
- la détermination du champ thermique, en saison chaude et froide;
- la détermination des tensions et déformations sous charges thermiques, en utilisant les valeurs de température dans les noeuds, déterminées au point précédent;
- la détermination des tensions et des déformations sous charges gravitationnelles et thermiques.



Simulation des efforts dus aux variations de température dans les parois extérieures

2. LE CHAMP COURANT DE PAROI (LE DOMAINE PLAN)

Les modelages pour le domaine plan ont été effectués car, dans cette situation, on peut utiliser un pas fin de discrétisation et dans ce cas la précision des résultats est très bonne. Le domaine modelé, représenté dans la Figure 2, a été discrétisé avec des éléments finis plans carrés, l'arête de 1 cm.

Dans la Figure 3, la déformation de la structure est représentée à une échelle amplifiée pour toutes les situations de chargement, en saisons chaude et froide.

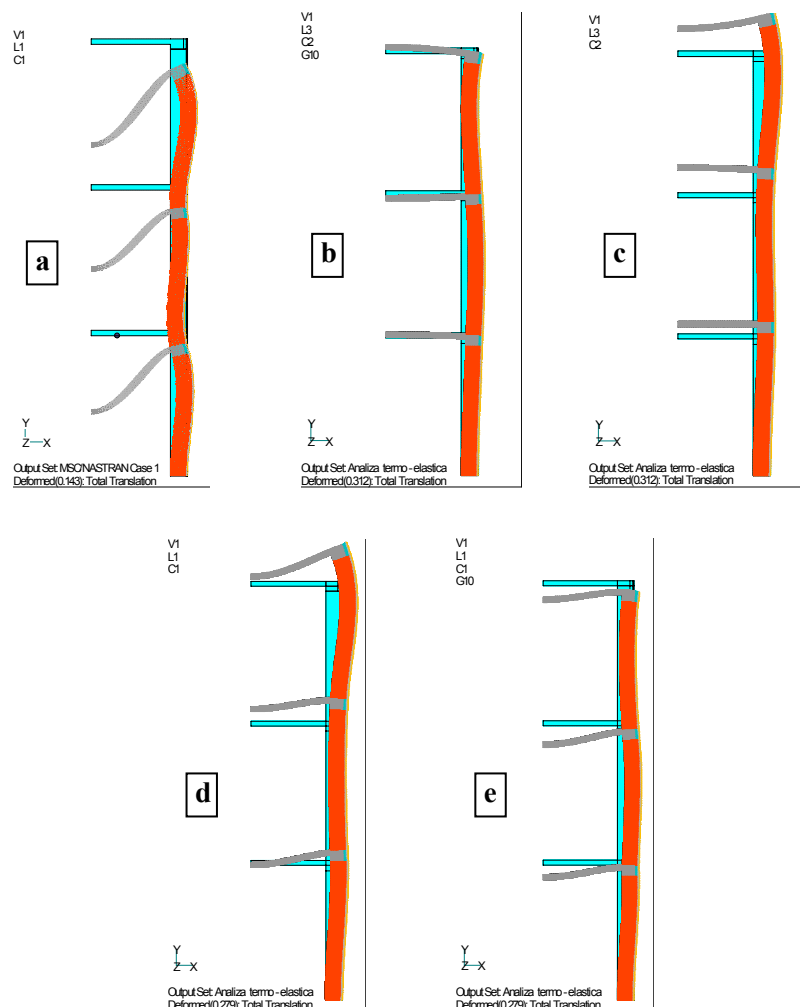


Figure 3. La déformation de la paroi (le domaine plan): a – provoquée par des charges gravitationnelles; b – provoquée par des charges thermiques (l'été); c – provoquée par des charges thermiques (l'hiver); d – provoquée par des charges gravitationnelles + thermiques (l'été); e - provoquée par des charges gravitationnelles + thermiques (l'hiver)



D. P. Ștefănescu, C. Busuioc

2.1 L'état des tensions dans le mortier support

Dans le Tableau 2, les valeurs maximales sont présentées pour les tensions normales, horizontales (perpendiculaires à la paroi) et verticales (parallèles à la paroi), sous l'action des charges gravitationnelles (a), des charges thermiques (b) et des charges totales (gravitationnelles + thermiques) (c). L'allure des déformations de la Figure 3 indique pour l'ensemble une sollicitation de fléchissement dans le plan vertical. On peut remarquer que dans la saison chaude, les tensions normales verticales provoquées par les charges thermiques sont seulement de compression (à cause des dilatations empêchées), celles d'extension ayant des valeurs faibles, limitées à des zones très restreintes, alors que dans la saison froide, seulement celles d'extension existent (à cause des contractions empêchées).

Tableau 2. Modelage 2D – les tensions normales maximales dans le mortier support (daN/cm²)

Nr. crt.	Période	Horizontales		Verticales	
		compression	extension	compression	extension
a. Charges gravitationnelles					
1	Saison froide et chaude	-2.22	+0.378	-12.4	+3.96
b. Charges thermiques					
2	Saison chaude	-2.48	+1.13	-60.4	+0.832
3	Saison froide	-2.02	+0.652	-0.252	+24.7¹⁾
c. Charges gravitationnelles + thermiques					
4	Saison chaude	-1.34	+1.18	-47.07	+1.125
5	Saison froide	-2.50	+0.796	-0.833	+22.0¹⁾

¹⁾ local, dans la direction des planchers courants (Figure 4)

Observations (Tableau 2):

- a) les tensions normales horizontales et verticales sont provoquées par des charges gravitationnelles, celles de compression aussi bien que celles d'extension ne dépassent pas les résistances de calcul du mortier;
- b) les tensions normales horizontales provoquées par des charges thermiques sont en général comparables à celles provoquées par des charges gravitationnelles et ne dépassent pas les résistances de calcul de mortier;
- c) les tensions maximales normales verticales de compression provoquées par des charges thermiques dans la saison chaude (-60,4 daN/cm²) ont des valeurs bien



Simulation des efforts dus aux variations de température dans les parois extérieures

supérieures aux tensions provoquées par des charges gravitationnelles, mais ne dépassent pas la résistance à la compression pour un mortier de marque supérieure;

d) dans les zones situées dans la direction des planchers courants (Figure 4), les tensions maximales normales verticales d'extension provoquées par des charges thermiques dans la saison froide ($+24,7 \text{ daN/cm}^2$) ont des valeurs bien supérieures aux tensions provoquées par des charges gravitationnelles et dépassent la résistance à l'extension du mortier;

e) dans les cas des charges combinées, gravitationnelles et thermiques, les valeurs des tensions sont en général inférieures à celles des résistances du matériau, à l'exception des tensions verticales d'extension situées dans la direction des planchers courants, dans la saison froide, avec des valeurs maximales de $22,0 \text{ daN/cm}^2$ (analogue comme au point d.).

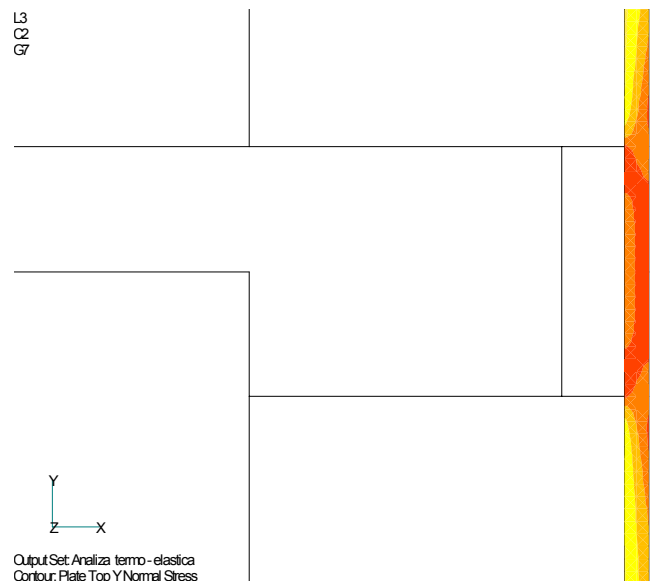


Figure 4. La carte des tensions normales verticales dans l'enduit, provoquées par des charges thermiques, dans la saison froide, dans la direction des planchers courants

2.2. L'état des tensions dans le placage céramique

Dans le Tableau 3, les valeurs maximales sont présentées pour les tensions normales, verticales et horizontales, sous l'action des charges gravitationnelles (a), des charges thermiques (b) et des charges gravitationnelles et thermiques (c).

Il faut comparer les valeurs de ces tensions avec les valeurs des résistances de calcul de placage. En l'absence des données spécifiques, on a utilisé, en mode orientable, les résistances de calcul de la maçonnerie avec des blocs céramiques, conformément au Tableau 4.



D. P. Ștefănescu, C. Busuioc

Tableau 3. Modelage 2D – les tensions maximales dans le placage céramique (daN/cm²)

Nr. crt.	Période	Horizontales		Verticales	
		compression	extension	compression	extension
a. Charges gravitationnelles					
1	Saison froide et chaude	-0.846	+0.022	-3.06	+0.896
b. Charges thermiques					
2	Saison chaude	-0.578	+0.197	-1.65	+6.16¹⁾
3	Saison froide	-0.869	+0.285	-2.36	+2.79²⁾
c. Charges gravitationnelles + thermiques					
4	Saison chaude	-0.810	+0.174	-3.61	+6.23¹⁾
5	Saison froide	-0.880	+0.663	-2.52	+2.23³⁾

¹⁾ locale, dans la direction de la ceinture du dernier niveau (Figure 5); $\sigma > R_i = 1,1$ daN/cm² dans la moitié supérieure de la paroi située au dernier niveau;

²⁾ locale, dans la zone au-dessous du niveau des planchers courants (Figure 6); $\sigma > R_i = 1,1$ daN/cm² sur quasiment entière paroi;

³⁾ locale, dans la zone au-dessous du niveau des planchers courants (Figure 6); $\sigma > R_i = 1,1$ daN/cm² à proximité des ceintures courantes.

Observations (Tableau 3):

a) les tensions normales horizontales et verticales de calcul provoquées par des charges gravitationnelle, autant celles de compression ainsi que celles d'extension, ne dépassent pas les résistances de calcul du placage;

b) les tensions normales horizontales et verticales de compression, provoquées par des charges thermiques sont en général comparable à celles provoquées par des charges gravitationnelles et ne dépassent pas les résistances de calcul du placage;

c) les tensions maximales normales verticales d'extension provoquées par des charges thermiques dans la saison chaude (+6,16 daN/cm²) ont des valeurs supérieures aux résistances d'extension, situées à l'endroit de la ceinture du dernier niveau (Figure 5) et dans la moitié supérieure de la paroi du dernier niveau;

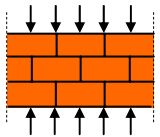
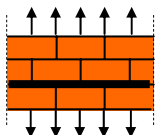
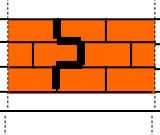
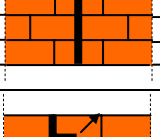
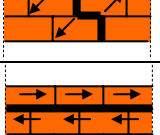
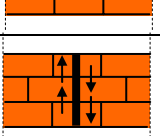

d) les tensions normales verticales d'extension provoquées par des charges thermiques dans la saison froide (+2,79 daN/cm²) ont des valeurs supérieures aux résistances d'extension, dans les zones au-dessous du niveau des planchers courants (Figure 6); $\sigma > R_i = 1,1$ daN/cm² sur la plus grande partie de la hauteur des parois;



Simulation des efforts dus aux variations de température dans les parois extérieures

e) dans les cas des charges combinées, gravitationnelles et thermiques, les observations des points c. et d. sont en générales valables mais, dans la saison froide, les tensions verticales d'extension ont des valeurs supérieures aux résistances et sont limitées aux zones de proximité des ceintures courantes.

Tableau 4. Les résistances de calcul des maçonneries avec des blocs céramiques

Le type de sollicitation	Symbole	Le type de la résistance	La résistance [daN/cm ²]
	R_c	La résistance de calcul en compression	12,5
	R_{i1}	La résistance d'extension provoquée par le fléchissement dans des sections avec les joints non tissés	1,1
	R_{i2}	La résistance d'extension provoquée par le fléchissement dans sections avec les joints tissés	2,5
	R_{i3}	La résistance d'extension provoquée par le fléchissement et par des efforts principaux d'extension pour la rupture à travers le joint et la brique	2,0
	R_p	La résistance aux efforts principaux d'extension dans les sections en échelle	1,1
	R_{f1}	La résistance critique au cisaillement dans les sections avec les joints non tissés	1,6
	R_{f2}	La résistance critique au cisaillement quand la rupture se produit par le joint et la brique	5.0

D. P. Ștefănescu, C. Busuioc

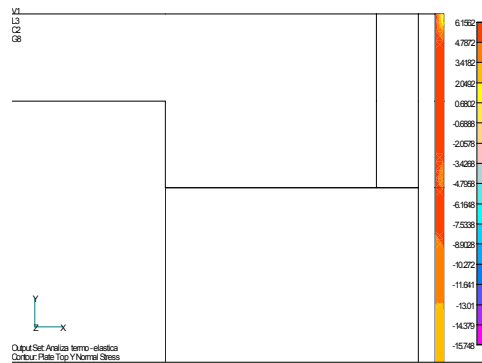


Figure 5. La carte des tensions normales verticales dans le placage, provoquée par des charges thermiques, dans la saison chaude, située dans la direction de la ceinture du dernier niveau

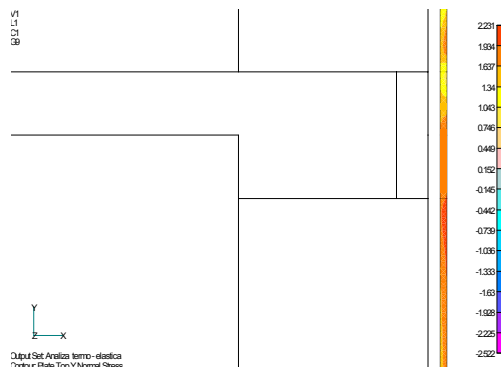


Figure 6. La carte des tensions normales verticales dans placage, provoquée par des charges thermiques, dans la saison froide, dans la zone au-dessous du niveau des planchers courants

3. CONCLUSIONS

La simulation numérique du comportement mécanique de la paroi extérieure de maçonnerie avait pour but d'établir l'état des déformations et des tensions dans la couche extérieure du mortier et dans le placage céramique, pour localiser les zones à risque potentiel élevé en ce qui concerne l'apparition des détériorations dans et entre ces couches.

Les zones critiques, où les valeurs des tensions dépassent les valeurs des résistances correspondantes, dans le cas des charges gravitationnelles + thermiques, sont mises en évidence dans le Tableau 5 (pour mortier et placage).

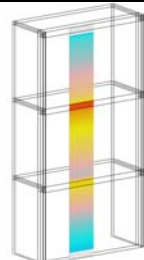

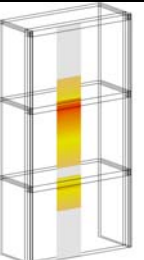
A la suite de l'analyse effectuée, ont résulté les observations, synthétisées dans ce qui suit :



Simulation des efforts dus aux variations de température dans les parois extérieures

- a) les tensions normales dans le mortier support provoquées par des charges gravitationnelles, tant celles parallèles avec la paroi (verticales) que celles perpendiculaires à la paroi (horizontales), ne dépassent pas les résistances de calcul d'un mortier de marque supérieure (Tableau 2);
- b) les tensions maximales verticales d'extension dans le mortier support, provoquées par les charges thermiques et combinées (gravitationnelles + thermiques), dans la saison froide, sont localisées au niveau des planchers courants et dépassent les résistances de calcul du mortier (Tableau 2); les zones avec $\sigma > \sim 10 \text{ daN/cm}^2$ (valeur prise comme résistance d'extension pour le mortier) comprennent sur à peu près toute la surface de la paroi (Tableau 5, colonne 4);
- c) les tensions normales dans le placage provoquées par des charges gravitationnelles ne dépassent pas les résistances de calcul de celui-ci (Tableau 3);
- d) les tensions maximales normales verticales d'extension dans le placage, provoquées par des charges thermiques et combinées, dans la saison chaude, apparaissent au niveau du dernier plancher et dépassent les résistances de calcul (Tableau 3); les zones avec $\sigma > 1,1 \text{ daN/cm}^2$ (valeur prise comme résistance d'extension pour le placage) comprennent la moitié supérieure de la paroi du dernier niveau (Tableau 5, colonne 5);
- e) les tensions maximales normales verticales d'extension dans le placage, provoquées par des charges thermiques et combinées, dans la saison froide, sont positionnées dans la direction des planchers courants et dépassent les résistances de calcul (Tableau 3); les zones avec $\sigma > 1,1 \text{ daN/cm}^2$ comprennent quasiment la totalité de la paroi (Tableau 5, colonne 6);

Tableau 5. Zones critiques (tensions normales supérieures aux résistances correspondantes)

Nr crt.	Tensions	Sollicitation	Mortier support		Placage	
			la saison chaude	la saison froide	la saison chaude	la saison froide
0	1	2	3	4	5	6
Le domaine: paroi extérieure (champ courant)						
1	Verticale	Extension	-			



D. P. Ștefănescu, C. Busuioc

En conclusion, on peut affirmer que:

- les tensions générées par des charges gravitationnelles sont toujours plus petites que les résistances limites et, en même temps, sont inférieures aux tensions qui proviennent des variations de température saisonnières;
- les zones les plus étendues (cca. 50...90% de la surfaces de la paroi), où les tensions provoquées par des charges thermiques ou combinées (gravitationnelles + thermiques) dépassent les résistances de calcul, se distinguent dans la saison froide, pour les tensions normales verticales d'extension dans le mortier support et le placage céramique;
- des valeurs importantes des tensions normales, supérieures aux résistances de calcul, apparaissent aussi au niveau des ceintures des niveaux courants, spécialement dans le champ courant de la paroi.

L'analyse effectuée par la simulation numérique du comportement mécanique de la couche de mortier support extérieur et du placage céramique, pour une paroi de maçonnerie, ne s'est pas proposée en particulier de fournir des résultats quantitatifs précis, mais on a souhaité plutôt une étude qualitative des paramètres, pour mettre en évidence l'influence des variations thermiques concernant l'état des déformations et des tensions.

Par la modalité d'étude adoptée, on a essayé de tracer des jalons et d'esquisser des méthodologies par lesquelles les problèmes proposés peuvent être résolus grâce aux simulations sur ordinateur. Evidemment, il existe un vaste champ de recherche dans ce sens, parce que les solutions de revêtement des parois extérieures sont nombreuses, autant du point de vue des matériaux utilisés que du point de vue des systèmes constructifs. Le mode d'investigation proposé peut être utilisé dans tous ces cas, autant pour évaluer le risque d'apparition des détériorations provoquées par des causes de nature mécanique, que pour effectuer des analyses comparatives afin de choisir des solutions optimales.

Bibliographie

1. Ștefănescu, D. P. – *Contribuții la studiul problemelor de higrotermică a clădirilor prin simulare pe calculator*, Teză de doctorat, Iași, 1994
2. Ștefănescu, D. P. – *Simularea numerică a transferului de căldură. Aplicații în proiectare*, volumul Simpozionului cu participare națională "Satisfacerea exigențelor de izolare termică și conservare a energiei în construcții", Ed. Societății Academice "Matei-Teiu Botez", Iași, 2003, p. 161-170
3. Radu, A., Bliuc, I., Busuioc, C. – *Particularități ale izolațiilor termice de tip "ETICS"*, volumul Simpozionului cu participare națională "Satisfacerea exigențelor de izolare termică și conservare a energiei în construcții", Ed. Societății Academice "Matei-Teiu Botez", Iași, 2003, p. 145-160

