



HAL
open science

Modélisation de l'endommagement d'un béton réfractaire dans une structure modèle constituée d'un disque de béton muni d'un ancrage métallique

Mohsen Roosefid, Evariste Ouedraogo, Hicham Marzagui, Thierry Cutard, Nicolas Prompt, Cyrille Deteuf

► To cite this version:

Mohsen Roosefid, Evariste Ouedraogo, Hicham Marzagui, Thierry Cutard, Nicolas Prompt, et al.. Modélisation de l'endommagement d'un béton réfractaire dans une structure modèle constituée d'un disque de béton muni d'un ancrage métallique. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03362012

HAL Id: hal-03362012

<https://hal.science/hal-03362012v1>

Submitted on 1 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation de l'endommagement de bétons réfractaires dans une structure-modèle constituée d'un disque de béton muni d'un ancrage

Mohsen Roosefid¹, Evariste Ouedraogo¹, Hicham Marzagui², Thierry Cutard²,
Nicolas Prompt³, Cyrille Deteuf³

¹ Laboratoire 3S, Domaine Universitaire, B.P 53, 38041 GRENOBLE

² Centre de Recherche Outillages, Matériaux et Procédés, Campus Jarlard, 81013 ALBI Cedex 09

³ TRB, Rue de la Neuville, 62125 NESLES

Evariste.Ouedraogo@hmg.inpg.fr

Résumé :

L'étude présentée s'appuie sur des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre d'un programme national de recherche sur les bétons réfractaires, PROMETHEREF. Bien que le comportement de ces matériaux soit assez complexe, on montre que la loi de comportement d'élasticité couplée à l'endommagement de Mazars est capable de traduire le comportement monotone permettant ainsi d'accéder, au moins, à des états d'endommagement réalistes. Après avoir décrit succinctement la loi de comportement, on présente les résultats de l'identification de cette loi sur les résultats d'essais de compression simple. Les résultats de l'identification ont alors permis de mener des calculs par éléments finis, en approche non locale, sur une structure modèle constituée d'un disque d'ancrage de bétons réfractaires. Enfin, les résultats de la simulation numérique de l'endommagement engendré par le chauffage du disque sont comparés avec des observations micrographiques faites sur un modèle expérimental permettant d'apprécier qualitativement la pertinence de la modélisation numérique.

Abstract :

This study has been carried out in the framework of the French research program PROMETHEREF, especially on modelling the thermo-mechanical properties of refractory concretes. An elastic damage model is proposed to predict the monotonic loading behaviour and to evaluate realistically the occurring damage. Indeed, though the models currently available do not take into account all aspects associated with refractory concretes behaviour, this study shows that Mazars's elastic damage model provides reasonable results. Uniaxial compression tests results have been used in order to identify the model parameters by taking into account the non local approach. Then the finite element simulation of the thermo-mechanical behaviour of an anchored refractory lining, run with the CAST3M software, is presented. Finally, the simulation results of the qualitative damage development has been compared with micrographic observations resulted by empirical model.

Mots-clefs :

Béton réfractaire ; Essais thermomécaniques ; Modélisation.

1 Introduction

Cette étude porte sur la modélisation des propriétés mécano-thermiques de deux bétons réfractaires utilisés dans des applications industrielles à haute température [Boussuge 2003]. Il s'agit des bétons réfractaires 33 et 54B01-FS de la famille des bétons réfractaires silico-alumineux, fabriqués et proposés par la société TRB. Des essais thermomécaniques sont d'abord effectués afin de déterminer le comportement et les paramètres de ce comportement [Marzagui *et al.* 2004, Roosefid *et al.* 2005b]. Jusqu'à des températures de 800 à 900°C, ces matériaux ont un comportement non linéaire fragile révélé par le développement de réseaux de fissures qui évoluent en macro-fissures et qui finissent par engendrer une rupture en

comportement post-pic. Dans le cadre de la thermomécanique des milieux continus, un choix de lois de comportement adéquates pour les matériaux étudiés a été fait et justifié à l'aide des résultats de la caractérisation des matériaux [Roosefid *et al.* 2005a]. Nous avons alors convenu d'identifier la dégradation mécanique d'une structure modèle constituée d'un disque de béton réfractaire muni en son centre d'un ancrage métallique cylindrique coaxial. En effet, bien que les modèles dont nous disposons actuellement ne prennent pas en compte tous les aspects liés au comportement des bétons réfractaires, nous montrons dans cette étude que le modèle de Mazars conduit à des résultats raisonnables.

2 Loi élasticité couplée à l'endommagement de Mazars

Le modèle de Mazars (1984) repose sur l'élasticité couplée à l'endommagement isotrope et ignore toute manifestation de plasticité, ainsi que la fermeture des fissures. Le point particulier de ce modèle est d'utiliser un critère en déformation en introduisant la notion de déformation équivalente. Celle-ci a pour expression :

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \langle \varepsilon_i \rangle_+^2} \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\text{avec } \langle x \rangle_+ = \begin{cases} x & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x \leq 0 \end{cases}$$

La déformation équivalente prend les valeurs particulières suivantes :

En traction dans la direction i , $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_i$

En compression dans la direction 1, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu \varepsilon_1$, et $\varepsilon_1 < 0$ d'où $\tilde{\varepsilon} = -\nu \varepsilon_1 \sqrt{2}$

L'endommagement débute lorsque la déformation équivalente atteint une surface seuil d'endommagement :

$$f_D(\underline{\varepsilon}, \mathbf{K}) = \tilde{\varepsilon} - K(D) = 0 \quad [\text{Eq. 2}]$$

D , variable d'endommagement, varie entre 0 (pour le matériau sain) et 1 (pour le matériau rompu). Le seuil d'endommagement pour un matériau vierge est noté $K(0) = \varepsilon_{D0}$.

Pour tenir compte du comportement dissymétrique du béton, la définition de la surface de charge, Eq. 2, implique que l'endommagement débute à des niveaux de déformation différents. En traction, les extensions se produisent dans la direction orthogonale à celle de sollicitation, l'endommagement est direct. Ce n'est pas le cas en compression, il est transmis. D s'identifie alors à D_T dans le cas d'une sollicitation de traction pure et à D_C en compression pure. Pour décrire tous les états intermédiaires, on introduit un coefficient qui discriminera l'état de traction de celui de compression. On a alors :

$$D = \alpha_T^\beta D_T + \alpha_C^\beta D_C \quad [\text{Eq. 3}]$$

avec β comme paramètre de correction pour le cisaillement,

$$\alpha_T = \frac{\sum \varepsilon_{Ti} \langle \varepsilon_i \rangle_+}{\tilde{\varepsilon}^2} \quad [\text{Eq. 4}]$$

$$\alpha_C = 1 - \alpha_T \quad [\text{Eq. 5}]$$

L'évolution de D_T et D_C avec la déformation est de la forme :

$$D = 1 - \frac{\varepsilon_{D0}(1-A)}{\tilde{\varepsilon}_M} \frac{A}{\exp[B(\tilde{\varepsilon}_M - \varepsilon_{D0})]} \quad [\text{Eq. 6}]$$

où A , B sont des caractéristiques du matériau et $\tilde{\varepsilon}_M$ est la déformation équivalente maximale atteinte. Signalons que l'endommagement se produit s'il y a au moins une extension critique dans le repère principal des déformations.

3 Modélisation numérique

La démarche d'identification de la loi d'endommagement de Mazars est relativement aisée. Une description succincte de la méthode pour déterminer les différents paramètres, développée dans le cadre de cette étude, est décrite ci-après dans le cas d'un chargement mécanique et thermique.

3.1 Procédure d'identification des paramètres du modèle

La loi d'élasticité couplée à l'endommagement est identifiée par la suite pour la description du comportement non-linéaire des bétons réfractaires sous chargement thermomécanique. L'effet mécanique de la micro fissuration due au chargement thermique est cependant décrit par la même variable scalaire D . La seule condition que doit vérifier ce modèle de comportement pour qu'il soit thermodynamiquement acceptable est que la variable d'endommagement D soit croissante [La Borderie 2003]. Ainsi, les paramètres de la loi d'endommagement de Mazars sont déterminés en fonction de la température. Cependant, nous disposons du comportement en traction des bétons étudiés à température ambiante. En outre, leurs mesures faites par extensométrie ne permettent pas, de ce fait, de mettre en évidence le comportement post-pic. C'est pourquoi nous proposons une forme a priori de la courbe contrainte – déformation en traction simple, caractérisée à première vue par le paramètre ε_{D_0} , seuil d'endommagement. On suppose aussi que le seuil d'endommagement en traction correspond à la déformation au pic déterminée sur les résultats des essais de traction. En ce qui concerne la traction à haute température, on considère la courbe d'essai de compression simple qui est théoriquement liée à celle en traction simple par une relation de proportionnalité. Nous avons alors déterminé le rapport entre la contrainte limite élastique et la contrainte au pic (γ) dans l'essai de compression à température ambiante qui correspond respectivement à une valeur de 25% pour le béton 33B1-FS et de 36% pour le béton 54B01-FS. Par hypothèse, ce rapport est considéré indépendant de la température. Par une démarche qui s'apparente à l'analyse inverse, on peut maintenant identifier le seuil d'endommagement en traction à différentes températures.

$$\varepsilon_{D_0}(T) = \frac{-\nu \gamma \sigma_c(T) \sqrt{2}}{E_0(T)} \quad [\text{Eq. 7}]$$

Quant au comportement post-pic, il est défini par la connaissance des deux paramètres A_T et B_T , en s'inspirant de l'évolution de courbes du comportement post-pic en flexion. En outre, on s'intéresse à l'approche non locale du modèle d'endommagement, basée sur la notion de longueur caractéristique qui est alors prise en compte pour « moyenner » l'endommagement autour des éléments où il apparaît en premier [Bazant *et al.* 1988]. Ainsi, la longueur caractéristique est calée de telle manière que la courbe effort-flèche des essais de flexion soit correctement décrite.

3.2 Eléments de validation du modèle

Nous présentons ici les résultats de simulation d'essais de compression monotones, ainsi que dans le cas de chargement thermomécanique. Ces essais permettent de vérifier que le modèle restitue le comportement attendu à partir des paramètres introduits.

Le modèle schématise la compression d'une éprouvette cubique de 40 mm de côté soumise à un chargement thermique comprenant une phase transitoire et une phase de régime permanent. Ce chargement thermique est appliqué par l'intermédiaire d'une convection forcée sur toutes les faces de l'éprouvette. Une fois que le chauffage a atteint son régime permanent (température constante au sein des éprouvettes), une contrainte de compression uniaxiale est ensuite appliquée selon les conditions d'essai. Par raison de symétrie, on ne considère que le quart de

l'éprouvette lors de cette simulation en contrainte plane. Un test de comparaison entre l'évolution de la moyenne des températures mesurées par thermocouples au centre des faces d'appui de l'éprouvette lors d'un essai à 1200°C avec celle obtenue en modélisation numérique confirme le recalage du coefficient d'échange de 50 W/m²K (FIG. 1). Signalons que, la différence de température en palier entre les données expérimentales et la simulation numérique est due au refroidissement des faces d'appui par les pistons du dispositif expérimental.

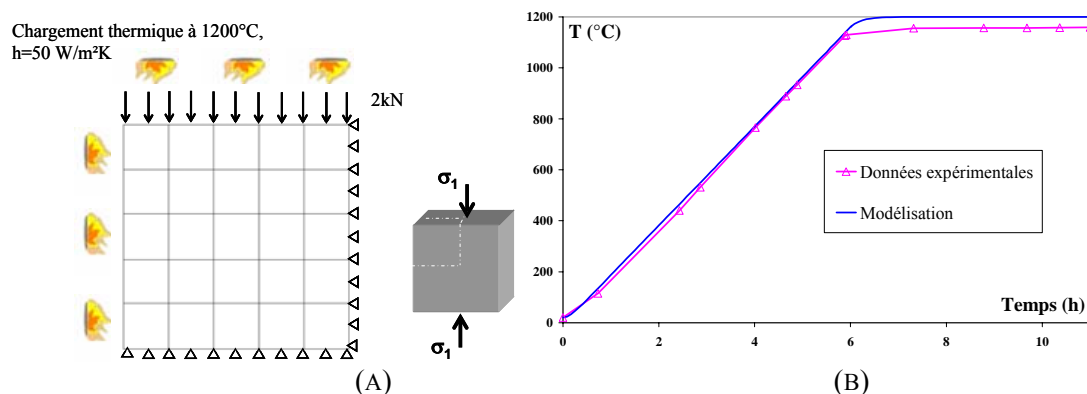


FIG. 1 – (A) Conditions aux limites et maillage du quart de l'éprouvette
(B) Evolution de température sur la face chauffée

La faible diffusivité thermique des bétons réfractaires combinée à la dimension relativement importante de l'échantillon ralentit la propagation de la chaleur en cours de chauffe. Une différence de température entre la face chauffée et le cœur de l'éprouvette s'instaure en début de chauffe et croît jusqu'à la fin de la phase transitoire en température, puis décroît sensiblement en début de palier (FIG. 2). Notons que la différence d'évolution observée entre les deux bétons est due à la plus grande diffusivité thermique du béton 54B01-FS. Ainsi, le gradient de température entre la face et le cœur de l'éprouvette engendre des contraintes assez faibles, aucun endommagement n'est donc observé.

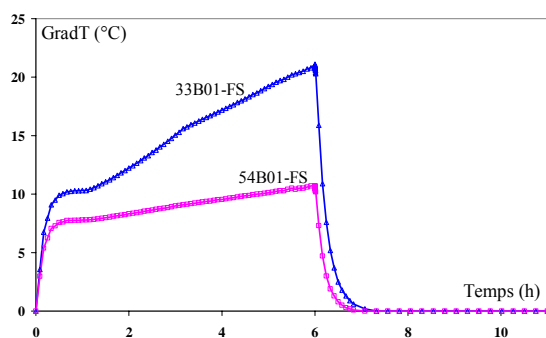


FIG. 2 – Évolutions du gradient de température entre la face chauffée et le cœur de l'éprouvette en fonction du temps

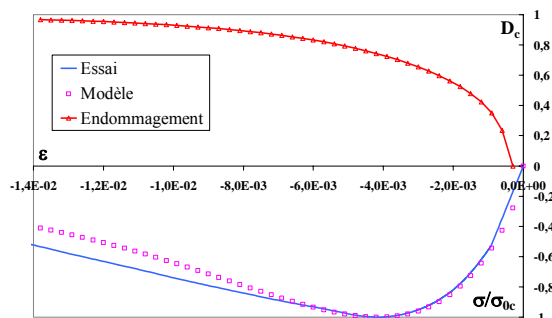


FIG. 3 – Modélisation du comportement en compression uniaxiale du béton 33B01-FS à température ambiante

La réponse du modèle en compression monotone du béton 33B01-FS à température ambiante est représentée en FIG. 3. L'évolution de l'endommagement renforce bien le sentiment que le modèle de Mazars décrit correctement le comportement en compression à température ambiante. En outre, un endommagement pré-pic est bien observé à partir d'environ 30% σ_c . La FIG. 4 synthétise l'ensemble des identifications effectuées à partir des essais sur les deux bétons

à haute température. De façon générale, une bonne concordance est obtenue entre expérience et modélisation par le modèle.

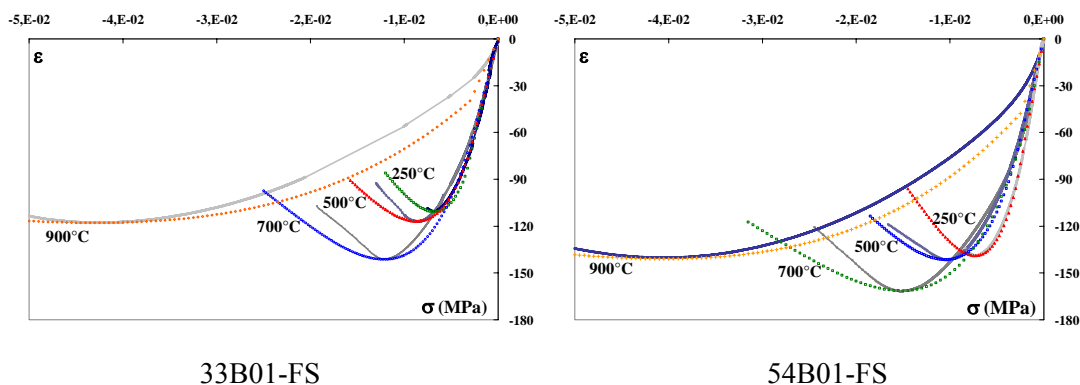


FIG. 4 – Modélisation du comportement en compression uniaxiale à haute température

3.3 Modélisation du disque avec un ancrage métallique

La modélisation de la conception de garnissage réfractaire muni d'ancrage métallique a été choisie après avoir obtenu des résultats sur un modèle expérimental [Marzagui 2005]. On souhaite simuler les évolutions de l'endommagement dans les bétons conformément au cahier des charges du programme expérimental sur un disque de 85 mm diamètre et 17 mm d'épaisseur muni en son centre d'un ancrage métallique (FIG. 5-A). Ces essais visaient initialement à définir une méthode de caractérisation microstructurale de l'endommagement.

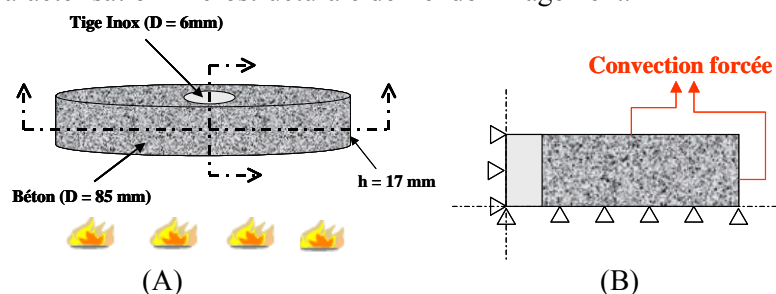


FIG. 5 – Modélisation du disque avec un ancrage métallique

La symétrie de révolution de la géométrie et du chargement permettent de conduire le calcul thermomécanique sur un quart de section transversale du disque (FIG. 5-B). Un calcul en condition axisymétrique est réalisé. On considère une condition d'adhérence complète de l'ancrage métallique au béton. En outre, le chauffage est réalisé durant la phase transitoire à la vitesse contrôlée de 5°C/min avec des paliers de 5 heures aux températures 250, 500, 700 et 900°C. Les conditions aux limites correspondant à ce chauffage sur les faces du disque sont à la fois de type échange par convection et par rayonnement. Les échanges sont simulés par un flux convectif avec un coefficient d'échange thermique de 50 W/m²K. Le maillage est progressif, avec des éléments triangulaires à 3 nœuds et une forte densité de maillage autour de la tige (FIG.6). On a alors procédé à la simulation numérique avec l'approche non locale du modèle de Mazars à partir des paramètres identifiés précédemment.

Le résultat de la simulation numérique montre clairement un phénomène de propagation de l'endommagement depuis la surface de contact ancrage – béton vers l'extérieur à température croissante (FIG. 6). Ainsi, la comparaison des résultats numériques avec ceux expérimentaux indique une bonne concordance générale entre modèle et expérience. Signalons que

l'endommagement des bétons est surtout dû à la différence de coefficient de dilatation thermique entre le béton et l'acier.

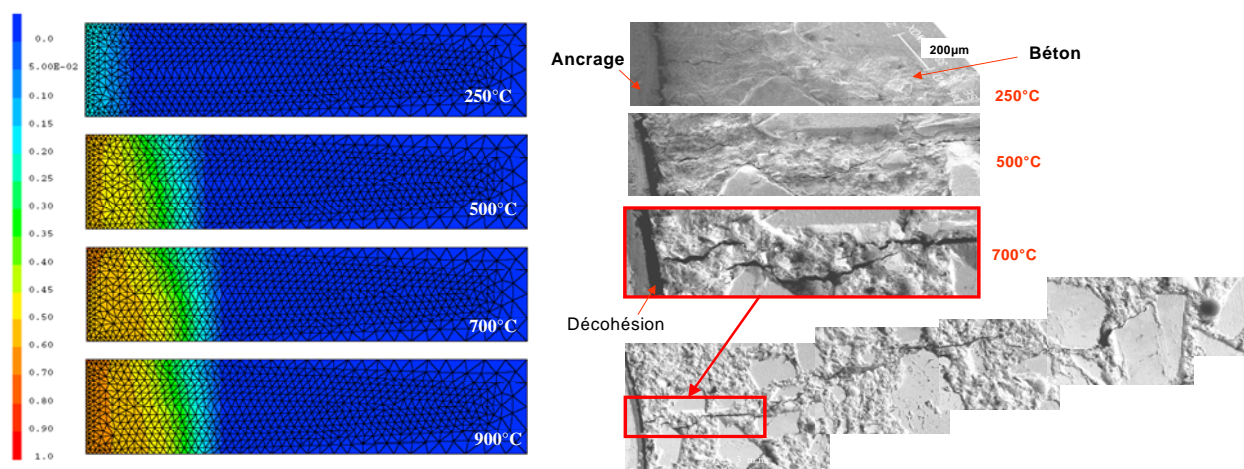


FIG. 6 – Comparaison qualitative entre les champs d'endommagement obtenus par modélisation numérique et les résultats expérimentaux aux différents paliers de température - béton 33B01-FS

4 Conclusion

Les résultats obtenus confirment les potentialités de la modélisation d'élasticité couplée à l'endommagement. Comme nous avons pu le constater, les simulations ont montré que le modèle de Mazars est en mesure de reproduire, du moins qualitativement, le processus d'endommagement du béton réfractaire autour d'un ancrage en fonction de la température. Néanmoins, il ne permet pas de reproduire certaines caractéristiques des réfractaires, mises en évidence lors de l'étude expérimentale [Roosefid 2005a]. Nous concluons que les présentes simulations numériques ont mené à des résultats intéressants puisque les prédictions obtenues sont comparables en ordre de grandeur aux observations expérimentales. A la lumière des résultats obtenus, il semble que la loi d'élasticité couplée à l'endommagement de Mazars constitue une bonne base à améliorer pour simuler de manière plus satisfaisante, le comportement thermomécanique des bétons réfractaires aux basses et moyennes températures.

Références

- Bazant, Z. P. & Pijaudier-Cabot G. 1988 Nonlocal continuum damage, localization instability and convergence. *Journal of Applied Mechanics ASME*, Vol 55, pp. 287-293
- Boussuge, M. 2003 Study of thermomechanical properties of industrial refractories: the French program PROMETHEREF. *UNITECR'03 CONGRESS*, Osaka, Japan.
- La Borderie, Ch. 2003 Stratégies et Modèles de Calculs pour les Structures en Béton, Thèse de l'habilitation à diriger les recherches. Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- Marzagui, H., Cutard, T., Roosefid, M., Ouedraogo, E., Prompt, N. & Deteuf, C. 2004 Room temperature mechanical behaviour of two refractory castables. *Proceeding of the 4th International Symposium on Advances in Refractories for the Metallurgical Industries*, pp. 645-659. Hamilton, Canada.
- Marzagui, H. 2005 Etude de deux bétons réfractaires silico-alumineux : microstructures et comportements thermomécaniques en traction et en flexion, *Thèse de Doctorat*, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 229 p.
- Mazars, J. 1984 Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Paris VI. 283 p.
- Roosefid, M., Ouedraogo, E., Prompt, N. & Miras A. 2005a Caractérisation et modélisation du Comportement thermomécanique de bétons réfractaires silico-alumineux. *CFM2005*, Troyes.
- Roosefid, M., Ouedraogo, E., Marzagui, H., Cutard, T., Prompt, N. & Deteuf, C. 2005b Thermomechanical behavior of two refractory castables. *9th Int. Tech. Conf. on Refractories (UNITECR'05)*, pp. 1003(5)-1008(5). Orlando, USA.