

Fluidez de morteros cementíceos con arenas machacadas

Flowability in crushed sand mortar

O. A. Cabrera^(*), L. P. Traversa^(**), N. F. Ortega^(***)

Recepción/Received: 24-II-09
Aceptación/Accepted: 17-VI-09
Publicado online/Online publishing: 17-XII-10

RESUMEN

En el presente trabajo se plantea un estudio experimental de la fluidez de morteros basado en el contenido de vacíos de arenas machacadas, para comprender la influencia de la forma y textura superficial de los granos de arena y del contenido de polvo de las mismas sobre el estado fresco de morteros. Los resultados muestran la estrecha relación entre el contenido de vacíos entre granos y los volúmenes de pasta necesarios para iniciar el escurrimiento como un material continuo, la fluidez de los morteros, el contenido de agua para alcanzar una determinada fluidez, etc. El comportamiento evaluado se compara con resultados obtenidos aplicando el modelo de F. de Larrard (1, 2), permitiendo de este modo obtener mayor información de la influencia de la morfología de los granos de la arena sobre el estado fresco de los morteros.

Palabras clave: arena machacada, arena triturada, forma y textura superficial, estado fresco de morteros.

SUMMARY

The present experimental study explored the relationship between mortar flowability and the voids content in crushed sand to determine the effect of grain shape and surface texture as well as dust content on the behaviour of fresh mortar. The findings revealed a close correlation between voids content and the volume of paste needed for mortar to begin to flow as a continuous material, mortar flowability and the water content needed to attain a given flowability. The comparison of the empirical findings to the results obtained with the Larrard (1, 2) model provided further information on the effect of sand grain morphology on fresh mortars.

Keywords: *manufactured sand, crushed sand, shape and surface texture, fresh mortar.*

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de arenas machacadas o de machaqueo o trituradas tiene una marcada influencia sobre la fluidez de los morteros y del hormigón debido a las características

1. INTRODUCTION

The use of manufactured or artificial or crushed sand in mortar and concrete clearly affects flowability due to the morphological characteristics and dust content in this

^(*) Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (Olavarría, Argentina).

^(**) LEMIT (La Plata, Argentina).

^(***) Universidad Nacional del Sur (Bahía Blanca, Argentina).

morfológicas de las partículas y al contenido de polvo que presenta este tipo de árido fino. La forma y textura de las partículas del árido fino pueden ser evaluadas por dos tipos de métodos: unos basados en la observación y medición individual de las partículas (3-9), y otros, en la medición de alguna propiedad del material granular. En este último grupo se encuentra la determinación del porcentaje de vacíos entre partículas, el factor de empaque, la medición del tiempo que tarda en fluir el material granular a través de un orificio, etc. (10-15). Además, se debe tener en cuenta la vigencia en la bibliografía de la aseveración de B. Mather (16), respecto a que existen pocos trabajos que vinculan los métodos de evaluación de la forma y textura superficial con el comportamiento en estado fresco de morteros y hormigones.

La elección de un método de ensayo depende del tamaño de las partículas, por lo que en los áridos gruesos el ensayo sobre partículas resulta adecuado, mientras que los métodos que utilizan el material a granel son prácticos tanto para árido grueso como para el fino. La mayoría de los ensayos diseñados para áridos finos se basan en la medición del contenido de vacíos entre granos, y dos de ellos han sido normalizados por la ASTM (17, 18). Este tipo de ensayo muestra sensibilidad ante los cambios de forma y textura; y junto a clasificaciones descriptivas, como la establecida en la Norma BS 882 (19), resultan adecuados para ser empleados en el campo de la tecnología del hormigón. El ensayo descrito en la norma ASTM C-1252 (18) presenta la posibilidad de efectuarlo usando una granulometría constante e igual para varios áridos finos a fin de comparar su angularidad, e independizar el resultado de la distribución de tamaños.

Existen otros métodos con un grado mayor de sofisticación que emplean tomografía computada, microscopio electrónico de barrido, láser, procesamiento de imágenes, redes neuronales, fractales, o midiendo la resistencia al corte, etc., los que pueden resultar adecuados para trabajos de laboratorio pero son complejos para aplicar en obras (20-31). En general, el empleo de estos métodos se ve dificultado porque los mismos no han sido correlacionados con los métodos normalizados.

En cambio, en la bibliografía referida a las mezclas asfálticas aparece una importante información sobre métodos para evaluar la forma y textura del árido fino que se utilizan en el diseño de mezclas asfálticas. En este caso es necesario que el material mantenga su rigidez y resista el ahuellamiento (surco longitudinal a lo largo del camino bajo las bandas de circulación vehicular), y por ello la forma de las partículas del árido fino desempeña un rol más importante que la del árido grueso. El empleo de arenas naturales tiende a reducir la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas (32-34).

type of fines. The form and texture of fine aggregate particles can be evaluated with two types of methods: observing and individually measuring the particles (3-9) and measuring some property of the granular material. The latter group includes the determination of the inter-particle voids percentage, the packing factor and the time it takes the granular material to flow through a hole (10-15). In addition, as Mather (16) noted, very few studies can be found in the literature on the relationship between the methods for assessing shape and surface texture and the behaviour of fresh mortar and concrete.

The choice of a test method depends on particle size: in coarse aggregate the particle size test suffices, while bulk material methods are practical for both coarse and fine aggregate. Most tests designed for fines are based on measuring the inter-particle voids content and two such tests have been standardized by the ASTM (17, 18). Tests of this nature are sensitive to changes in shape and texture and, along with descriptive classifications such as set out in British standard BS 882 (19), are suitable for use in concrete technology. If conducted using a constant and equal particle size distribution, the test described in ASTM standard C-1252 (18) can be used to compare the angularity of several fine aggregates independently of that distribution.

Other more sophisticated methods that use computerized tomography, scanning electron microscopy, laser techniques, imaging, neuronal networks, fractals, and shear strength measurements may prove to be suitable for laboratory trials but are too complex for field work (20-31). As a rule, the use of such methods encounters obstacles because they have not been correlated to standardized methods.

In contrast, the literature on hot mix asphalt contains abundant information on methods for assessing the shape and texture of the fines used in the design of these materials. In this case the material must maintain its stiffness and resist rutting (formation of longitudinal grooves in a carriageway under the wheels of vehicles), a property in which fines play a more important role than coarse aggregate. The use of natural sand tends to lower rutting strength in hot mix asphalts (32-34).

A parte de la finura de los granos, las formas y texturas que se alejan de redondeada y lisa, incrementan el consumo de agua y/o pasta para alcanzar una determinada trabajabilidad. El incremento de la irregularidad de los granos lleva a un aumento en el número de puntos de contacto entre las partículas, disminuyendo el empaquetamiento del material granular, incrementando el contenido de vacíos, y por ende, el volumen de pasta de cemento necesario para rellenarlos.

Respecto al contenido de polvo, en el caso de que el mismo no sea plástico, se incorpora a la pasta de cemento, actuando como un filler. Trabajos previos muestran este efecto filler se manifiesta con polvos de diferentes orígenes mineralógicos, provocando el incremento de la resistencia mecánica a tempranas edades (35).

Por otra parte, el estado fresco de los morteros y hormigones se caracteriza por ser una suspensión acuosa con una muy alta concentración de partículas de diferentes tamaños y densidades, y se representa por el modelo de Bingham (36). En este modelo se definen dos variables para describir el comportamiento del "fluido", el *umbral de cizallamiento* y la *viscosidad plástica*, y general los ensayos disponibles evalúan una sola de ellas. La pasta de cemento lubrica, separa y a su vez mantiene unidas a las partículas de áridos. Entre las partículas se desarrollan tres tipos de fuerzas: las de gravedad que tienden a sedimentar los sólidos, las de atracción capilar debidas a la tensión superficial del agua en la red de capilares y las de Van der Waals que son de origen electrostático que pueden ser de atracción o de repulsión (37). La reología de la pasta es además particularmente compleja porque los granos de cemento poseen carga eléctrica sobre su superficie que tienden a formar grumos y no se dispersan fácilmente en agua; y también, porque durante y después del mezclado ocurren reacciones químicas y físicas que van incidiendo sobre el estado fresco de la mezcla.

Los ensayos desarrollados, siguiendo el modelo de Bingham, para describir la trabajabilidad de las mezclas puede considerarse deficiente en cuanto a que no poseen la sensibilidad suficiente para abarcar el rango existente entre consistencias secas y fluidas (38). Además, este tipo de ensayos no resultan ser baratos ni fáciles de llevar a obra, y su empleo no esta ampliamente difundido. Además, resulta casi imposible relacionar los resultados obtenidos en los diferentes métodos, y estos resultados obtenidos deben interpretarse en el contexto de cada método (36) dado que los valores absolutos de los parámetros reológicos dependen del tipo de instrumento utilizado.

Por tal motivo, en el presente trabajo se valora la vinculación entre la fluidez de los morteros y el contenido de vacíos entre las partículas de arena para comprender la influencia de la forma, textura y del contenido de polvo de diferentes tipos de arenas machacadas sobre el estado

In addition to grain fineness, non-round, unsmooth shapes and textures increase water and/or paste consumption to attain a given level of workability. Greater irregularity in grain shape leads to a larger number of inter-particle contacts. This in turn reduces particle packing, increasing the voids content and with it the volume of cement paste needed to fill them.

Any non-plastic dust is taken up as a filler in the cement paste. Prior studies showed that this filler effect is generated by dust irrespective of its mineralogical origin, raising early age mechanical strength (35).

Fresh mortar and concrete, in turn, consist of an aqueous suspension containing a very high concentration of particles of different sizes and densities, i.e., a Bingham plastic (36). This model defines two variables to describe the behaviour of the "fluid": shear threshold and plastic viscosity, although as a rule the trials available address only one of the two. The cement paste lubricates, separates and at the same time holds the aggregate particles together. Three types of forces are generated between particles: gravity, whereby the solids tend to settle, capillary attraction due to the surface tension in the water in the capillary network and electrostatic, van der Waals forces, which may cause attraction or repulsion (37). Paste rheology is particularly complex, moreover, because cement grains carry an electrical charge on their surface and therefore tend to form lumps that are not readily dispersed in water and because chemical and physical reactions take place during and after mixing that affect the fresh material.

The trials developed further to the Bingham model to describe mix workability have shortcomings insofar as they are not sensitive enough to cover the entire range of dry and fluid consistencies (38). Furthermore, since these trials cannot be inexpensively or readily conducted in the field, their use is infrequent. Another difficulty is that it is nearly impossible to inter-relate the findings obtained with different methods and these results must be interpreted in the context of each method (36), for the absolute values of rheological parameters depend on the type of instrument used.

For these reasons, the present study used a simple and inexpensive methodology and several types of crushed sand to determine the relationship between mortar flowability and voids content and thereby ascertain the effect of shape, texture and dust content on fresh

fresco, empleando una metodología sencilla y económica. Se evaluará la forma en que el contenido de vacíos se relaciona con el contenido de pasta para lograr el inicio de la fluidez del mortero y con el modo de escurrimiento posterior. Los comportamientos evaluados por este trabajo se comparan con el propuesto para hormigones con arenas naturales por F. de Larrard (1, 2). En este último modelo se establece el *espesor máximo de pasta cementícea*, e_m , como una función de la concentración relativa de sólidos; y para un determinado volumen de pasta el espesor de la misma será mayor cuando las partículas tiendan a ser más esféricas, y de este modo las partículas se moverán más libremente. Además, la resistencia del hormigón o mortero se incrementa con el decrecimiento de e_m .

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales, dosificaciones y metodología: Se elaboraron dos series de morteros utilizando cuatro arenas machacadas de diferentes orígenes mineralógicos: calcítico, cuarcítico, dolomítico y granítico, con similares granulometrías y contenido de polvo (ver Tabla 1), y un cemento portland fillerizado (IRAM CPF-40). La dosificación de cada serie de morteros se basó en distintas relaciones *pasta cementícea/árido fino* (pc/af), compuesta por una cantidad constante de arena (1.500 gramos) con la posterior adición de distintos volúmenes de pasta (V_p).

En la primera serie de morteros se considera solamente el volumen de pasta de cemento como material "lubricante" de los granos de arena ($a/c = 0,40$); y en la otra, se incluye al polvo de roca (p) que contienen las arenas como parte integrante de la pasta de modo que la relación $a/(c+p)$ sea 0,40, en peso. Adicionalmente, como referencia se elaboraron otros morteros con arena granítica sin polvo (AT), con relación a/c 0,40.

En la Tabla 1 se indica las características físicas, y la clasificación de la forma y textura superficial de las partículas de las arenas en estudio, de acuerdo con la Norma BS 882 (19). Con respecto a los porcentajes de vacíos que se presentan entre paréntesis se trata del valor correspondiente a la fracción superior a 75 μm , es decir de la arena sin polvo (lavada).

Como metodología se han utilizado los ensayos de porcentaje de vacíos del árido fino (39) y de fluidez o de escurrimiento de los morteros (40). Este último ensayo se eligió ya que proporciona información confiable sobre la consistencia del mortero y su tendencia a la segregación. En el caso de utilizar arenas con polvo, los valores del contenido de vacíos serán menores para las mismas arenas, respecto al caso en que se determina dicha propiedad sobre la fracción retenida en el tamiz de 75 μm .

mortar. Voids content was studied for its possible relationship to the paste content needed for the mortar to begin to flow and the subsequent spread pattern. The behaviour observed in this study was compared to the model proposed by Larrard (1, 2) for concrete made with natural sand. This model establishes the maximum thickness of cementitious paste, e_m , on the grounds of the relative concentration of solids. The more spherical the particles, the greater the thickness of a given volume of paste and the greater the freedom of particle movement. Concrete and mortar strength decline, moreover, with declining e_m .

2. MATERIALS AND EXPERIMENTAL

Materials, dosage and methodology: Two series of mortars were prepared with filler cement (IRAM CPF-40) and four types of crushed sand with different mineralogical origins (limestone, sandstone, dolomite and granite) but similar particle size distributions and dust contents (see Table 1). The dosage of each series of mortars was based on different cementitious paste/fine aggregate (cp/s) ratios, consisting of a constant amount (1500 g) of sand, to which different volumes of paste were added (V_p).

In the first series of mortars, the cement paste was regarded to be the sole "lubricant" for the grains of sand ($w/c = 0.40$), while in the other, the rock dust (d) contained in the sand was considered to be an integral part of the paste. In this case the $w/(c+d)$ ratio was also 0.40, by weight. Other mortars were also prepared with dustless granite sand (CS) and a w/c ratio of 0.40.

Table 1 gives the physical characteristics and the British standard BS 882 (19) classification of shape and surface texture of the sand particles studied. The values in parenthesis shown after the voids percentage denote the fraction larger than 75 μm , i.e., the dustless or washed sand.

Accepted methodology includes the determination of the fine aggregate voids percentage (39) or conducting mortar flowability or spread trials (40). The latter was chosen because it provides reliable information on mortar consistency and its tendency to segregate. Where sands with dust are concerned, the voids content is smaller for a given sand than for the fraction of that sand retained in the 75 μm sieve.

Tabla 1 / Table 1
Clasificación de la forma y textura, y otras características de los áridos finos.
Fine aggregates classification of shape and texture, and other characteristics.

Árido fino triturado / Crushed sand	Calcítica / Limestone	Cuarcítica / Sandstone	Dolomítica / Dolomite	Granítica / Granite	Granítica lavada / Washed Granite (AT/CS)
Módulo de finura/ Fineness modulus	3.48	3.32	3.38	3.15	3.33
Contenido de polvo / Dust content, (%)	10.6	7.3	13.3	10.7	0
Densidad / Density	2.68	2.62	2.77	2.69	2.68
Peso unitario suelto / Loose unit weight, (kg/m ³)	1528	1546	1551	1587	1535
Peso unitario compactado/ Compacted unit weight (kg/m ³)	1715	1782	1745	1829	1653
Vacios arena compactada / Voids in compacted sand, (%)	36 (40)	32 (36)	37 (42)	32 (36)	(37.8)
Vacios arena suelta / Voids in loose sand, (%)	43 (44)	41 (44)	44 (48)	41 (42)	(42.3)
Forma de las partículas / Particle Shape, (BS 882)	Angular / Angular	Angula r/ Angular	Alongada / Elongated	Angular / Angular	Angular / Angular
Textura superficial / Surface Texture, (BS 882)	Rugosa / Rough	Granulosa / Granular	Rugosa / Rough	Cristalina / Crystalline	Cristalina / Crystalline

(x)% vacíos de la fracción retenida en el tamiz de 75 µm. / Voids of fraction retained in sieve of 75 µm.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La presente metodología experimental ha sido empleada previamente en morteros elaborados con arenas de partículas angulares y textura rugosa, donde las mismas se reemplazaron por partículas redondeadas y lisas en porcentajes de 0, 25, 50, 75 y 100 (41). Dichas experiencias han mostrado como influyen las diferentes variables en el comportamiento reológico de los morteros, y ahora, en el presente trabajo se amplían los estudios para evaluar el comportamiento con arenas machacadas de diferentes mineralogías.

En la Figura 1 se muestra los resultados experimentales de la fluidez (F) de los morteros realizados con distintas arenas machacadas en función del volumen de pasta, para relaciones a/c 0,40 elaborados con 1.500 gramos de diferentes arenas machacadas; mientras que en la Figura 2 se presentan los resultados experimentales de la fluidez (F) de los morteros realizados con distintas arenas machacadas en función del volumen de pasta, para relaciones $a/(c+p)$ 0,40. En este segundo caso, los morteros fueron dosificados de modo que el contenido de arena retenida en el tamiz de 75 µm fuese constante e igual a 1.500 gramos.

El eje de las abscisas tiene doble escala, en el superior se indica la relación pc/af , en peso, y en el inferior, la relación volumen de pasta de cemento cada 1.500 gramos de arena. En las mismas se indica, a modo de referencia, la recta correspondiente a los morteros con arena AT, machacada granítica y sin polvo, con relación a/c 0,40.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

The methodology used here was applied previously in mortars prepared with sand having angular, roughly textured particles which were subsequently replaced with 0, 25, 50, 75 and 100% smooth, rounded particles (41). These experiences showed how different variables affected the rheological behaviour of mortars. The present study enlarged on the previous work to assess the behaviour with crushed sand of differing mineralogical origin.

Figure 1 shows flowability (F) for mortars containing 1500 grams of different types of crushed sand versus paste volume, prepared with w/c ratios of 0.40, while Figure 2 shows the same relationship for the mortars prepared with different types of crushed sand and $w/(c+d)$ ratios of 0.40. In the latter case, the mortars were dosed so that the constant 1500 grams of sand used was sand retained on the 75 µm sieve.

The abscissa axis has a double scale: the top shows the cp/s ratio by weight and the bottom scale the cement paste volume per 1500 grams of sand. The linear curve for mortars prepared with dustless crushed granite sand, AT, and a w/c ratio of 0.40 is also shown, by way of reference.

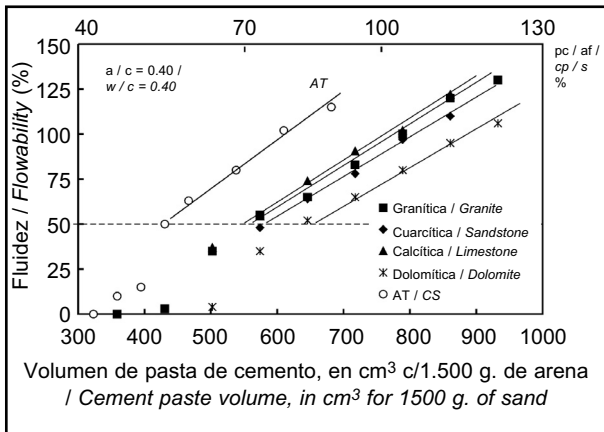


Figura 1. Relación entre la fluidez y el volumen de pasta de cemento, para morteros con diferentes arenas machacadas y relación a/c 0,40 ($R^2=0,99-0,98$).

Figure 1. Flowability versus cement paste volume for mortars made with different types of crushed sand and a w/c ratio of 0.40 ($R^2=0.99-0.98$).

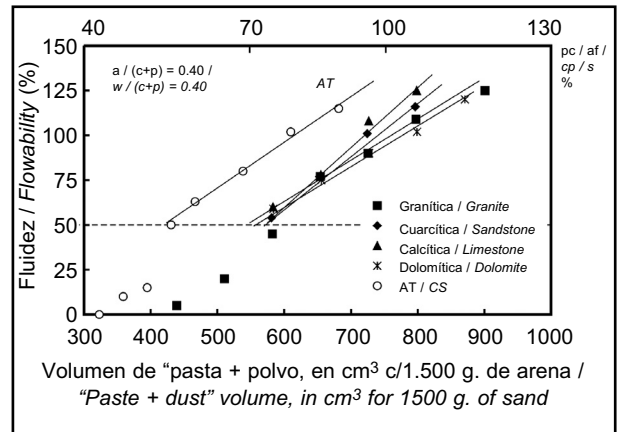


Figura 2. Relación entre la fluidez y el volumen de "pasta+polvo", para morteros con diferentes arenas machacadas y relación a/(c+p) = 0,40 ($R^2=0,96-0,99$).

Figure 2. Flowability versus cement paste volume for mortars made with different types of crushed sand and a w/(c+d) ratio of 0.40 ($R^2=0.96-0.99$).

En la Tabla 2 se muestran los volúmenes de vacíos para muestras de 1.500 gramos de las distintas arenas en estados suelto y compactado (V_{as} , V_{ac}), los volúmenes de pastas necesarios para una fluidez del 100% obtenidos de las Figuras 1 y 2, y el espesor máximo de pasta calculado de acuerdo con el modelo de F. de Larrard para la serie de a/c 0,40 (obtenidos de la Figura 6), para una fluidez del 100% (1, 2). En las columnas 4ª y 5ª de la Tabla 2 se indica el contenido de pasta o de "pasta+polvo" referido al peso total del mortero.

Table 2 shows the loose and compacted (V_{al} , V_{ac}) voids volumes for 1500 gram samples of the different sands, the paste volumes needed to reach 100% flowability (from Figures 1 and 2), and the maximum paste thickness calculated with the Larrard model for the w/c = 0.40 series (taken from Figure 6), for 100% flowability (1, 2). Columns 4 and 5 of Table 2 show the paste or "paste+dust" content as a percentage of total mortar weight.

Tabla 2 / Table 2
Volúmenes de vacíos de las arenas y de las pastas para F = 100%, en cm³.
Voids volume of sands and pastes for F = 100%, in cm³.

Tipo de Arena / Sand Type	Volumen de vacíos de la arena / Voids volume of sand (muestra / sample: 1500 g)		Volumen de pasta para F=100% / Volume of paste for F=100%		Espesor máximo de pasta (mm) para F=100% / Maximum thickness of paste (mm) for F=100%
	Vas	Vac	Pasta a/c = 0.40 / Paste w/c = 0.40	Pasta+polvo a/(c+p)=0.40 / Paste+dust w/(c+d)=0.40	
Granítica / Granite	410.5	319.8	790 (50.4%)	780 (50.7%)	0.37
Cuarcítica / Sandstone	401.8	315.9	810 (48.7%)	730 (51.3%)	0.41
Calcítica / Limestone	440.3	368.6	770 (48.2%)	715 (50.0%)	0.33
Dolomítica / Dolomite	496.2	389.3	895 (51.0%)	800 (53.8%)	0.36
AT / CS	414.0	344.0	615 (44.4%)	-	0.22

Porcentaje entre paréntesis: contenido de pasta respecto al peso de mortero. / Percentages in parentheses: paste content by mortar weight.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El contenido de agua, la relación a/c , y la razón árido/cemento son los principales factores que influyen sobre la trabajabilidad y la fluidez de los morteros, y están íntimamente relacionados entre sí (42). El agua es la principal factor que gobierna la trabajabilidad y un incremento de la misma para producir mezclas trabajables no sólo afecta a la resistencia al incrementar la porosidad, sino también favorece la segregación y exudación, y disminuye la durabilidad del material. La relación a/c indica la viscosidad o la capacidad de lubricación de la pasta cementícea. En casos extremos, la pasta muy fluida puede segregarse del árido, o sino, pastas muy secas no alcanzan a cubrir las partículas resultando mezclas sin cohesión. En cambio, la razón árido/cemento determina la separación entre las partículas de árido, cuanto menor sea esta relación existirá una menor fricción entre ellas que favorecerá la compactación. Además, sobre la trabajabilidad influyen las características físicas de los áridos (especialmente en los áridos de machaqueo), el tipo y finura del cemento, la presencia de aditivos, etc.

4.1. Influencia del tipo de arena sobre la fluidez de los morteros

En la citada Figura 1, puede verse que el volumen de pasta de cemento para el comienzo del escurrimiento del mortero como un material continuo y sin oquedades ($F \approx 50\%$), V_o , presenta diferencias relacionadas con las formas y texturas de las partículas, y los contenidos de polvo de los áridos finos (entre 550 y 635 $\text{cm}^3/1.500$ gramos de arena). El V_o podría denominarse "umbral de fluidez" dado que a partir de ese valor el comportamiento resulta lineal, y se puede describir la fluidez de los morteros con la siguiente ecuación [1], en función de la pendiente ($\text{tg}\alpha$) y de los volúmenes de pasta V_o y V_p :

$$F (\%) = 50 + (V_p - V_o) \text{tg}\alpha \quad [1]$$

Los morteros con arena calcítica (caliza) resultan menos consistentes, y los que contienen arena dolomítica (con mayor angularidad, ver Tabla 1) poseen una menor facilidad de escurrimiento, pudiéndose asociar estas diferencias también a las características físicas de las partículas y al tipo y finura del polvo de roca que contienen.

En la Figura 1 se incluye como referencia la recta correspondiente a morteros con 100% de arena machacada granítica lavada AT, entonces puede plantearse que la presencia de polvo en los morteros con arenas machacadas es la principal causa por la cual todas las rectas quedan ubicadas hacia la derecha de la curva de la AT, debido al incremento de la superficie específica del material granular.

4. DISCUSSION

The water content, w/c and aggregate/cement ratios, the main determinants of mortar workability and flowability, are closely inter-related (42). Water is the predominant governing factor in workability and any increase in water content not only has an adverse effect on concrete and mortar strength, but also favours segregation and bleeding, thereby reducing durability. The w/c ratio is a measure of cementitious paste viscosity or lubrication potential. At the extremes, a very fluid paste may segregate from the aggregate, while in overly dry pastes not all the particles are covered and therefore fail to bond. The aggregate/cement ratio, in turn, determines the separation between the aggregate particles. The smaller the ratio, the lower the friction among them. This favours compaction. Workability is also affected by the physical characteristics of the aggregate (especially crushed aggregate), cement type and fineness and the presence of admixtures.

4.1. Effect of type of sand on mortar flowability

As Figure 1 shows, the volume of cement paste needed for the mortar to begin to spread as a continuous material with no cavities ($F \approx 50\%$), V_o , differs depending on particle shape and texture and the fines dust content (which may range from 550 to 635 $\text{cm}^3/1500$ grams of sand). V_o might be regarded to be the "flowability threshold", for mix behaviour is linear starting at that point. Hence, mortar flowability can be described in terms of the slope of the linear curve ($\text{tg}\alpha$) and paste volumes V_o and V_p , as follows [1]:

Mortars with limestone sand have a lower consistency, while mixes with dolomite (more angular, see Table 1) spread less readily. These differences can also be associated with the physical characteristics of the particles and type and fineness of their rock dust.

Figure 1 shows the linear curve for mortars with 100% crushed and washed granite sand, AT, by way of reference. The presence of dust in mortars containing crushed sand may therefore be thought to be the primary reason that all the lines plotted are located to the right of the AT curve, as a result of the increase in specific surface of the granular material.

Con los resultados de la Figura 1, y teniendo en cuenta el coeficiente de determinación R^2 obtenido, se puede inferir en principio que existe una relación lineal entre el V_o y los volúmenes de vacío de la fracción de las arenas machacadas $> 75 \mu\text{m}$ (Figura 3). Según los datos experimentales se observa para la serie a/c 0,40 que a medida que se incrementa la angularidad de los granos de arena (medida por el % de vacíos de la fracción de arena $> 75 \mu\text{m}$), el valor de V_o aumenta, lo cual se vincula con la mayor fricción entre los granos y la presencia de polvo. Para la otra serie, el valor de V_o se mantiene prácticamente constante. En cambio, el comportamiento de los morteros con AT se aparta de las restantes arenas machacadas por no contener polvo, y además, posee un menor valor del contenido de vacíos en estado suelto.

Por otra parte, se observa que la pendiente de las rectas "fluidez- V_p " de la Figura 1 guardan, en principio, una relación lineal con el contenido de vacíos de la arena para las dos series de morteros (Figura 4), mostrando un decrecimiento de la tangente con el incremento del contenido de vacíos. En este caso, los morteros con AT se aproximan a los morteros $a/c = 0,40$, en los cuales tampoco se incluye el polvo en la arena en la pasta.

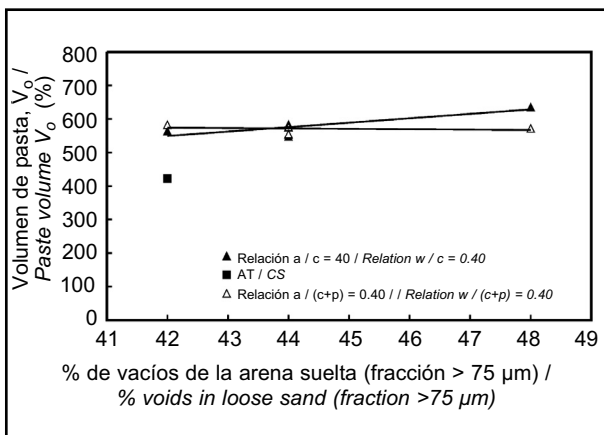


Figura 3. Relación entre el contenido de vacíos de la arena y el volumen V_o ($R^2=0,77$).

Figure 3. Voids content in sand versus volume V_o ($R^2=0.77$).

De la Figura 2 se deduce que el umbral de pasta, V_{α} , para el escurrimiento del mortero como un continuo, es prácticamente independiente del tipo de arena ($560 \pm 15 \text{ cm}^3/1.500$ gramos de arena), ya que no se considera al polvo como integrante del árido fino. A partir de este umbral la forma y textura de cada tipo de arena influye de modo diferente en el comportamiento reológico posterior.

Efectuando una comparación entre las dos series de morteros (ver Tabla 2) se puede concluir que la serie con relación a/c 0,40 presenta volúmenes de pasta, para alcanzar una fluidez del 100%, superiores a la otra serie

Given the results shown in Figure 1 and the determination coefficient, R^2 , V_o and the voids volume in the crushed sand fraction $> 75 \mu\text{m}$ can be seen to be linearly related (Figure 3). The experimental data for the $w/c = 0.40$ series showed that V_o rose with sand grain angularity (measured as the per cent of voids in the sand fraction $> 75 \mu\text{m}$). This was associated with the greater friction among the grains and the presence of dust. In the other series, the value of V_o remained practically constant. The mortars prepared with AT behaved differently from the other sand-containing mixes due to the absence of dust and their lower loose voids content.

In another vein, the slope of the V_p flowability curves in Figure 1 declined linearly with rising voids content in the sand in both series of mortars (Figure 4). In this case, the AT mortars and the $w/c = 0.40$ mixes, in which the dust from the sand was not included in the paste either, behaved similarly.

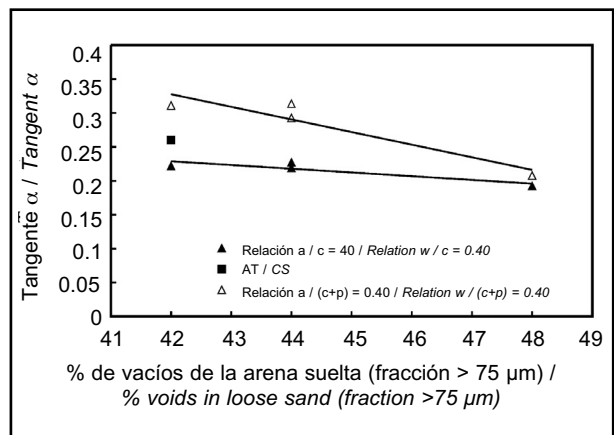


Figura 4. Relación entre el contenido de vacíos de la arena y la tangente α ($R^2=0,79-0,88$).

Figure 4. Voids content in sand versus tangent α ($R^2=0.79-0.88$).

Figure 2 shows that the paste threshold, V_{α} , required for the mortar to spread as a continuous paste was essentially independent of the type of sand used ($560 \pm 15 \text{ cm}^3/1500$ grams of sand), since the dust is not regarded to form part of the fines. After that threshold value, the shape and texture of each type of sand affected subsequent rheological behaviour differently.

A comparison of the two series of mortars (see Table 2) revealed that the $w/c = 0.40$ series required larger volumes of paste to reach 100% flowability than the other series ($w/(c+d) = 0.40$) because of the larger

($a/(c+p) = 0,40$), debido la mayor superficie específica aportada por el polvo al considerarlo como integrante de la arena. Los volúmenes de pasta son en promedio 1,9 y 2,4 veces los volúmenes de la arena suelta y compactada respectivamente, para obtener una fluidez del 100%. En el otro caso, para la relación $a/(c+p) 0,40$, estos valores son menores, 1,7 y 2,2 veces.

4.2. Relación entre la fluidez y el grado de colmatación

Para relativizar y comparar el comportamiento de los morteros, y poder determinar el esquema de movilidad de los mismos, los volúmenes de pasta se refirieron al volumen de vacíos correspondiente a 1.500 gramos de arena suelta (V_{as} , ver Tabla 2). Esta relación puede denominarse *grado de colmatación del mortero*, GC_m , y representa el grado de llenado de los vacíos entre partículas de arena o el exceso de pasta (*overfill*) en caso que la misma supere el mencionado contenido de vacíos [2].

$$GC_m = 100 \cdot (V_{pasta+polvo} / V_{as}) \quad [2]$$

En la Figura 5 se muestran todos los resultados de las dos series de morteros, donde los valores se han referido al V_{as} de la fracción de arena retenida en el tamiz de 75 μm , empleando la ecuación [2]. En dicha Figura, para simplificar, se han dibujado las 4 rectas "envolventes" de las 2 series de morteros, y se incluye además, a modo de comparación, la recta correspondiente al mortero con arena machacada AT con relación $a/c 0,40$.

Los valores de la serie de morteros con $a/(c+p) 0,40$ tienden a agruparse en una zona con un rango de $\pm 15\%$ de fluidez, zona en la que también se ubica la recta correspondiente a los morteros con AT. Hacia la derecha del gráfico se ubican los valores de la serie con $a/c 0,40$, en un rango de $\pm 9\%$. Si bien en ambas series de morteros se analiza el grado de colmatación incluyendo al polvo, los morteros con $a/c 0,40$ resultan tener una menor fluidez relativa; esta diferencia en el comportamiento se debe a que en este caso le corresponde una relación $a/(c+p)$ más baja, $0,34 \pm 0,02$ al considerar el aporte adicional del polvo contenido en las arenas.

Este análisis indica que el contenido de agua y la cantidad de materiales finos ($< 75 \mu m$) influye en la reología del mortero de modo que cuanto mayor es la relación $a/(c+p)$, mayor es el poder lubricante, expresado por el menor valor de V_o y la mayor pendiente de las rectas. Y se destaca para las dos series de morteros el importante rol que cumple en la reología del mortero el volumen de vacíos de la arena. Observándose que una vez que se cubrió con pasta el volumen de vacíos de la arena los

specific surface involved, a result of regarding the dust to form part of the sand. On average, the paste volumes needed to attain 100% flowability were 1.9 and 2.4 times the volumes of loose and compacted sand, respectively. In the other series, where the ratio was $w/(c+d) = 0.40$, these values were smaller: 1.7 and 2.2 times, respectively.

4.2. Relationship between flowability and degree of fill

To ensure mortar comparability and determine mobility patterns, the paste volumes used were referred to the voids volume in 1500 grams of loose sand (V_{al} , see Table 2). This ratio, which might be called the degree of fill, DF_m , indicates the degree to which the voids between sand grains are filled or overfilled (when the amount of paste exceeds the voids content) [2].

Figure 5 shows all the results for the two series of mortars. The values are referred to the V_{al} of the sand fraction retained on the 75 μm sieve, using [2]. For reader comprehension, the four "degree of fill" linear curves for the two series of mortars are plotted on the figure, which also includes the curve for crushed sand mortar, AT, with a w/c ratio of 0.40, by way of comparison.

The values for the $w/(c+d) = 0.40$ series tended to cluster in an area with a flowability range of $\pm 15\%$, inside which the AT mortar curve was also located. The values for the $w/c = 0.40$ series, located to the right of that area, remained within a range of $\pm 9\%$. While the dust content was included to analyze the degree of fill in both series, the $w/c = 0.40$ mortars were relatively less fluid. This difference in behaviour was due to the fact that in this case their $w/(c+d)$ ratio was lower, at 0.34 ± 0.02 , a result of including the dust in the sand.

This analysis indicates that the water content and amount of fines ($< 75 \mu m$) impact mortar rheology: the higher the $w/(c+d)$ ratio, the greater is the lubricating capacity, expressed as a lower V_o value and steep slope of the linear curves. Another important factor in mortar rheology for both series is the voids volume in the sand. Note that once the paste volume equals the voids volume in the sand, any further amounts proportional to such voids volume have an essentially similar effect on

incrementos de pasta, proporcionales al volumen de vacíos, tienen una influencia prácticamente similar en la fluidez independientemente del tipo mineralógico de arena machacada utilizada.

flowability, regardless of the mineralogy of the crushed sand used.

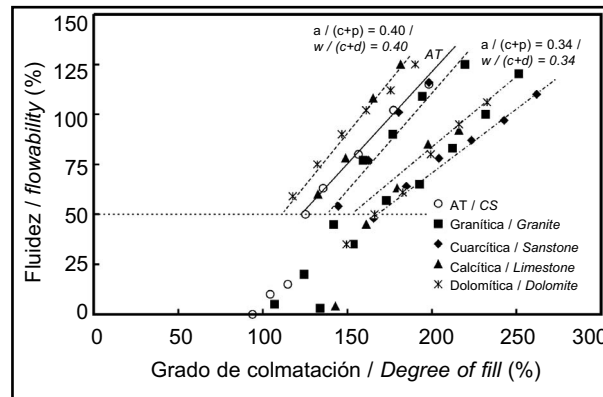


Figura 5. Comportamiento reológicos de morteros con el grado de colmatación, considerando el polvo ($R^2=0,96-0,99$).
 Figure 5. "Mortar flowability versus degree of fill, including dust ($R^2=0.96-0.99$)".

Los estudios y experiencias realizadas brindan una importante información sobre la reología de los morteros en estado fresco cuando se trata de arenas machacadas con granos de diferentes formas y texturas, acompañados por un contenido no despreciable de polvo. Además, resulta significativo el rol del contenido de vacíos de la arena en la reología de la mezcla.

The studies and experiments conducted provide substantial information on the rheology of fresh mortars made with crushed sand containing grains of different shapes and textures, along with a significant dust content. The findings reveal that the voids content in the sand plays a prominent role in mix rheology.

4.3. Efecto del espesor máximo de pasta sobre la reología de los morteros

4.3. Effect of the maximum paste thickness on mortar rheology

La influencia de la relación *pasta/árido* sobre la reología de la mezcla se puede analizar determinando el espesor promedio de la película de pasta lubricante, e_p (cm), que envuelve a las partículas (43). Este espesor se puede calcular teóricamente del siguiente modo: [3]

The effect of the paste/aggregate ratio on mortar rheology can be analysed by determining the mean thickness of the lubricating film paste, e_p (cm), that surrounds the particles (43). This thickness can be calculated theoretically from the following expression [3]:

$$e_p = (V_p - V_v) / S_a \quad [3]$$

donde: V_p es el volumen total de pasta (cm^3), V_v es el volumen de vacíos del esqueleto granular (cm^3) y S_a es la superficie envolvente del total de partículas del árido a recubrir con pasta (cm^2). Si el volumen de pasta disponible es igual a V_v , no se formaría la película, siendo entonces muy difícil la manipulación y compactación de la mezcla.

where: V_p is the total volume of paste (cm^3), V_v the volume of voids in the granular skeleton (cm^3) and S_a the entire surface area of the aggregate particles to be covered with paste (cm^2). If the volume of paste available is equal to V_v , no film is formed, making the mix very difficult to handle and consolidate.

En ese mismo sentido, y en la búsqueda de optimizar las mezclas de hormigones de alta performance, entre otras variables se ha estudiado la influencia del exceso de pasta (*overfill*) y del espesor de la pasta sobre la resistencia. La optimización de las mezclas está dirigida a incrementar la resistencia mecánica y la estabilidad volumétrica, y

In this same line and with a view to optimizing high performance concretes, the effect on strength of overfill and paste thickness, among others, were studied. Mix optimization aims to enhance mechanical strength and volumetric stability, as well as to lower concrete costs. Larrard's model defines maximum paste thickness, e_{m_r} to

a reducir el costo del hormigón. En el modelo de F. de Larrard se define como *espesor máximo de pasta*, e_m , a un parámetro que representa la distancia entre dos partículas de tamaño D , suponiendo que todas las partículas están rodeadas por una capa de pasta cuyo espesor es proporcional al diámetro de las mismas (1, 2). El concepto de espesor máximo de pasta incorpora los efectos del volumen y tamaño máximo del árido, pero no el de la naturaleza de la roca. La resistencia del hormigón se incrementa con el decrecimiento del e_m , en mm, el que se puede evaluar empleando la ecuación [4]:

$$e_m = D \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad [4]$$

donde: g^* es la densidad de empaque del árido $[(\text{kg}/\text{m}^3)/(\text{kg}/\text{m}^3)]$, g es el volumen de árido en la mezcla $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ y D es el tamaño máximo del árido, en mm (corresponde al tamiz por el que pasa el 90% del material).

En este modelo, entonces, la relación g/g^* es una expresión de la concentración relativa de sólidos. Para un determinado volumen de pasta el espesor de la misma será mayor cuando las partículas tiendan a ser más esféricas, y de este modo las partículas se moverán más libremente.

La aplicación del modelo de F. de Larrard a los morteros elaborados con arenas machacadas, es decir, aplicando la ecuación [4] dio origen a las Figuras 6 y 7. En el caso de los morteros con relación a/c 0,40 muestra que cada tipo de arena necesita un mínimo valor del espesor máximo de pasta para comenzar a fluir (Figura 6). Después, una vez que la pasta cubrió las partículas los incrementos de pasta tienen efectos similares, independientemente del tipo de mineralogía.

De las arenas machacadas, la forma y textura (reflejada en la angularidad) y el contenido de polvo, inciden fuertemente en el estado fresco de las mezclas. En todos los casos no siempre estas dos variables tienen igual peso relativo. El volumen de pasta V_o para que el mortero comience a fluir como un cuerpo continuo cuando las arenas de diferentes orígenes minerales contienen polvo, es diferente en cada caso y tiene una marcada relación con la superficie específica del árido. En cambio, el espesor máximo de pasta es prácticamente independiente del origen mineralógico, es decir, que el espesor de pasta debe tener un valor aproximadamente igual para comenzar a fluir, por el hecho de que las partículas menores de $75 \mu\text{m}$ en las proporciones que se encuentran en estas arenas repercuten muy fuertemente sobre el valor de la superficie específica.

be a parameter that represents the distance between two particles of size D , assuming that all the particles are surrounded by a layer of paste whose thickness is proportional to their diameter (1, 2). The maximum paste thickness concept covers the effects of aggregate volume and maximum size, but not the effect of rock mineralogy. Concrete strength grows with declining e_m , in mm, which can be found with [4]

where: g^ is the compacted density of the aggregate $[(\text{kg}/\text{m}^3)/(\text{kg}/\text{m}^3)]$, g is the volume of aggregate in the mix $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ and D is the maximum aggregate size in mm (i.e., the sieve size that retains only 10% of the material).*

In this model, then, the g/g^ ratio expresses the relative concentration of solids. For a given volume, the more spherical the particles, the thicker the paste, which means that the particles move more freely.*

Figures 6 and 7 were generated by applying Larrard's model to mortars prepared with crushed sand, i.e., applying [4]. For the $w/c=0.40$ mortars, Figure 6 shows that each type of sand needs a distinct minimum paste thickness to be able to begin to flow. Once all the particles are covered by the paste, however, the increase in the proportion of paste has similar effects regardless of the mineralogy.

The behaviour of fresh mortar is heavily dependent on particle shape and texture (reflected in the angularity) and the dust content of the crushed sand. These two variables do not carry the same relative weight in all cases, however. The volume of paste, V_o , needed for the mortar to begin to flow as a continuous body varies with mineralogy, whereas maximum paste thickness is practically independent of the mineralogical origin of the sand. Both parameters are related to the increase in the specific surface of the fine aggregate due to its dust content.

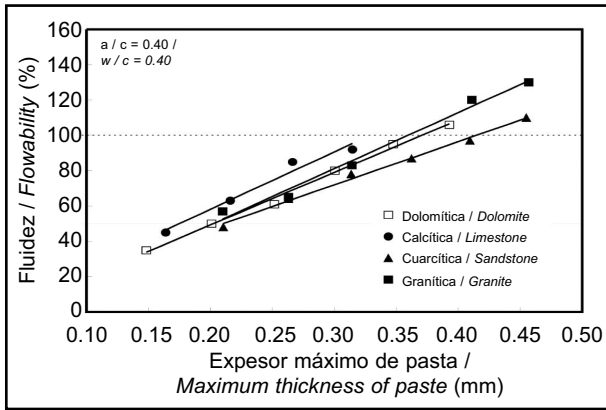


Figura 6. Espesor máximo de pasta en morteros con $a/c = 0,40$ ($R^2=0,97-0,99$).
 Figure 6. Maximum paste thickness in mortars with $w/c = 0.40$ ($R^2=0.97-0.99$).

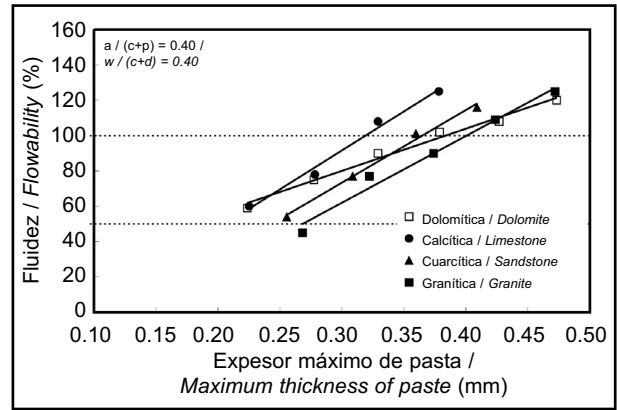


Figura 7. Espesor máximo de pasta en morteros considerando al polvo como integrante de la pasta ($R^2=0,98-0,99$).
 Figure 7. Maximum paste thickness in mortars, including dust as part of the paste ($R^2=0.98-0.99$).

En cambio, cuando se considera a las arenas sin el polvo, el volumen de *pasta+polvo* (V_0) para iniciar el escurrimiento tiende a ser similar, es decir, que se encuentra más vinculado con la angularidad de la arena que con la superficie específica (ver Figura 2). Sin embargo, los correspondientes espesores máximos de pasta son diferentes (ver Figura 7), y los mismos se vinculan con la angularidad de la fracción de la arena sin polvo. Los morteros con arena dolomítica presentan un comportamiento diferentes a las restantes arenas que puede ser atribuido al mayor contenido de partículas elongadas que poseen. Además, la angularidad se relaciona directamente con el contenido de vacíos, y en la Figura 8 se muestra que a medida que se incrementa la angularidad el mismo valor de V_0 genera diferentes espesores de pasta por la superficie a cubrir.

Conversely, when the dust is excluded from the sand, the paste + dust volume (V_0) needed for spreading to begin tends to be very similar, i.e., tends to be more closely associated with sand angularity than specific surface (see Figure 2). Even so, the respective maximum paste thicknesses differ (see Figure 7) and are associated with the angularity of the dustless sand fraction. The differential behaviour of dolomite sand mortars with respect to the others may be attributed to their higher elongated particle content. Moreover, angularity is directly related to the voids content, and Figure 8 shows that with increasing angularity, a given V_0 value generates different paste thicknesses depending on the amount of surface to be covered.

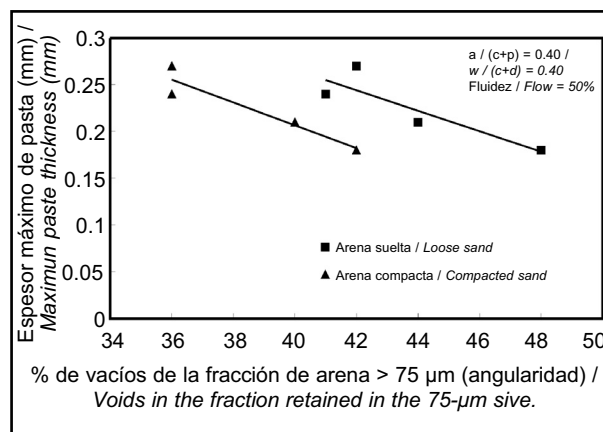


Figura 8. Espesor máximo de pasta en función del contenido de vacíos de diferentes arenas machacadas ($R^2=0,85-0,90$).

Figure 8. Maximum paste thickness versus the voids content in different types of crushed sand ($R^2=0.85-0.90$).

4.4. Influencia del contenido de agua sobre los morteros

En la Figura 9 se indica la relación entre el contenido de agua, respecto a la masa de materiales secos, y la fluidez de las dos series de morteros elaborados con arenas machacadas de diferentes orígenes mineralógicos. Todos los puntos correspondientes a los morteros se ubican en una estrecha zona, donde se puede observar que a igual contenido de agua, los morteros con arena calcítica resultan ser los más fluidos, y los que contienen arena dolomítica, los más consistentes. La forma de las partículas y el contenido y la finura del polvo marcan las diferencias observadas. Los morteros elaborados con las arenas granítica y cuarcítica tienen un comportamiento intermedio. Como referencia se incluye la recta correspondiente a los morteros con arena granítica, AT, sin polvo, con relación a/c de 0,40. Las pendientes de las rectas son similares, indicando que la forma, la textura y el contenido de polvo de las arenas influyen sobre el umbral del contenido de agua para iniciar el escurrimiento de los morteros, y que los incrementos posteriores, tienen un efecto similar en todas las mezclas independientemente de las características de las arenas.

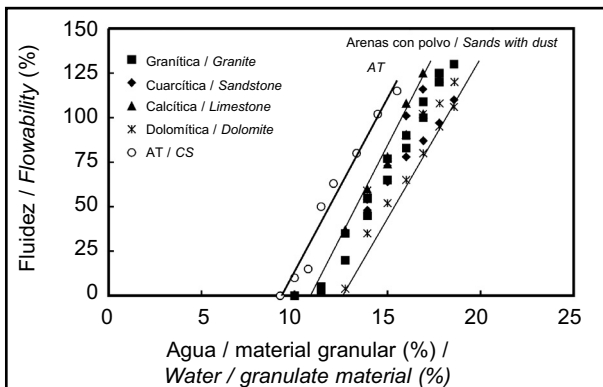


Figura 9. Relación entre el contenido de agua y la fluidez ($R^2=0,86-0,98$).
Figure 9. Water content versus flowability ($R^2=0.86-0.98$).

Finalmente, en la Figura 10 se muestra la relación existente entre el contenido de agua necesario para obtener una fluidez del 100% y el contenido de vacíos de la arena, para las dos series de morteros con relaciones a/c 0,40 y $a/(c+p)$ 0,40. Conforme se incrementa la angularidad de los granos de arena el contenido de agua resulta mayor. En este caso, también los morteros con AT presentan un comportamiento diferente.

4.4. Effect of water content on mortars

Figure 9 plots the percentage of water (by weight of dry matter) against flowability for the two series of mortars prepared with the four types of crushed sand. All the points cluster in a narrow area. As the figure shows, at any given water content, limestone sand mortars are the most fluid and the dolomite sand mortars the most consistent. Particle shape and dust fineness and content account for the differences observed. The mortars prepared with granite and quartz sand exhibit intermediate behaviour. The curve for mortars prepared with dustless crushed granite sand, AT, and a w/c ratio of 0.40 is shown by way of reference. The slopes of the curves are similar, an indication that particle shape and texture and sand dust content affect the threshold water content needed for the mortar to begin to spread and that subsequent increases have a similar effect on all the mixes, regardless of the characteristics of the sand.

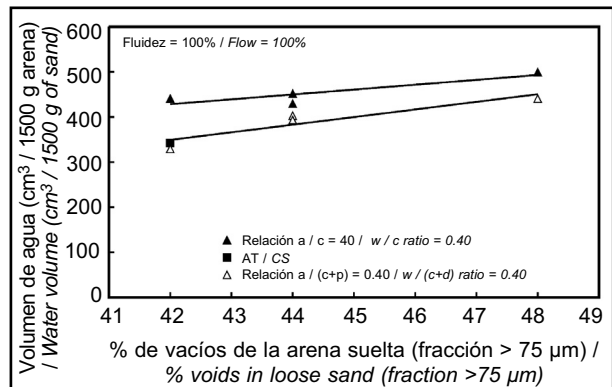


Figura 10. Relación entre el contenido de agua y el porcentaje de vacíos de la arena ($R^2=0,78-0,84$).
Figure 10. Water content versus percentage of voids in sand ($R^2=0.78-0.84$).

Finally, Figure 10 graphs the relationship between the amount of water needed for 100% flowability and the sand voids content for both series of mortars: $w/c = 0.40$ and $w/(c+d) = 0.40$. The water content rises with increasing sand grain angularity. In this case, the AT mortars also exhibited differential behaviour.

5. CONCLUSIONES

Las tendencias observadas en el estado fresco de morteros mediante el análisis efectuado indican que la metodología experimental empleada resulta una herramienta importante para describir el comportamiento y la influencia de las principales variables que gobiernan el escurrimiento del material. De acuerdo con los estudios y experiencias realizados se pueden efectuar las siguientes consideraciones sobre el comportamiento de morteros con arenas machacadas de diferentes mineralogías:

- La metodología experimental empleada para describir el estado fresco de los morteros cuando se utilizan diferentes arenas machacadas, brinda una importante información para comprender la influencia de los distintos factores que intervienen (porcentaje de vacíos de la arena, volumen de pasta necesaria para iniciar el escurrimiento del mortero, contenido de agua, espesor máximo de pasta que rodea a los granos de la arena, etc.).
- Para una determinada relación a/c o $a/(c+p)$, una vez que se cubrió con pasta el volumen de vacíos de la arena, la reología de los morteros en estado fresco con diferentes arenas machacadas es similar. A partir de allí, todo incremento de pasta proporcional al volumen de vacíos de la arena tiene una influencia similar en la fluidez, independientemente de la forma y textura de las partículas de la arena.
- Existe una relación entre el contenido de vacíos de la arena y el contenido de agua de los morteros para alcanzar una determinada fluidez, a mayor contenidos de vacíos se observa un incremento en el contenido de agua.
- El polvo de roca con bajo índice de plasticidad que contienen las arenas machacadas pueden tener un efecto positivo sobre el estado fresco de los morteros ya que se incrementa el volumen de "pasta", separando las partículas y reduciendo la fricción entre ellas. Al considerar al polvo como integrante de la pasta, para el caso de diferentes arenas machacadas, el volumen necesario para iniciar la fluidez como una masa continua es prácticamente igual en todos los casos. En cambio, el espesor máximo de pasta es notablemente diferente, hecho que se vincula a la angularidad de cada arena.
- Complementariamente puede plantearse que el modelo del espesor máximo de pasta de F. de Larrard permite mejorar el entendimiento del estado fresco de los morteros, y especialmente la influencia que tiene la angularidad y el contenido de polvo del árido fino.

5. CONCLUSIONS

Further to the patterns observed in the fresh mortars analysed here, the experimental methodology used is an important tool for describing the behaviour and effect of the key variables governing material flowability. The studies and experiments conducted lead to the following reflections on the behaviour of mortars made with crushed sand of different mineralogies:

- *The experimental method used to describe fresh mortar prepared with crushed stone affords substantial insight into the effect of the various factors involved (percentage of sand voids, volume of paste needed for mortar to begin to spread, water content and the maximum paste thickness surrounding the sand grains).*
- *For a given w/c or $w/(c+d)$ ratio, once the sand voids are filled with paste, fresh mortar rheology is similar, irrespective of the mineralogy of the crushed sand. From that point on, any increase in the amount of paste proportional to the voids volume in the sand has a similar effect on flowability, regardless of sand particle shape and texture.*
- *The sand voids content is related to the amount of water needed for the mortar to attain a given flowability: the higher the voids content, the more water is required.*
- *The low plasticity index rock dust contained in crushed sand may have a beneficial effect on fresh mortars, for they raise the "paste" volume, separating the sand particles and thereby reducing the friction between them. When the dust is regarded to be an integral part of the paste in different types of crushed sand, the volume required for the mix to flow like a continuous mass is essentially the same in all cases. The maximum paste thickness is quite different, however, a finding associated with sand angularity.*
- *In addition, Larrard's maximum paste thickness model improves the understanding of fresh mortar behaviour, and in particular the effect of angularity and the dust content in the fines on that behaviour.*

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) De Larrard, F.; Sedran, T.: "Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the Use of a Packing Model", *Cem. Concr. Res.*, vol. 24, nº 6 (1994), pp. 997-1009. doi:10.1016/0008-8846(94)90022-1
- (2) De Larrard, F.; Belloc, A.: "The Influence of Aggregate on the Compressive Strength on Normal and High-Strength Concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 94, nº 5 (1997), pp. 417-426.
- (3) Pettijohn, F. J.: "Rocas Sedimentarias", 4ª edición, Ed. EUDEBA, 731 p. (1980).
- (4) Powers, M. C.: "A New Roundness Scale for Sedimentary Particles", *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 23 (1953), pp. 117-119.
- (5) Krumbein, W. C.; Sloss, L. L.: "Stratigraphy and Sedimentation", Ed. W.H. Freeman and Company, San Francisco, USA (1955).
- (6) Folk, R. L.: "Petrology of Sedimentary Rocks", Hemphill Publishing Co, Austin, Texas, USA, 182 p. (1974).
- (7) Corrales, I.; Rosell, J.; Sánchez, L.; Vera, J. A.; Vilas, L.: "Estratigrafía", Editorial Rueda, Madrid, España (1977).
- (8) Murdock, L. J.; Brook, K. M.: "Concrete Materials and Practice", Ed. E. Arnold, London, UK (1979).
- (9) Popovics, S.: "Concrete Materials: Properties, Specifications and Testing", Ed. Noyes Publications, 2nd Edition, New Jersey, USA (1992).
- (10) Shergold, F. A.: "The Percentage Voids in Compacted Gravel as a Measure of its Angularity", of *Concrete Research*, vol. 5, nº 13 (1953), pp. 3-10.
- (11) Gray, J. E.: "The Effect of Shape of a Particle on Properties of Air-Entrained Sand Stone Mortar", *Crushed Stone Journal*, vol. 36, nº 3 (1961), pp. 3-8.
- (12) Hughes, B. P.; Bahramian, B.: "A Laboratory Test for Determining the Angularity of Aggregate", *Magazine of Concrete Research*, vol. 18, nº 56 (1966), pp. 147-152.
- (13) Powers, Treval C.: "The Properties of Fresh Concrete", Ed. John Wiley & Sons, Inc., USA, 664 p (1968).
- (14) Kalcheff, I.: "Portland Cement Concrete with Stone Sand", Special Engineering Report, Ed. National Crushed Stone Association, Washington, DC, USA (1977), 20 p.
- (15) Janoo, V.: "Quantification of Shape, Angularity and Surface Texture of Base Course Materials", US Army Corps of Engineers, Special Report 98-1 (1998).
- (16) Mather, B.: "Concrete Aggregates: Shape, Surface Texture and Coatings", Significance of the Properties of Concrete, ASTM STP 169-A, Philadelphia, USA (1966), pp. 415-431.
- (17) ASTM D-3398: "Standard Test Methods for Index of Aggregate Particle Shape and Texture" (2000).
- (18) Norma ASTM C-1252: "Uncompacted Void Content of Fine Aggregates" (2003).
- (19) Norma BS 882: "Aggregates from Natural Sources for Concrete" (1992).
- (20) Williams, A. T.; Wiltshire, R. J.; Thomas, M. C.: "Sand Grain Analysis-Image Processing, Textural Algorithms and Neural Nets", *Computers & Geosciences*, Ed. Elsevier Science Ltd., vol. 24, nº 2 (1998), pp. 11-118.
- (21) Masad, E.; Button, J. W.: "Unified Imaging Approach for Measuring Aggregate Angularity and Texture", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 15 (2000), pp. 273-280. doi:10.1111/0885-9507.00191
- (22) Wright, P. J. F.: "A Method of Measuring the Surface Texture of Aggregate", *Magazine of Concrete Research*, vol. 5, nº 2 (1955), pp. 151-160.
- (23) Czarnecka, E. T.; Gillott, J. E.: "A Modified Fourier Method of Shape and Surface Texture Analysis of Planar Sections of Particles", *Journal of Testing and Evaluation*, JETVA, vol. 5, nº 4 (1977), pp. 292-298.
- (24) Williams, A. T.; Wiltshire, R. J.; Thomas, M. C.: "Sand Grain Analysis-Image Processing, Textural Algorithms and Neural Nets", *Computers & Geosciences*, Ed. Elsevier Science Ltd., vol. 24, nº 2 (1998), pp. 11-118.
- (25) Maerz, N.: "Aggregate Sizing and Shape Determination Using Digital Image Processing", Center for Aggregates Research Sixth Annual Symposium Proceedings, St. Louis, Missouri, USA (April 19-20, 1998), pp. 195-203.
- (26) Persson, A.-L.: "Image Analysis of Shape and Size of Fine Aggregates", *Engineering Geology*, V. 50 (1998), pp. 177-186. doi:10.1016/S0013-7952(98)00009-X
- (27) Masad, E.; Button, J. W.: "Unified Imaging Approach for Measuring Aggregate Angularity and Texture", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 15 (2000), pp. 273-280. doi:10.1111/0885-9507.00191
- (28) Garboczi, E. J.; Saleh, H. H.; Livingston, R. A.: "Acquiring, Analyzing and Using Complete Three-Dimensional Aggregate Shape Information", Proc. Aggregates, Concrete, Bases and Fines, 9th Annual Symposium, Austin, Texas, USA, in CD (april 22-25, 2001), 13 pp.
- (29) Stakston, D.; Bahia, H.: "The Effect of Fine Angularity, Asphalt Content and Performance Graded Asphalts on Hot Mix Asphalt Performance", Wisconsin Department of Transportation, WisDOT Highway Research Study 0092-45-98 (October 2003), 104 p.
- (30) Erdogan, S. T.; Quiroga, P. N.; Fowler, D. W.; Saleh, H. A.; Livingston, R. A.; Garboczi, E. J.; Ketcham, P. M.; Hagedorn, J. G.; Satterfield, S. G.: "Tree-Dimensional Shape Analyses of Coarse Aggregates: New Techniques for and Preliminary Results on Several Different Coarse Aggregates and Reference Rocks", *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, nº 10 (2006), pp. 1619-1627. doi:10.1016/j.cemconres.2006.04.003
- (31) Garboczi, E. J.; Cheok, G. S.; Stone, W. C.: "Using LADAR to Characterize the 3-D Shape of Aggregates: Preliminary Results", *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, nº 6 (2006), pp.1072-1075. doi:10.1016/j.cemconres.2006.03.017

- (32) Kandhal, P. S.; Motter, J. B.; Khatri, M. A.: "Evaluation of Particle Shape and Texture: Manufactured versus Natural Sands", National Center for Asphalt Technology Report n° 91-3, 22 p., Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, USA (January 1991).
- (33) Zaniewski, J. P.; Rafferty, S.: "Evaluation of the Compacted Aggregate Resistance Test", Asphalt Technology Program, Department of Civil and Environmental Engineering, Morgantown, Virginia, USA (April 2004).
- (34) Prowell, B. D.; Zhang, J.; Brown, E. R.: "Aggregate Properties and the Performance of Superpave Designed Hot Mix Asphalt", National Cooperative Highway Research Program Report 539, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC (2005).
- (35) Cabrera, O. A.; Bonavetti, V. L.: "Efecto del Polvo de Piedra en Hormigones Estructurales", Proc. XXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Montevideo, Uruguay, Tomo 4 (1993), pp. 221-232.
- (36) Ferraris, C.: "Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 104, n° 5 (1999), pp. 461-478.
- (37) Mena Ferrer, M.: "Efecto de las Puzolanas en el Concreto Fresco", *Revista IMCYC*, México, n° 112, vol. 18 (1980), pp. 23-36.
- (38) Domone, P. L.; Yongmo, X.; Banfill, P. F.: "Developments of the Two-Point Workability Test for HPC", *Magazine of Concrete Research*, vol. 51, n° 3 (1999), pp. 171-179. doi:10.1680/mac.1999.51.3.171
- (39) Norma IRAM 1548: "Agregados. Determinación de la Densidad a Granel y de los Espacios Vacíos" (1948).
- (40) Norma IRAM 1679: "Cemento de Albañilería. Métodos de Ensayo" (1970).
- (41) Cabrera, O. A.; Traversa, L. P.; Rahhal, V. F.: "Influencia de la Forma y Textura de los Agregados Finos en la Fluidez de los Morteros Cementíceos", Proc. III Congreso Internacional y 17ª Reunión Técnica "Ing. José F. Colina" (2008), pp. 371-378.
- (42) Wong, G. S.; Alexander, A. M.; Haskins, R.; Poole, T. S.; Malone, P. G.; Wakeley, L.: "Portland-Cement Concrete Rheology and Workability: Final Report", Publication n° FHWA-RD-00-25, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (April 2001).
- (43) Bascoy, D.: "Tecnología del Hormigón Fresco", p. 344, Ed. Biblos, Buenos Aires, Argentina (1992).

* * *