
Comportement rhéologique des BAP à base de sable de concassage

Benyamina Smain^{1,2}, Menadi Belkacem², Kenai Said²

¹ Département de Science de la matière, Université de Djillali Bounaama, Khemis Miliana, Algérie.

² Laboratoire de Matériaux et de génie civil, Département de génie civil, Université de Blida 1, Algérie.

RÉSUMÉ. Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides qui se mettent en place sans vibration. Leurs compositions nécessitent une quantité importante de fines pour limiter le risque de ressuage et de ségrégation. L'utilisation de sable de concassage (SC) riche en fines calcaires s'avère une solution adéquate. L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence des fines calcaires (FC) issues du sable de concassage sur les propriétés rhéologiques des BAP. A cet effet, cinq mélanges de BAP à différents pourcentages de fines (FC) dans le sable (SC) (0, 5, 10, 15, et 20%), ont été préparés. Tous les mélanges ont été soumis aux essais d'étalement, V-funnel et des tests rhéologiques à l'aide d'un agitateur. L'étude comparative entre les deux modes de tests a montré une compatibilité entre l'étalement et le seuil de cisaillement (τ_0), le temps V-funnel et la viscosité plastique (μ) respectivement. Les résultats ont montré que les fines calcaires contribuent à la diminution de l'étalement et le seuil de cisaillement et améliorent le Tv-funnel pour quelques pourcentages de fines.

ABSTRACT. Self-compacting concretes are very fluid concretes which can be made without vibration. Their composition requires a large quantity of fines to limit the risk of bleeding and segregation. The use of crushed sand rich in calcareous fines is an adequate solution. The objective of this study is to determine the influence of limestone fines from crushed sand on the rheological properties of SCC. For this purpose, five mixtures of SCC with different percentages of fines (FC) in sand (SC) (0, 5, 10, 15, and 20%) were prepared. All mixtures were tested by slump flowing tests and the V-funnel test, and rheological tests using a rehometer apparatus. The comparative study between the two test modes showed compatibility between spreading and yield stress (τ_0), V-funnel time and plastic viscosity (μ), respectively. The results showed that limestone fines contribute to the decrease of the slump flow and the yield stress and improve the Tv-funnel, for some level of substitution by fines.

MOTS-CLÉS : BAP, sable de concassage, Fines calcaires, Rhéologie.

KEY WORDS: SCC, Crushed sand, Limestone fines, Rheology.

1. Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP) ont été développés pour accélérer la cadence des travaux et développer la qualité des structures. Ces bétons s'adaptent aux différentes applications de génie civil et leur demande n'a cessé de s'accroître et de s'élargir dans les dernières années [OKAM 99]. Les BAP doivent contenir une quantité de fines importante afin d'assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage [ASS 02].

L'utilisation des sables de concassage (SC) riche en fines calcaires dans la production des BAP offre des avantages techniques et environnementaux. Plusieurs recherches ont étudiées l'effet des fines calcaires (FC) comme substitution dans le sable ou dans le ciment sur le comportement du béton à l'état frais et durci [MEN 09, KEN 99, BON 94, FEL 07, BEN 08]. Des chercheurs [BOS 03, BEN 12, ELH 15] ont montré que l'augmentation du taux de fines dans les mortiers autoplaçants provoque une diminution de l'étalement et une augmentation du temps d'écoulement Tv-funnel, ainsi que la possibilité de produire un mortier autoplaçant avec un sable concassé de 10 à 15 % de fines calcaire. En outre des études récentes [KIK 13, KDE 11] ont montré que l'incorporation d'une fine poudre de calcaire (0,7 μm et 3 μm) dans la pâte de ciment peut modifier les propriétés rhéologiques (la contrainte de cisaillement (τ) et la viscosité plastique (μ) de la pâte.

Cette étude a pour but, d'examiner l'influence des fines calcaires issues du sable de concassage sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants. Des essais à l'aide du cône d'Abrams et V_{funnel} pour mesurer

l'étalement et le temps d'écoulement respectivement, ont été réalisés. L'évaluation du seuil de cisaillement et la viscosité plastique à l'aide d'un rhéomètre ont aussi été étudiées.

2. Matériaux et essais

2.1. Matériaux

Le ciment utilisé dans cette étude est un CEM I 42,5, d'une finesse de 3000 cm²/g et une densité de 3,15. Les propriétés chimiques et minéralogiques du ciment sont données dans le tableau 1.

Tableau 1. Propriétés du CEM I 42.5.

Composition chimique (%)									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF	RI
64,0	22,0	4,6	4,9	0,8	1,1	0,12	0,4	1,4	0,4
Composition minéralogique (%)									
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A			C ₄ AF		
62,8		21,3		1,8			14,1		

Un superplastifiant à base de polyéther-polycarboxylate a été utilisé avec une teneur en matières solides de 30% et une densité spécifique de 1,07 g/cm³. Pour la préparation des bétons autoplaçants, deux types de sables ont été utilisés: le sable siliceux (SS) de la région de Hassi Bahbah (Sud de l'Algérie) et le sable calcaire concassé (SC) de la carrière d'El-Hachimia (Algérie). Un gravier 3/8 (G1) et un gravier 8/15 (G2) de la carrière de concassage de Beni Slimane (Nord de l'Algérie). La densité apparente des gros agrégats (G1, G2) et du sable (SC, SS) étaient, respectivement de 2,62 ; 2,63 ; 2,54 et 2,63 et leurs absorptions étaient respectivement de 0,20% ; 0,30% ; 0,02 et 0,38%. Le sable de concassage a été tamisé pour enlever les fines de calcaire inférieures à 80 µm. Les propriétés chimiques des fines calcaires et sable de concassage sont données dans le tableau 2.

Le module de finesse et équivalent de sable pour les sables (SC) et (SS) étaient (3.15, 70%) et (0.98, 84%) respectivement. Le sable (SS) a été utilisé pour corriger le module de finesse du sable concassé (SC). La finesse du sable corrigé est $M_f = 2,5$.

Tableau 2. Analyse chimique du sable concassé et les fines calcaires.

(%) des Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O	SO ₃	Perte au feu
Sable concassé (SC)	4.51	1.09	0.54	50.68	1.01	-----	-----	-----	traces	41.04
Fines calcaires (FC)	1.78	0.79	0.34	54.3	0.20	-----	-----	2.8	-----	42.5

2.2. Essais

Tous les mélanges de BAP sont confectionnés selon la méthode d'Okamura [OKAM 03]. La composition de chaque mélange est donnée dans le tableau 3.

Tableau 3. Dosage et proportion des fines calcaires pour chaque mélange.

E/C = 0.4, S/M = 0.5 G/S = 0,8, Sp = 0,8					
Quantités (kg)	BAP0	BAP5	BAP10	BAP15	BAP20
Gravier 8/15	295	/	/	/	/
Gravier 3/8	443	/	/	/	/
Sable (SC)	600	570	540	510	480
% FC	0	5	10	15	20
FC	0	30	60	90	120
Sable (SS)	323	/	/	/	/
Ciment	490	/	/	/	/
E	196	/	/	/	/
SP	6,86	/	/	/	/

Les essais à l'état frais sont réalisés à l'aide du cône d'Abrams et le V-funnel, dont le but est de tester l'étalement et le temps d'écoulement. Pour déterminer, le comportement rhéologique des BAP, on a utilisé un rhéomètre rotatif type Heidolph- RZR 2102 Control Z. Ce rhéomètre est piloté à l'aide d'un logiciel.

3. Résultats

3.1 Propriétés à l'état frais

✓ Ouvrabilité

La figure 1, montre l'effet des fines calcaires sur le comportement des BAP à l'état frais. Il est clair que tous les mélanges ont le caractère d'un BAP conformément à la norme européenne EN 12350 [EN 10]. Cependant, l'augmentation du taux de fines dans le sable de concassage de 0 à 20%, provoque une diminution de l'étalement de 845 à 665 mm, et une augmentation du temps d'écoulement Tv-funnel de 4.72 à 5.87 secondes. La diminution de l'étalement peut s'expliquer par la demande en eau pour mouiller la surface des particules, en raison de la surface spécifique élevée des éléments fins dans le mélange. Cette observation a été remarquée par [BEN 12].

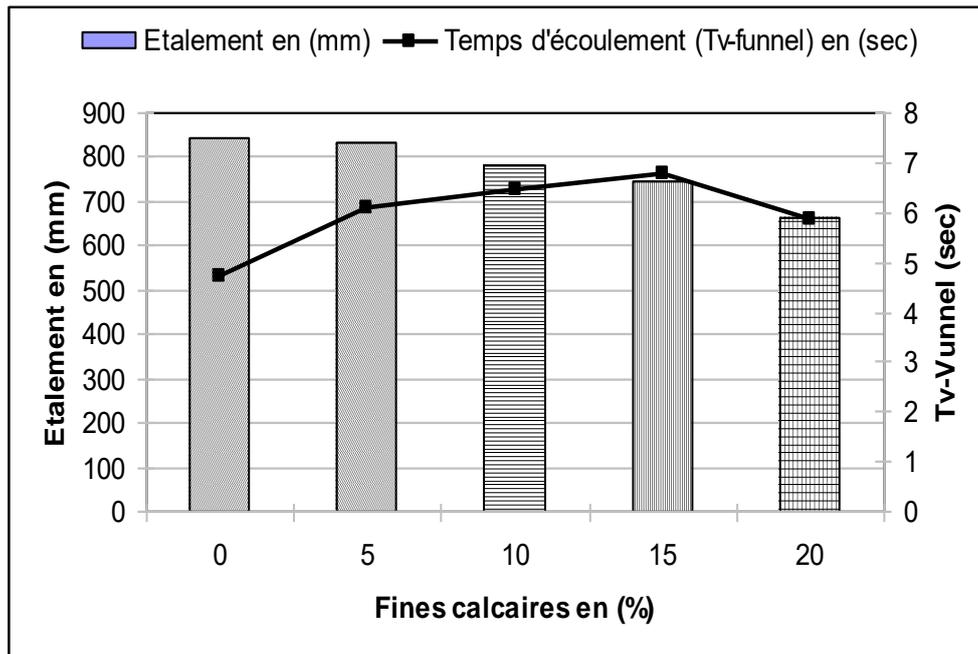


Figure 1. Variation de l'étalement et le temps d'écoulement Tv-Funnel en fonction des fines calcaires.

✓ Rhéologie

La figure 2, montre que tous les mélanges présentent un comportement viscoplastique Binghamien conformément aux différentes recherches [GRU 03, NIE 03, GEI 02]. La loi de comportement des BAP, s'écrit comme suit :

$$\tau = \tau_0 + \mu * \gamma \quad [1]$$

Où :

- τ (Pa) : la contrainte de cisaillement.
- τ_0 (Pa) : le seuil de cisaillement.
- μ (Pa.s) : la viscosité plastique.
- γ (1/s) : le taux de cisaillement.

D'après ces courbes on peut tirer les propriétés rhéologiques de chaque type de mélange, le seuil de cisaillement c'est le point d'intersection des courbes avec l'axe des Y, et la viscosité plastique c'est la tangente des courbes.

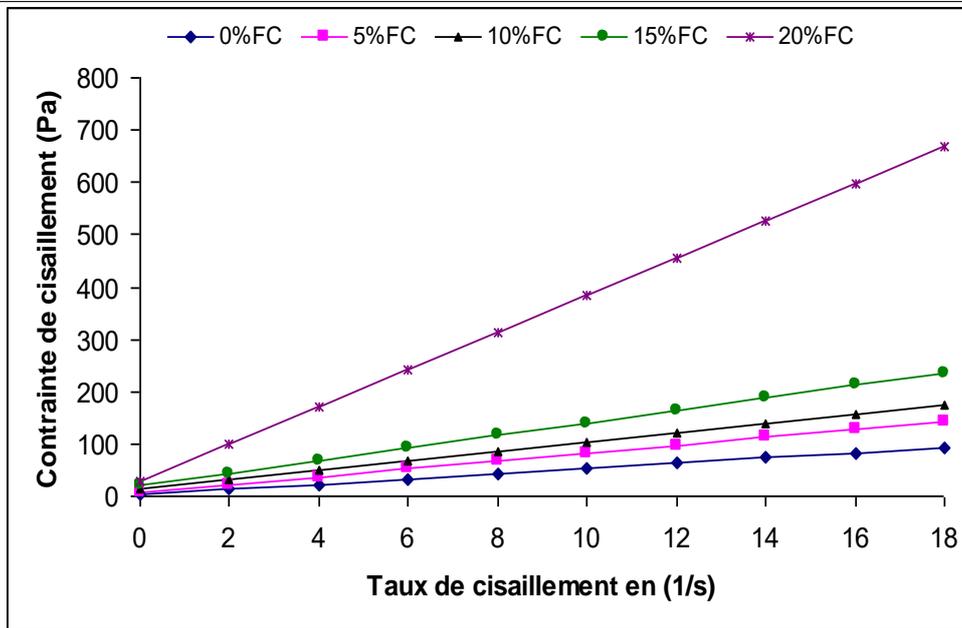


Figure 2. Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

La relation entre le seuil de cisaillement, et l'étalement, en fonction de la teneur des fines calcaires, est donnée par la figure 3. Cette comparaison a été utilisée par plusieurs chercheurs [DOM 99, MOU 04] afin de comprendre l'approche entre les deux paramètres physiques (seuil, et étalement). D'après cette figure, on remarque, que l'étalement est influencé par l'augmentation du taux de fines calcaires dans le sable de concassage, cette augmentation de la contrainte de cisaillement dû à l'augmentation du frottement intergranulaires et à l'augmentation de la demande en eau par les particule fines. Ces résultats ont conforté par les travaux de Domone et al [DOM 99.]

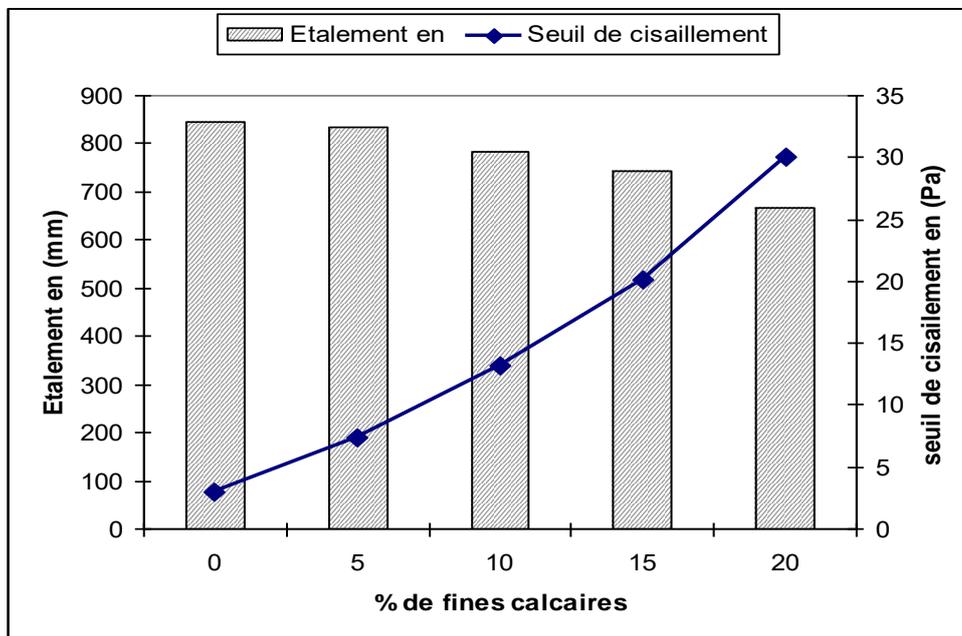


Figure 3. Relation entre le seuil de cisaillement et l'étalement.

La figure 4, illustre la relation entre la viscosité plastique (μ), et le temps d'écoulement (Tv-funnel). On remarque un comportement similaire entre μ et Tv-funnel. L'augmentation de la quantité des fines calcaires dans les mélanges de BAP de 0 à 15 %, provoque une augmentation de la viscosité plastique de 5 à 12 Pa.s, puis

une augmentation importante de 35.5 Pa.s, pour une teneur de fines de 20%. Ce comportement est dû principalement à l'augmentation de la demande en eau des BAP, et ensuite l'augmentation des frottements internes entre les particules du mélange. Salim et al [SAL 17], ont trouvé aussi que l'augmentation de la teneur de fines calcaires dans les mortiers de bétons contribue à l'augmentation des paramètres rhéologiques du mélanges.

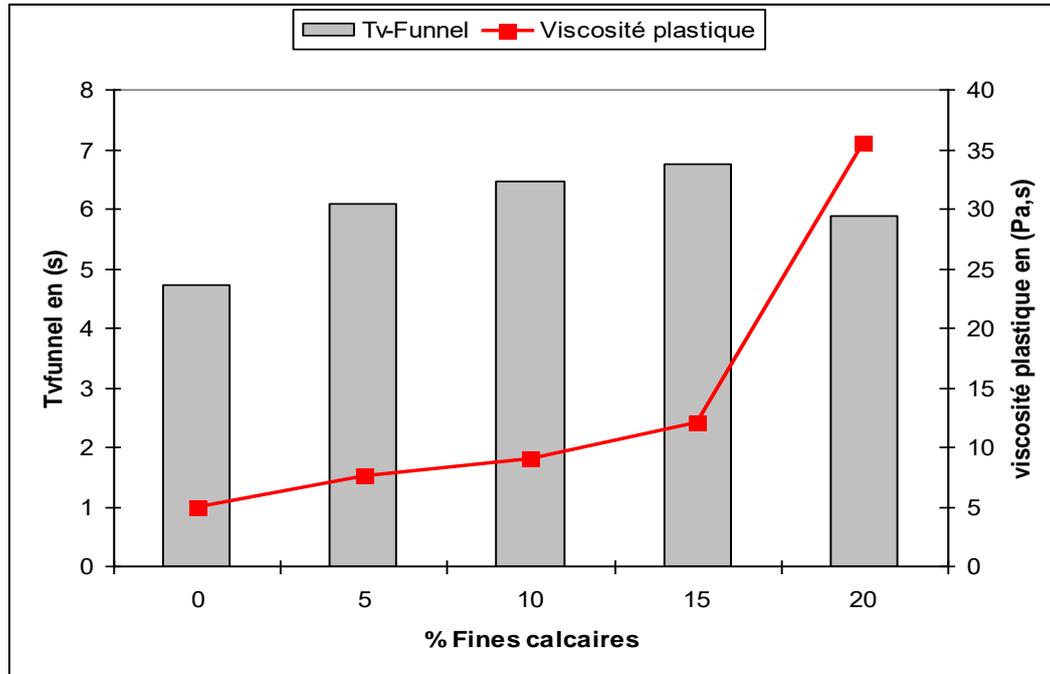


Figure 4. Relation entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement Tv-funnel.

4. Conclusion

Les fines calcaires, issues de sable de concassage, contribuent, à la diminution de l'étalement et à l'augmentation, du temps d'écoulement Tv-funnel, la viscosité plastique, et la contrainte de cisaillement des BAP. Les bétons autoplaçant à base de sable de concassage ont un comportement viscoplastique, Binghamien. La variation des paramètres rhéologiques (μ, τ_0) des BAP à base de sables de concassage suivent le même comportement viscoplastique. Donc il est possible de prédire le comportement des BAP à l'aide des essais classiques.

5. Bibliographie

- [ASS 02] Association française de Génie Civil (AFGC) « Bétons Auto-Plaçants Recommandations provisoires », Juillet 2002, 63 pages.
- [BEN 12] Benchaa B, El-Hadj Kadri, Lakhdar Azzouz, Said Kenai, Properties of self-compacting mortar made with various types of sand, *Cement and Concrete Composites* 34 (2012):1167–1173.
- [BEN 08] Benachour Y, Davy CA, Skoczylas F, Houari H. Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar. *Cem Concr Res* 38(2008):727–36.
- [BON 94] Bonavetti VL, Irassar EF. The effect of stone dust content in sand. *Cem Concrete Comp* 1994;24(3):580–90.
- [BOS 03] Bosiljkov VB. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cem Concr Res* 2003;33:1279–86.
- [DOM 99] Domone P.L., Jin J., Properties of mortar for Self-Compacting Concrete, Proceedings of the 1st International Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings (PRO 7), Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson Stockholm, Sweden, 1999, pp. 109 – 120.
- [ELH 15] El-Hadj Meziane, Karim Ezziane, Said Kenai, Abdelkader Kadri. Mechanical, hydration, and durability modifications provided to mortar made with crushed sand and blended cements, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29, Issue 18(2015):1987-2005.
- [EN 10] EN 12350-8. Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete –slump-flow test. European Committee for Standardization; 2010.

- [EN 10] EN 12350-9. Testing fresh concrete Part 9: self-compacting concrete – Vfunnel test. European Committee for Standardization; 2010.
- [FEL 07] Felekoglu B. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). *Resour. Conserv. Recycling* 2007:1–22.
- [GRU 03] Grünewald S., Walraven J.C., "Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49-58, 2003
- [KIK 13] Kirk Vance A. , Aditya Kumar B. , Gaurav Sant B.C, Narayanan Neithalath, The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash, *Cement and Concrete Research* 52 (2013) 196–207.
- [KDE 11] K. De Weerd, M.B. Haha, G. Le Saout, K.O. Kjellsen, H. Justnes, B. Lothenbach, Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 279–291.
- [NIE 03] Nielsson I., Wallewick O.H., "Rheological evaluation of some empirical methods – preliminary results", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 59-68, 2003.
- [GEI 02] Geiker M.R., Brand, Thrane L.N., Bager D.H., Wallevik O., " the effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self compacting concrete., *cement and concrete research.*, 32:11(2002):1791-1795..
- [NIE 03] Nielsson I., Wallewick O.H., "Rheological evaluation of some empirical test methods – preliminary results", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 59-68, 2003.
- [MEN 09] Menadi. B , S. Kenai, J. Khatib , A. Ait-Mokhtar, Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand, *Construction and Building Materials* 23 (2009):625–633.
- [MOU 04] Mouret M., Sbartai M., Picot J., "Caractérisation des grandeurs rhéologiques et d'ouvrabilité : recherche de corrélation multi-échelle", rapport de recherche, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Toulouse, 35 p., 2004.
- [OKAM 03] Okamura H. and Ouchi M. « Self-compacting concrete » *Journal of advanced Concrete Technology*, 2003, vol. 1, n°1, pp. 5-15.
- [OKAM 99] Okamura H. and Ouchi M., "Self-Compacting Concrete. Development, present use and future", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 1999, Stockholm, Sweden, pp. 3-14.
- [KEN 99] Kenai S, Benna Y, Menadi B. The effect of fines in crushed calcareous sand on properties of mortar and concrete. In: Swamy RN, editor. *International conference on infrastructure regeneration and rehabilitation*; 1999. pp. 253–61.
- [SAL 17] Salim S, Debieb F, Kadri E, Menadi B, Hamza S, Effect of Crushed Sand and Limestone Crushed Sand Dust on the Rheology of Cement Mortar, *Appl. Rheol.* 27 (2017) 14490.