

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.

Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de
Ingeniería Civil



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

TESIS DOCTORAL

**Estudio de compuestos de GRC y adiciones activas: Propiedades
mecánicas, envejecimiento acelerado y durabilidad**

**Tesis Doctoral presentada por:
D. Luis Felipe Lalinde Castrillón**

**Dirigida por:
Pr.Dr.D. Jorge Juan Payá Bernabeu
Pr.Dr.D. José María Monzó Balbuena**

Valencia, julio de 2020.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.

Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil.

Tesis Doctoral

Estudio de compuestos de GRC y adiciones activas: Propiedades mecánicas,
envejecimiento acelerado y durabilidad

Presentada por: D. Luis Felipe Lalinde Castrillón

Para la obtención del
Grado de Doctor por la Universitat Politècnica de València.

Dirigida por:

Pr.Dr.D. Jorge Juan Payá Bernabeu

Pr.Dr.D. José María Monzó Balbuena

Tribunal Calificador:

Presidente:

Secretario:

Vocales:

Calificación:

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a todas las personas que directa o indirectamente me han ayudado a lograr la culminación del presente trabajo.

Al Vicerrectorado de Investigación por su Programa de Becas FPI de Incentivo a la Investigación de la Universitat Politècnica de València, por la concesión de una beca doctoral que permitió la realización del presente trabajo, al Ministerio de Educación y Ciencia la concesión del proyecto BIA 2004-00520 bajo el que se ha llevado a cabo esta investigación.

A mis directores de tesis a Jordi Payá Bernabeu y Jose María Monzó Balbuena, por su invaluable dedicación, así como por su incondicionalidad.

A Mercedes Bonilla Salvador, por su acompañamiento y apoyo constante en todo el proceso. A María Victoria Borrachero Rosado y Ana Mellado Romero, por su comprensión y afecto. Al profesor Eduardo Peris Mora por todo lo compartido en sus cursos.

A mis compañeros de trabajo y amigos, Lourdes, Ester, Mauro, Daniel, Jesús, Verónica, Cari, Walter, por brindarme su amistad, consejo y ayuda.

A todos los técnicos del laboratorio, Javier Bardisa, Juan Franqueza, Pascual Hernández y Juan Monzó; y en especial a Amparo por su aprecio y colaboración.

A todos mis profesores de los cursos de doctorado, por su interés en transmitirme los conocimientos necesarios.

Al Servicio de Microscopia de la Universidad, Manolo, José Luis y Merche.

A mis amigos Needy, Andrea, Elkin, Yesid, Andrés, Samuel, por el camino en común.

A mi familia.

Mi abuela Carmen y mi tía María Victoria.

A mis hermanos siempre presentes.

A mi mamá, siempre optimista y alegre. A mi papá, siempre conmigo.

A Gloria, Sara y Violeta, mi vida.

RESUMEN DE LA TESIS

El sector de la construcción es un gran consumidor de materias primas extraídas de la naturaleza. En la actualidad, en este sector y, específicamente, en las actividades orientadas a la innovación en materiales, materias primas y productos asociados, resulta atractiva la reutilización y valorización de residuos. La ceniza volante de la combustión de carbón (CV), el catalizador gastado de craqueo catalítico de la industria petroquímica (FCC), y el humo de sílice procedente de la fabricación de silicio y sus aleaciones (HS) son materiales artificiales de carácter puzolánico, que son estudiados para ser utilizados con el objeto de mejorar las características tanto de morteros como de hormigones.

En el ámbito de los materiales compuestos o composites para la construcción, el cemento reforzado con fibras de vidrio (GRC, del inglés glass fiber reinforced cement) es el más extensamente utilizado, por sus excelentes propiedades mecánicas (resistencia a flexión y tenacidad). Sin embargo, la durabilidad de estos composites se ha demostrado crítica, y es necesario proponer alternativas. Las fibras usadas, de carácter álcali-resistente (fibras AR, formadas por agrupación de filamentos), son atacadas por el medio agresivo que impone el cemento hidratado. Una alternativa interesante, desde el punto de vista tecnológico, es la incorporación de materiales cementantes suplementarios de carácter puzolánico.

El objetivo del presente trabajo es estudiar la influencia de las diferentes adiciones activas en morteros de GRC, observando el comportamiento de los elementos constitutivos del material en condiciones normales de curado, y también al ser sometidos a procesos de envejecimiento controlado. Asimismo, se analiza el comportamiento de los nuevos composites sometidos a diferentes medios agresivos, evaluando la durabilidad y la mejora de los compuestos por medio de la determinación de sus propiedades mecánicas, químicas y físicas.

Se han elaborado probetas de GRC a través del procedimiento de premezcla (premix) y se han determinado sus propiedades mecánicas (resistencia a flexión, tenacidad y módulo de elasticidad). Adicionalmente, se han cuantificado las ganancias de resistencia al comparar composites GRC basados en cemento Portland (especímenes control) con otros en los que se ha sustituido hasta el 60% de dicho cemento por adiciones puzolánicas. Al objeto de mejorar la reactividad de las puzolanas, en algunos casos se ha implementado un aumento de su finura a través de la molienda (cenizas volantes molidas, CVm) o de procesos de sonicación (humo de sílice sonicado, HSS). Los especímenes de GRC han sido sometidos a un proceso de envejecimiento (tratamiento en agua a 55°C durante un período prolongado) y se ha observado un empeoramiento muy importante de la resistencia a flexión y la tenacidad de aquellos que poseen solamente cemento Portland como componente cementante. Los composites GRC que contienen cantidades elevadas de puzolana (60% de CVm) o mezclas de puzolanas (50%CVm / 10%HSS, 50%CVm / 10%FCC) presentan una mejora sustancial de las propiedades mecánicas con respecto a los GRC control. La mejora de estos sistemas GRC con elevados porcentajes de puzolanas reactivas se han confirmado a través de estudios físicos y físico - químicos: evaluación de densidad, absorción, estudios microscópicos (lupa y microscopía electrónica de barrido) y análisis termogravimétrico.

Se ha evidenciado que el empeoramiento del GRC control se produce fundamentalmente por la elevada alcalinidad del medio como consecuencia de la formación de grandes cantidades de portlandita (hidróxido cálcico). Dicho compuesto químico favorece, por una parte, la disolución de los componentes de la fibra de vidrio (básicamente sodio y silicio) y, por otra parte, genera daño físico en los filamentos que componen la fibra AR. El daño se acelera con el envejecimiento y se observa una caída importante de la resistencia a flexión y sobre todo un dramático descenso de la tenacidad (a valores similares al mismo material, pero sin fibra AR). Se ha demostrado que el uso de fibras AR de diversas longitudes (desde 6 mm hasta 24 mm) así como de fibras AR de carácter dispersable (con dispersión de los filamentos de la fibra) no mejoran el comportamiento frente al envejecimiento.

Se ha demostrado que la incorporación de los materiales puzolánicos descritos, a través de la sustitución parcial del cemento Portland en la formulación del GRC, posibilita un mejor comportamiento del composite. Ello se debe a las propiedades puzolánicas, bien de la CVM presente en altos porcentajes, o bien de su mezcla con materiales puzolánicos complementarios (FCC y HSS). La reacción puzolánica permite la creación de mayor cantidad de productos hidratados, factor que contribuye a la formación de una matriz más densa, obteniendo resistencias mecánicas elevadas. Asimismo, el consumo de la portlandita disminuye la agresividad del medio hacia las fibras AR: en muchas de las mezclas con puzolana, la portlandita presente después de 28 días de curado era prácticamente insignificante.

Se ha concluido que la incorporación de cantidades significativas de puzolanas supone una mejora en el comportamiento de los composites GRC con fibras AR frente a los procesos de humectación-secado. Sin embargo, no es efectiva para los procesos de hielo-deshielo, debido a que el mecanismo de daño se debe al efecto expansivo de la congelación de agua en los poros y no al daño específico sobre las fibras.

En cuanto a la respuesta de los composites GRC frente a diferentes disoluciones agresivas, se ha demostrado el efecto beneficioso de la presencia de puzolanas. Después de la exposición de los morteros de GRC a una disolución de NH_4Cl , el comportamiento mecánico de los morteros puzolánicos se mantiene por encima del mortero GRC control: esto se debe a la relación directa existente con el incremento de la densidad y la disminución de grado de absorción del composite con la sustitución puzolánica. Al evaluar las propiedades de los morteros de GRC después de su exposición a una disolución de H_2SO_4 , se observan diferencias muy importantes en la evolución de la masa, resistencia a flexión y tenacidad: los composites control son más afectados por la acidez del medio, de modo que la pérdida de masa es muy significativa si se compara con los GRC que presentan puzolanas.

La estancia en la empresa Saint Gobain Vetrotex, ha permitido confirmar una gran similitud en los resultados obtenidos mediante los procedimientos seguidos en el laboratorio de la UPV (compuestos de GRC premezclado) comparados con las prácticas desarrolladas por el laboratorio de materiales de la empresa (composites de GRC proyectado). Se han evaluado prototipos escalables para la industria del GRC proyectado. Se confirma el mejor comportamiento mecánico de los compuestos en cuyas formulaciones están presentes las puzolanas, debido a su reactividad, que potencian que la resistencia a flexión y la tenacidad se mantengan incluso con el envejecimiento.

A modo de conclusión final, se ha demostrado la viabilidad de fabricación de composites de GRC con adiciones puzolánicas, ceniza volante molida, residuo de catalizador FCC y humo de sílice sonicado, tanto en premezcla como en proyección, dosificaciones que favorecen el comportamiento frente al envejecimiento, manteniendo niveles muy aceptables de tenacidad y resistencia a flexión.

RESUM DE LA TESI

El sector de la construcció és un gran consumidor de matèries primeres extretes de la natura. En l'actualitat, en aquest sector i, específicament, en les activitats orientades a la innovació en materials, matèries primeres i productes associats, resulta atractiva la reutilització i valorització de residus. La cendra volant de la combustió de carbó (CV), el catalitzador gastat de craqueig catalític de la indústria petroquímica (FCC), i el fum de sílice procedent de la fabricació de silici i els seus aliatges (HS) són materials artificials de caràcter putzolànic, que són estudiats per ser utilitzats a l'objecte de millorar les característiques tant de morters com de formigons.

En l'àmbit dels materials compostos o compòsits per a la construcció, el ciment reforçat amb fibres de vidre (GRC, de l'anglès glass fiber reinforced cement) és el més extensament utilitzat, per les seves excel·lents propietats mecàniques (resistència a flexió i tenacitat). No obstant això, la durabilitat d'aquests compòsits s'ha demostrat crítica, i cal proposar alternatives. Les fibres usades, de caràcter àlcali-resistent (fibres AR, formades per agrupació de filaments), són atacades pel medi agressiu que imposa el ciment hidratat. Una alternativa interessant des del punt de vista tecnològic és la incorporació de materials cimentants suplementaris de caràcter putzolànic.

L'objectiu d'aquest treball és estudiar la influència de les diferents addicions actives en morters de GRC, observant el comportament dels elements constitutius del material en condicions normals de curat, i també quan son sotmesos a processos d'envelliment controlat. Així mateix, s'analitza el comportament dels nous compòsits sotmesos a diferents mitjans agressius, avaluant la durabilitat i la millora dels compostos mitjançant la determinació de les seves propietats mecàniques, químiques i físiques.

S'han elaborat provetes de GRC a través del procediment de mescla prèvia (premix) i s'ha determinat les seves propietats mecàniques (resistència a flexió, tenacitat, mòdul d'elasticitat). Addicionalment s'han quantificat els guanys de resistència al comparar compòsits GRC basats en ciment Portland (espècimens control) amb altres en què s'ha substituït fins al 60% d'aquest ciment per materials putzolònics. A l'objecte de millorar la reactivitat de les putzolanes, en alguns casos s'ha implementat un augment de la seva finor a través de la mòlta (cendres volants mòltes, CVm) o de processos de sonicació (fum de sílice sonicat, HSS). Els espècimens de GRC han estat sotmesos a un procés d'envelliment (tractament en aigua a 55°C durant un període prolongat) i s'ha observat l'empitjorament molt significatiu de la resistència a flexió i la tenacitat d'aquells que posseeixen solament ciment Portland com a component cimentant. Els compòsits GRC que contenen quantitats elevades de putzolana (60% de CVm) o mescles de putzolanes (50% CVm / 10% HSS, 50% CVm / 10% FCC) presenten una millora substancial de les propietats mecàniques respecte als GRC control. La millora d'aquests sistemes GRC amb elevats percentatges de putzolanes reactives s'han confirmat a través d'estudis físics i fisicoquímics: avaluació de densitat, absorció, estudis microscòpics (lupa i microscòpia electrònica de rastreig) i anàlisi termogravimètric.

S'ha evidenciat que l'empitjorament del GRC control es produeix fonamentalment per l'elevada alcalinitat del medi com a conseqüència de la formació de grans quantitats de portlandita (hidròxid càlcic). Aquest compost químic afavoreix, d'una banda, la dissolució dels components de la fibra de vidre (bàsicament sodi i silici) i, d'altra banda, genera dany físic en els filaments que componen la fibra AR. El dany s'accelera amb l'envelliment i s'observa una caiguda important de la resistència a flexió i sobretot un dramàtic descens de la tenacitat (a valors similars al mateix material, però sense fibra AR). S'ha demostrat que l'ús de fibres AR de diverses longituds (des de 6 mm fins a 24 mm) així com de fibres AR de caràcter dispersable (amb dispersió dels filaments de la fibra) no milloren el comportament enfront de l'envelliment.

S'ha demostrat que la incorporació dels materials putzolònics descrits, mitjançant la substitució parcial del ciment Portland en la formulació del GRC, possibilita un millor comportament del compòsit. Això es deu a les propietats putzolònics, bé de la CVm present en alts percentatges, o bé de les seves mescles amb materials putzolònics complementaris (FCC i HSS). La reacció putzolònica permet la creació de més quantitat de productes hidratats, factor que contribueix a la formació d'una matriu més densa i per tant s'obtenen resistències mecàniques elevades. Així mateix, el consum de la portlandita disminueix l'agressivitat del medi cap a les fibres AR. En moltes de les mescles amb putzolana, la portlandita present després de 28 dies de curat era pràcticament insignificant.

S'ha conclòs que la incorporació de quantitats significatives de putzolanes suposa una millora en el comportament dels compòsits GRC amb fibres AR davant els processos d'humectació-assecat. No obstant això, no és efectiva per als processos de gel-desgel, pel fet que el mecanisme de dany es deu a l'efecte expansiu de la congelació d'aigua en els porus i no a el dany específic sobre les fibres.

Pel que fa a la resposta dels compòsits GRC enfront de diferents dissolucions agressives, s'ha demostrat l'efecte beneficiós de la presència de putzolanes. Després de l'exposició dels morters de GRC a una dissolució de NH_4Cl , el comportament mecànic dels morters putzolànics es millor que el morter GRC control: això es deu a la relació directa existent amb l'increment de la densitat i la disminució del grau d'absorció del compòsit amb la putzolana. Quan s'ha avaluat les propietats dels morters de GRC després de la seva exposició a una dissolució H_2SO_4 , s'observen diferències molt importants en l'evolució de la massa, resistència a flexió i tenacitat: els compòsits control són més afectats per l'acidesa del medi, de manera que la pèrdua de massa és molt significativa si es compara amb els GRC que presenten putzolanes.

L'estada a l'empresa Saint Gobain Vetrotex, ha permès confirmar una gran similitud en els resultats obtinguts mitjançant els procediments seguits en el laboratori de la UPV (compostos de GRC amb premescla) comparats amb les pràctiques desenvolupades pel laboratori de materials de l'empresa (compostos de GRC projectat). S'han avaluat prototips per a la indústria de l'GRC projectat. Es confirma el millor comportament mecànic dels compostos quan aquestos presenten putzolanes, donat seva reactivitat, potenciant que la resistència a flexió i la tenacitat es mantinguen fins i tot amb l'envelliment.

A tall de conclusió final, s'ha demostrat la viabilitat de fabricació de compòsits de GRC amb materials putzolànics com la cendra volant mòlta, residu de catalitzador FCC i fum de sílice sonicat, tant en procés de premescla com de projecció, dosificacions que afavoreixen el comportament enfront de l'envelliment, mantenint nivells molt acceptables de tenacitat i resistència a flexió.

SUMMARY OF THESIS

The construction sector is a large consumer of raw materials extracted from nature. Currently, in this sector and, specifically, in activities aimed at innovation in materials, raw materials and associated products, the reuse and recovery of waste is attractive. The fly ash from coal burning (CV), the spent catalytic cracking catalyst from the petrochemical industry (FCC), and the silica fume from the manufacture of silicon and its alloys (HS) are man-made pozzolanic materials. They have been analyzed with the purpose to improve the characteristics of both mortars and concrete.

In the field of composite materials for construction, glass fiber reinforced cement (GRC) is the most widely used, due to its excellent mechanical properties (resistance to bending and toughness). However, the durability of these composites has been demonstrated to be critical and alternatives need to be proposed. The used fibers, alkali-resistant (AR fibers, formed by grouping of filaments), are attacked by the aggressive medium imposed by the hydrated cement. An interesting alternative, from a technological point of view, is the incorporation of supplementary cementitious materials of pozzolanic behaviour.

The purpose of this research is to study the influence of the different mineral additions in GRC mortars, observing the behaviour of the constituent elements of the material under normal curing conditions and controlled aging processes. Likewise, the behaviour of new composites subjected to different aggressive environments is analyzed, evaluating the durability and improvement of the compounds by determining their mechanical, chemical and physical properties.

GRC specimens have been produced through the premix procedure and their mechanical properties (flexural strength, toughness, and modulus of elasticity) have been determined. Additionally, resistance gains have been quantified when comparing GRC composites based on Portland cement (control specimens) with others in which up to 60% of that cement has been replaced by pozzolanic additions. In order to improve the reactivity of pozzolans, in some cases an increase in its fineness has been implemented through grinding (ground fly ash, CVm) or sonication processes (sonicated silica fume, HSS). The GRC specimens have been subjected to an aging process (treatment in water at 55°C for an extended period) and worsening of the flexural strength and toughness of those who only have Portland cement as cementitious component has been observed. GRC composites containing high amounts of pozzolan (60% CVm) or mixtures of pozzolans (50% CVm / 10% HSS, 50% CVm / 10% FCC) show a substantial improvement in mechanical properties compared to the control GRC. The improvement of these GRC systems with high percentages of reactive pozzolans have been confirmed through physical and physical-chemical studies: evaluation of density, absorption, microscopic studies (magnifying glass and scanning electron microscopy), and thermogravimetric analysis.

It has been shown that the damage of control GRC is mainly produced by the high alkalinity of the medium as a consequence of the formation of large amounts of portlandite (calcium hydroxide). This chemical compound favours, on the one hand, the dissolution of the components of the glass fiber (sodium and silicon) and, on the other hand, generates physical damage to the filaments that make up the AR fiber. Damage accelerates with aging and a significant drop in flexural strength is observed, and above all, a dramatic decrease in toughness (values similar to the same material, but without AR fiber). It has been determined that the use of AR fibers of various lengths (from 6 mm to 24 mm) as well as AR fibers of dispersible character (with dispersion of the fiber filaments) without improving the behaviour against aging.

It has been shown that the incorporation of the pozzolanic materials described as partial replacement of Portland cement in the GRC formulation, enables a better behaviour of the composite. This is due to the pozzolanic properties, either of the CVm present in high percentages, or of its mixture with complementary pozzolanic materials (FCC and HSS). The pozzolanic reaction produces a greater quantity of hydrated products, a factor that contributes to the formation of a denser matrix, obtaining high mechanical strength. Likewise, the consumption of portlandite reduces the aggressiveness of the medium towards AR fibers: in many of the mixtures with pozzolan, the portlandite present after 28 days of curing was insignificant.

It has been concluded that the incorporation of significant amounts of pozzolans represents an improvement in the behaviour of GRC composites with AR fibers against wetting-drying processes. However, it is not effective for freeze-thaw processes, since the damage mechanism is due to the expansive effect of water freezing in the pores and not to the specific damage to the fibers.

Regarding the response of GRC composites against different aggressive solutions, the beneficial effect of the presence of pozzolans has been demonstrated. After the exposure of the GRC mortars to a NH_4Cl solution, the mechanical behavior of pozzolanic mortars remains above that of the control GRC mortar: this is due to the direct relationship existing with the increase in density and the decrease in the absorption of the composite with the pozzolanic replacement. When evaluating the properties of GRC mortars after exposure to an H_2SO_4 solution, very important differences are observed in the evolution of the mass, flexural strength and toughness: the control composites are more affected by the acidity of the medium, so that the loss of mass is very significant when compared to the GRCs that present pozzolans.

The stay at the Saint Gobain Vetrotex company has confirmed a great similarity to the results obtained by the procedures followed at the UPV laboratory (premixed GRC compounds) compared to the practices developed by the company's materials laboratory (composites of projected GRC). Scalable prototypes have been assessed for the projected GRC industry. The best mechanical behaviour of the compounds in whose formulations pozzolans are present is confirmed, due to their reactivity, which allows flexural strength and toughness to be maintained even with aging.

As a conclusion, the feasibility of manufacturing GRC composites with pozzolanic additions, ground fly ash, FCC catalyst residue, and sonicated silica fume has been demonstrated, both in premix and in projection processes, dosages that favour the behaviour against aging, maintaining very acceptable levels of toughness and flexural strength.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Planteamiento del problema	2
1.2.	Objetivos	3
1.3.	Metodología.....	4
2.	MARCO TEÓRICO	5
2.1	Materiales compuestos de cemento reforzados con fibras de vidrio.....	5
2.1.1	Materiales compuestos.....	5
2.1.2	Conceptos generales del comportamiento mecánico de materiales compuestos reforzados con fibra	6
2.1.3	Fibra de vidrio.....	11
2.1.4	Morteros de GRC.....	14
2.2	Importancia de la durabilidad de hormigones y morteros.....	18
2.2.1	Acciones de tipo físico.....	19
2.2.2	Acciones de tipo químico.....	21
2.3	Adiciones minerales	23
2.3.1	Materiales puzolánicos	23
2.3.2	Beneficios del uso de adiciones minerales en cementos y hormigones	25
2.3.3	Humo de sílice (HS)	26
2.3.4	Catalizador de craqueo catalítico (FCC)	27
2.3.5	Ceniza volante (CV)	28
2.4	Antecedentes sobre morteros de GRC y adiciones activas	31
2.5.	Bibliografía.....	51
3.	EXPERIMENTAL	55
3.1.	Materiales empleados	55
3.1.1.	Cemento	55
3.1.2.	Filler calizo	55
3.1.3.	Fibra de vidrio AR	55
3.1.4.	Materiales puzolánicos	56
3.1.5.	Árido.....	56
3.1.6.	Agua.....	56
3.1.7.	Aditivos.....	57
3.1.8.	Reactivos.....	57
3.2.	Equipos y procedimientos utilizados	58
3.2.1.	Molienda	58
3.2.2.	Preparación de los morteros de GRC	58
3.2.2.3.	Trabajabilidad	60
3.2.3.	Análisis termogravimétrico (ATG).....	61
3.2.4.	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	64
3.2.5.	Análisis granulométrico por difracción láser	65
3.2.6.	Difracción de rayos X (DRX).....	65
3.2.7.	Proceso de sonicación.....	66
3.2.8.	Ensayos mecánicos	67
3.2.9.	Envejecimiento acelerado	71
3.2.10.	Absorción de agua y densidad seca.....	72
3.2.11.	Ciclos de humectación - secado.....	72

3.2.12.	Ciclos de hielo – deshielo	73
3.2.13.	Exposición ante agentes agresivos	73
3.3.	Fases de estudio	73
3.4.	Bibliografía	75
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
4.1.	Caracterización físico - química	77
4.1.1.	Materiales puzolánicos	77
4.1.2.	Fibra de vidrio álcali resistente	84
4.1.3.	Conclusiones	88
4.1.4.	Bibliografía	88
4.2.	Conocimiento del GRC y adiciones activas. estudios preliminares sobre probetas 4x4x16cm	90
4.2.1.	Propiedades mecánicas y comportamiento al envejecimiento	90
4.2.2.	Estudio de la microestructura.....	106
4.2.3.	Evolución de la actividad puzolánica.....	109
4.2.4.	Conclusiones.....	115
4.2.5.	Bibliografía	118
4.3.	GRC Premezclado: mezcla de fibras y envejecimiento acelerado.....	120
4.3.1.	Propiedades mecánicas de GRC con mezcla de diferentes tipos de fibras 121	
4.3.2.	Efecto del Envejecimiento sobre compuestos de GRC con mezcla de fibras 132	
4.3.3.	Morteros con diferentes fibras y adición de CV	136
4.4.	GRC Premezclado y Adiciones Activas: propiedades mecánicas y envejecimiento acelerado	142
4.4.1.	Propiedades mecánicas	144
4.4.2.	Conclusiones.....	163
4.4.3.	Bibliografía	165
4.5.	Compuestos de GRC y adiciones activas: envejecimiento acelerado y durabilidad.....	166
4.5.1.	Caracterización de composites y estudio del envejecimiento	168
4.5.1.1.	Porcentaje de absorción y densidad seca	169
4.5.1.2.	Propiedades mecánicas	170
4.5.1.3.	Exposición de fibras AR a diferentes ambientes agresivos.....	173
4.5.2.	Evaluación del comportamiento de composites sometidos a agresiones físicas 176	
4.5.2.1.	Ciclos de humectación - secado.....	177
4.5.2.2.	Ciclos de hielo-deshielo.....	183
4.5.3.	Evaluación del comportamiento de composites sometidos a agresiones químicas 186	
4.5.3.1.	Exposición de morteros de GRC a disolución de NH ₄ Cl.....	187
4.5.3.2.	Exposición de morteros de GRC a disolución de H ₂ SO ₄	191
4.5.4.	Conclusiones.....	195
4.5.4.1.	Porcentaje de absorción y densidad seca	195
4.5.4.2.	Exposición de fibras AR a diferentes ambientes agresivos.....	196
4.5.4.3.	Ciclos de humectación-secado	196
4.5.4.4.	Ciclos de hielo-deshielo	196
4.5.4.5.	Exposición de morteros de GRC a disolución de NH ₄ Cl.....	197

4.5.4.6.	Exposición de morteros de GRC a disolución de H_2SO_4	197
4.5.5.	Bibliografía	198
4.6.	GRC proyectado: estancia en empresa Saint Gobain Vetrotex España	199
4.6.1.	Generalidades sobre el proceso de fabricación	201
4.6.2.	Propiedades mecánicas	204
4.6.3.	Conclusiones	209
4.6.4.	Bibliografía	210
5.	CONCLUSIONES GENERALES.....	211
	LISTA DE FIGURAS.....	216
	LISTA DE TABLAS.....	221

1. INTRODUCCIÓN

La gestión racional de los residuos surge como una contribución a la protección del medio ambiente, incentivando la reducción en origen de los residuos y priorizando en su reutilización y valorización.

El sector de la construcción resulta ampliamente atractivo para esta práctica, por ser un gran consumidor de materias primas extraídas de la naturaleza; estas actividades se deben realizar garantizando la calidad final del producto y evitando nuevos impactos ambientales.

La ceniza volante (subproducto procedente de las centrales termoeléctricas de carbón), el catalizador gastado de craqueo catalítico (residuo de la industria de la obtención de las naftas de petróleo), y el humo de sílice (subproducto de la fabricación de silicio elemental y aleaciones ferro silíceas en hornos de arco eléctrico) son materiales artificiales de carácter puzolánico, que son estudiados para ser utilizados en la construcción, al objeto de mejorar las características tanto de morteros como hormigones. Con el estudio de morteros de cemento Pórtland con sustitución parcial del cemento por estas puzolanas artificiales, se busca la mejora de las características mecánicas, físicas y químicas de la matriz cementante, lo que representa una mayor durabilidad de los elementos y, en algunos casos, reducción de los costes de fabricación.

Los materiales compuestos son elementos fabricados con el objetivo de mejorar las propiedades que cada uno de sus componentes presentan por separado, o bien generar o activar características no aprovechadas para un mejor comportamiento. En el caso de los hormigones y más específicamente de los morteros, se busca con la inclusión de las fibras generar un material compuesto que permita favorecer su comportamiento mecánico, confiriéndole mejoras en las resistencias a compresión, flexión, tracción e impacto. De acuerdo con el tipo de material y su uso, se define el tipo de fibra a utilizar, éstas pueden ser de vidrio, plástico, carbono y acero entre otras.

Las fibras de vidrio presentan una gran facilidad de trabajo y gran manejabilidad conjugada a un carácter inocuo y seguro [1]. En los morteros de cemento Pórtland se recomienda utilizar fibras de vidrio álcali resistentes debido al ambiente alcalino presente en la matriz cementante; éstas le confieren al mortero mejoras en sus propiedades mecánicas, pero aparentemente presentan problemas de durabilidad. El material compuesto resultante, es decir, el mortero de cemento reforzado con fibras de vidrio álcali-resistentes (AR), se conoce por las siglas GRC, correspondientes a la denominación inglesa “Glass Fibre Reinforced Cement”.

Con la sustitución parcial del cemento por puzolanas en los morteros de GRC, se busca la mejora de las propiedades mecánicas, físicas y químicas de la matriz cementante, para incrementar la durabilidad de los elementos fabricados con este composite. En este trabajo se presentan los estudios realizados sobre morteros de GRC con diferentes adiciones, evaluando sus componentes, dosificaciones y su comportamiento ante procesos de carga y envejecimiento controlado.

1.1 Planteamiento del problema

El GRC es un material compuesto formado claramente por dos fases, el mortero de cemento Pórtland que actúa como matriz, y la fibra de vidrio AR que actúa como fase dispersa. Las propiedades de este material son función de las propiedades de cada una de las fases y de la manera como éstas interactúan entre sí.

Son conocidas las propiedades mecánicas que presentan los materiales compuestos de matriz cementante GRC: la adherencia de las fibras y su distribución en tres dimensiones en la matriz cementante permite soportar los esfuerzos de tracción en los morteros, disminuye y controla la fisuración, y mejora la tenacidad de los elementos debido al tipo de fallo que sufre la fibra, el cual es primero por deslizamiento y no por rotura [2]. La respuesta de estos composites ante cargas de tracción y flexión es excelente a edades jóvenes, pero se ve afectada con el tiempo por envejecimiento de las fibras [3]; el deterioro de sus propiedades se manifiesta en una reducción del comportamiento mecánico, afectando a su durabilidad.

Aunque las fibras AR ricas en óxido de circonio pueden soportar ambientes alcalinos como el que se presenta en la matriz cementante, temperaturas y humedades altas pueden afectar su comportamiento; el medio altamente alcalino y la frecuente acumulación de hidróxido cálcico en los espacios entre las fibras son factores que contrarrestan las condiciones de durabilidad de este tipo de morteros [2]. Se ha observado que la fibra AR sufre un ataque por parte de los productos que se generan durante la hidratación del cemento [4], los cristales de hidróxido cálcico se incrustan en la fibra alterando sus propiedades físicas. Estos factores son responsables en gran medida de la pérdida de las propiedades del composite, como la disminución de tenacidad y de la resistencia a flexión [5]. Además, se genera una reacción química en la interfase entre la fibra y la matriz cementante (hidroxilación) que produce una pérdida de masa por parte de la fibra [6, 7].

De acuerdo con la aplicación que se dé a los diferentes elementos fabricados con GRC, éstos estarán sometidos a diferentes agresiones dependiendo del medio en el que se encuentren; pueden ser afectados por agentes físicos o químicos, externos o internos, los

cuales pueden producir erosiones, fisuras y expansiones de carácter nocivo para el composite. Los agentes físicos tales como los procesos de desecación y las acciones de hielo-deshielo, se presentan cuando los materiales están a la intemperie expuestos a los cambios climáticos y cuando son sometidos a la acción del agua en movimiento, generando un desgaste superficial. En el entorno del composite, podemos encontrar sulfatos, cloruros o ácidos, entre otros, que afectan a la matriz cementante causando pérdida de masa o su hinchamiento y rotura. La respuesta de la matriz cementante ante este tipo de agresiones depende en gran medida del porcentaje de absorción, del grado de porosidad y de la evolución y naturaleza de la matriz cementante, lo cual permitirá en menor o mayor medida la penetración de estos agentes y su reacción perjudicial con los componentes de la matriz [8].

1.2. Objetivos

Estudiar la influencia de la sustitución parcial del cemento por diferentes materiales puzolánicos en morteros de GRC, que permitan modificar y mejorar la matriz cementante y su interfase con la fibra de vidrio AR. De esa forma se pretende mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de estos compuestos, al ser sometidos a diferentes procesos de agresión y envejecimiento. Para conseguir el objetivo general del estudio, es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Realizar la caracterización físico - química de los materiales constituyentes de los morteros de GRC con adiciones puzolánicas.
- Evaluar los productos de hidratación y las diferentes fases cristalinas, productos de la reacción de la portlandita con las puzolanas, presentes en las pastas que componen la matriz cementante.
- Determinar el comportamiento mecánico, resistencias a compresión, flexión e impacto, de los diferentes morteros de GRC, y su respuesta a procesos de envejecimiento controlados.
- Estudiar la modificación de la interfase entre la fibra AR y la matriz cementante, por la acción de la reacción de las puzolanas con el cemento.
- Corroborar el estado de álcali-resistencia de las fibras de vidrio AR, al ser sometidas a un medio altamente alcalino como es la matriz de cemento Pórtland.
- Evaluar el comportamiento de los morteros de GRC planteados y de sus materiales constituyentes, al ser expuestos ante la acción de agentes agresivos físicos, químicos o fisicoquímicos.

1.3. Metodología

Las propiedades del GRC dependen de las propiedades de cada una de las fases, la fase matriz que conforma el mortero de cemento Pórtland y la fase dispersa que conforma el conjunto de fibras, y de la manera como éstas interactúan entre sí. Con la inclusión de las fibras de vidrio álcali-resistentes (fibras AR) se busca generar un material compuesto que permita favorecer su comportamiento mecánico, confiriéndole mejoras especialmente en las resistencias a flexión, tracción e impacto. Con la sustitución parcial del cemento por puzolanas se trata de mejorar, además de sus características mecánicas del mortero de cemento Pórtland, las características físicas y químicas de la matriz cementante lo cual representa un incremento en la durabilidad de los elementos fabricados con GRC. Se pretende evaluar el comportamiento de los morteros a edades mayores, sometidos a procesos controlados de envejecimiento y de ataque mediante agentes físicos o químicos en diferentes medios agresivos.

Al sustituir parte del cemento por la ceniza volante (CV), que es una puzolana que reacciona a tiempos largos con el hidróxido cálcico, por el catalizador de craqueo catalítico (FCC) y el humo de sílice (HS), los cuales reaccionan a tiempos más cortos, se pretende generar una mayor cantidad de silicatos, aluminatos y silicoaluminatos cálcicos hidratados, para disminuir el porcentaje de portlandita presente alrededor de las fibras; también se reduce el calor de hidratación de la mezcla cementante evitando así problemas por fenómenos térmicos; se incrementa la trabajabilidad de la mezcla debido al efecto lubricante de la CV, por estar formada por partículas en su mayor parte esféricas, compactas y lisas. Todas estas características permiten mejorar el estado de la interfase fibra-matriz cementante [9].

En este trabajo se exponen los resultados del comportamiento mecánico (resistencia a flexión, compresión e impacto), y químico (nivel de formación de productos de hidratación y su naturaleza) de morteros de GRC fabricados con cemento Pórtland sustituido por puzolanas en diferentes porcentajes y fibras álcali-resistentes. Se plantearon dosificaciones combinando los diferentes materiales puzolánicos antes mencionados con una relación agua/material cementante de 0,35 (entiéndase material cementante como la mezcla de cemento más adición puzolánica), una relación árido/material cementante de 0,67, con un contenido en fibra AR del 3% del total del peso del mortero y la cantidad de aditivo de acuerdo con las condiciones de trabajabilidad óptimas.

Se determinaron dos procesos de curado, el primero durante 28 días a 20°C para los morteros control y con sustitución puzolánica; el segundo, sólo para un grupo de probetas

con sustitución puzolánica, se curaron durante 7 días a 20°C y luego 21 días sumergidas en agua a 55°C, para acelerar la reacción puzolánica y el desarrollo de su resistencia. Posteriormente se sometieron a diferentes procesos controlados de ataque mediante agentes físicos y químicos en diferentes medios agresivos: ciclos de humectación – secado, hielo-deshielo y exposición ante agentes químicos agresivos, por inmersión en diferentes disoluciones. Paralelamente se realizó el proceso de envejecimiento sobre pastas sin fibras con igual relación agua/material cementante y los mismos porcentajes de sustitución, estudiándose la evolución de la reacción puzolánica mediante termogravimetría e identificando los productos hidratados mediante microscopía electrónica; adicionalmente se evaluó el estado de la fibra después de ser sometida a los procesos planteados fuera de la matriz cementante.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Materiales compuestos de cemento reforzados con fibras de vidrio

2.1.1 *Materiales compuestos*

Se considera que un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes, de manera que presente la mejor combinación posible [10]. De acuerdo con este principio, las mejores propiedades se obtienen con la combinación de dos o más materiales diferentes. El gran número de materiales compuestos que existe en la actualidad se ha creado para obtener mejoras en la combinación de propiedades mecánicas tales como rigidez, tenacidad y resistencia a la tracción y flexión, en condiciones ambientales normales y a elevadas temperaturas.

Generalmente están formados por dos fases: la matriz, que es continua y rodea a la otra fase, que se denomina fase dispersa; las propiedades de los compuestos son función de las propiedades de las fases, de sus proporciones relativas y de la forma, tamaño, distribución y orientación de la fase dispersa. La fase dispersa presenta generalmente mayor dureza y resistencia que la matriz; está formada por las partículas de refuerzo que tienden a restringir el movimiento de la matriz, en nuestro caso estas partículas son las fibras; es decir, la matriz transfiere el esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga. El nivel de resistencia o la mejora presente en el compuesto se debe a la fuerza de cohesión en la interfase matriz-partícula.

2.1.2 Conceptos generales del comportamiento mecánico de materiales compuestos reforzados con fibra

2.1.2.1 Influencia de la orientación y de la concentración de la fibra

La fase de refuerzo de los materiales compuestos obtiene su mejor comportamiento mecánico cuando se usan las fibras, debido a esto su amplia utilización. Las fibras pueden ser continuas o discontinuas, y estar alineadas o con orientación aleatoria (figura 2.1.1).

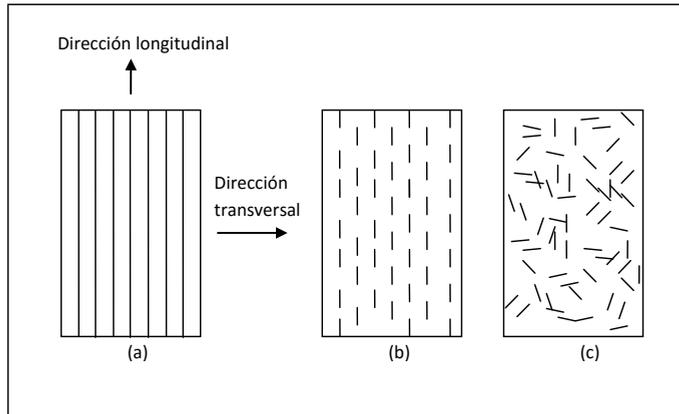


Figura 2.1.1. Representación esquemática de compuestos reforzados con fibras: (a) fibras continuas y alineadas, (b) fibras discontinuas y alineadas, (c) fibras discontinuas con orientación aleatoria [10].

Se ha observado que la resistencia de un material compuesto con fibras discontinuas alineadas, siempre es menor que la de un material compuesto con fibras continuas alineadas cuando la fracción de volumen de las fibras es igual; sin embargo, mientras más largas sean las fibras más resistente será el material, incluso acercándose a la de un material compuesto continuo [10]. Cuando las fibras están sometidas a esfuerzos multidireccionales, generalmente se utilizan fibras discontinuas con orientación aleatoria; aunque la eficiencia del refuerzo de estos compuestos es menor que la de los compuestos cuyas fibras están alineadas en dirección longitudinal (tabla 2.1.1), sus propiedades mecánicas son isotrópicas [11].

La producción de las fibras discontinuas es más rápida, menos costosa y permite la producción de elementos con formas especiales, imposibles con refuerzos de fibras continuas; estos aspectos deben contemplarse al seleccionar la longitud y orientación de las fibras, además del tipo de esfuerzo al que estará sometido el compuesto.

Tabla 2.1.1. Eficiencia del reforzamiento de compuestos con fibras orientadas en varias direcciones. [10].

Orientación de la fibra	Dirección del esfuerzo	Factor de eficiencia por orientación
Todas las fibras paralelas	Paralela a las fibras	1
	Perpendicular a las fibras	0
Fibras orientadas al azar y uniformemente distribuidas en un plano específico	Cualquier dirección en el plano de las fibras	3/8
Fibras orientadas al azar y uniformemente distribuidas en el espacio de tres dimensiones	Cualquier dirección	1/5

2.1.2.2 Influencia de la longitud de la fibra

Las características mecánicas de los materiales compuestos dependen de las propiedades de la fibra y del grado de transmisión de la carga aplicada al refuerzo a través de la fase matriz. En el caso de compuestos con fibras discontinuas, en el proceso de transmisión de carga, cobra importancia la resistencia de la interfase matriz - fibra.

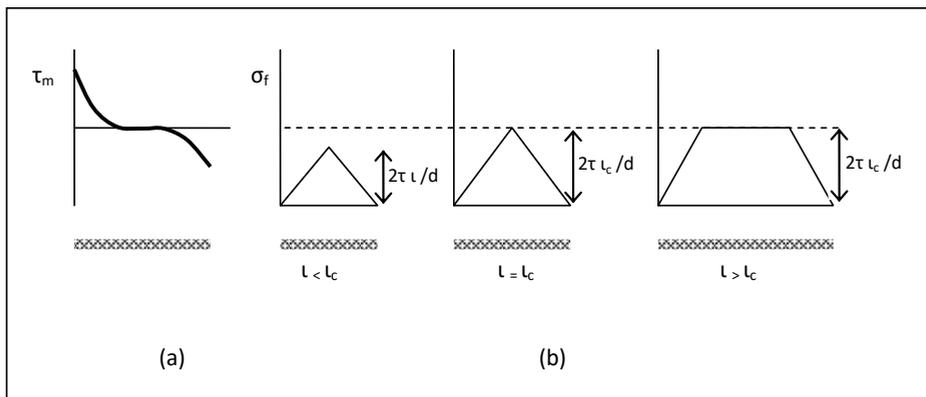


Figura 2.1.2. (a) esfuerzo de corte en la matriz, (b) esfuerzo de tensión en la fibra en función de la longitud de la fibra [10].

La diferente deformación entre las fibras y la matriz produce un esfuerzo de corte en la matriz, en la interfase matriz-fibra en dirección paralela a las fibras. Esta tensión (τ_m) tiene un máximo en los extremos de la fibra y un mínimo en la parte media de la misma (figura 2.1.2a). A su vez el esfuerzo de corte produce una tensión en las fibras (σ_f), que tiene un valor de cero en los extremos y aumenta hacia el medio de la fibra (figura 2.1.2b); este esfuerzo es proporcional a la longitud de la fibra y llega a su valor máximo para una longitud crítica de la fibra (l_c). Esta l_c está relacionada con la resistencia al corte de la matriz (τ_m), con la resistencia a la tensión de las fibras (σ_f) y con el diámetro de las fibras

(d) [10]. De acuerdo con la longitud de la fibra se pueden presentar diferentes mecanismos de falla del compuesto:

- Cuando la longitud de la fibra es menor a la longitud crítica ($l < l_c$) el esfuerzo no será suficiente para fracturar la fibra, se presentará primero el fallo de la matriz y la interfase o la falla por pull out (extracción de la fibra).
- Cuando la longitud de la fibra equivale a la longitud crítica ($l = l_c$), el pico de esfuerzo o esfuerzo máximo puede ser justo para generar la rotura de la fibra.
- Cuando la longitud de la fibra es mayor a la longitud crítica ($l > l_c$), el esfuerzo máximo afecta la zona central de la fibra generando su rotura.

2.1.2.3 *Influencia de la fase matriz*

La resistencia a la ruptura de los sólidos es fuerte, pero es sensible a la presencia de grietas. Un material con fibras discontinuas, las únicas grietas importantes necesariamente serán cortas a través del ancho de la fibra, y se limitarán a las fibras en las cuales existan [10]. Por tanto, es de esperar que un sólido constituido por fibras presente mayor resistencia a la fractura, que sólo se presenta si se rompen un gran número de aquellas (figura 2.1.3). Además, si se emplea una matriz adecuada, se pueden mantener juntas y al mismo tiempo proteger sus superficies contra daños debidos a la abrasión. La fase matriz ejerce varias funciones en el material compuesto:

- Unir las fibras y actuar como medio de distribución y transmisión de los esfuerzos a las fibras.
- El módulo de elasticidad de la matriz debe ser menor al de la fibra, de esa forma, al tratarse de un material con relativa plasticidad y blandura, actúa de barrera de separación entre las fibras evitando la propagación de fisuras entre las fibras, generando un material dúctil.
- Proteger las fibras del deterioro superficial que resulta de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio.

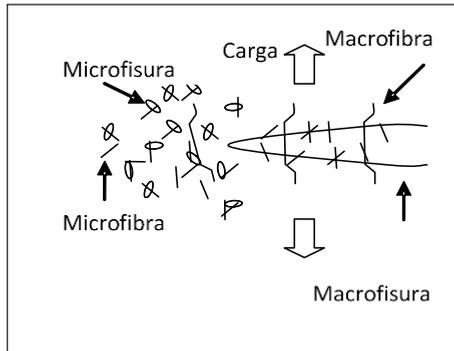


Figura 2.1.3. Escala relativa de la fisura con interacción de la fibra [32].

2.1.2.4 Anisotropía

Cuando un material compuesto presenta las fibras alineadas, y el esfuerzo es aplicado en dirección normal al eje de las fibras, el compuesto es débil y presenta una resistencia transversal baja. La resistencia transversal de las fibras generalmente es menor que la resistencia de la matriz y en este caso, las fibras ejercen un efecto negativo en el compuesto. Cuando un material tiene propiedades que varían según la orientación se dice que es anisotrópico [10].

Materiales compuestos con fibras alineadas son anisotrópicos, propiedad poco deseada ya que genera limitaciones para su aplicación. Se puede considerar como solución a este problema la orientación aleatoria de las fibras. Se genera un material con propiedades isotrópicas, aunque sus propiedades son menores a las de un compuesto con fibras alineadas [10] (siempre y cuando el material se someta a esfuerzos en la dirección del eje de la fibra, con la misma fracción volumétrica de fibras).

2.1.2.5 Endurecimiento

Varios son los mecanismos de endurecimiento que actúan en los materiales compuestos, el endurecimiento por transformación y por formación de microgrietas que se presenta en la matriz, y el endurecimiento por estela o puentes de fibra que se da entre la matriz y la fibra [10].

Durante el endurecimiento de la matriz cementante, se generan microgrietas alrededor de las partículas de árido; es decir, en la liberación del calor de hidratación, se genera una distribución fina de microgrietas que al unirse pueden generar grietas que pueden afectar la resistencia de la matriz. El endurecimiento por transformación se da cuando una partícula se convierte en la punta de la grieta, impidiendo su avance; este mecanismo no afecta la resistencia (figura 2.1.4a). Cuando en la matriz se producen grietas se genera

cierto grado de desunión, con la presencia de las fibras se formará un puente en las caras de la estela de la grieta que se propaga; para que la grieta continúe propagándose las caras deben abrirse, pero esto se ve impedido por el puente que forma la fibra, la cual tiene que deformarse de forma elástica o deslizarse (pull out) retrasando el avance de la grieta (figura 2.1.4b).

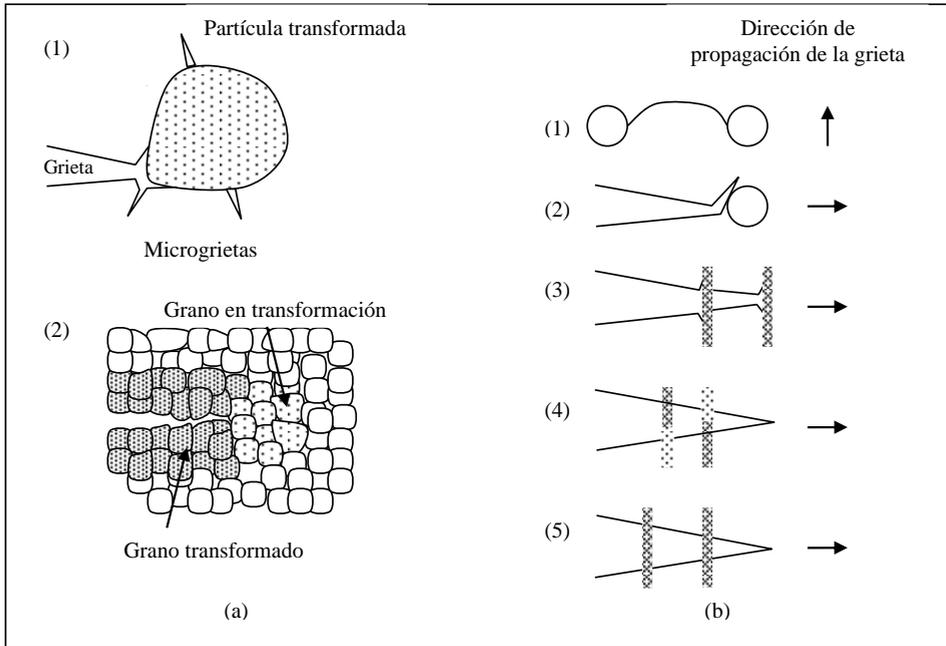


Figura 2.1.4. Mecanismos de endurecimiento en compuestos: (a) endurecimiento por transformación, (b) endurecimiento por estela: (1) curvatura de grietas, (2) desviación de grietas, (3) desunión, (4) extracción de fibras, (5) endurecimiento de estela [10].

2.1.2.6 Tenacidad

La tenacidad de un material es una medida de la energía absorbida por unidad de área agrietada. Es el resultado de la interacción de la fibra y la matriz. En las zonas agrietadas donde se forma el puente entre la fibra y la matriz, la fibra se puede romper o deslizarse y desprenderse progresivamente (pull out). Todo esto influye sobre la cantidad de energía absorbida en la propagación de la grieta y depende de la adherencia de la fibra a la matriz [10] [11].

El trabajo realizado por cada fibra durante el agrietamiento incrementará la absorción de energía aumentando la tenacidad. Si se quiere obtener una tenacidad alta, la fibra debe ser fuerte y la matriz se debe fracturar antes, el módulo de elasticidad de la fibra debe ser mayor al de la matriz. En el agrietamiento de la matriz se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Cuando el volumen de fibra es bajo, el compuesto se fracturará inmediatamente después de la matriz, y la resistencia de rotura del compuesto será similar a la de ésta, por separado.
- Con un volumen de fibras adecuado, después del agrietamiento de la matriz, el compuesto resiste cargas menores a la de rotura, es decir, se generará un comportamiento dúctil.
- Si el volumen de fibras es lo suficientemente alto, después del agrietamiento, las fibras resistirán cargas mayores por más tiempo, es decir, se generará un comportamiento tenaz.

2.1.3 Fibra de vidrio

Se constituye como uno de los materiales más utilizados como refuerzo en los materiales compuestos. Su composición fundamental es la sílice asociada a diversos óxidos: alúmina, alcalinos y alcalinotérreos; la mezcla de estos componentes por fusión y los procesos posteriores de fibrado y ensimado, permiten obtener un material de excelente adherencia fibra-matriz, con buenas propiedades dieléctricas y una relación de costes benéfica si se compara con otros materiales [12]. A continuación, se describe el proceso de fabricación de la fibra de vidrio:

- Se introduce en el horno de fusión la mezcla homogénea de las materias primas finamente molidas y dosificadas con precisión, y posteriormente se calientan a una temperatura que depende de la composición específica de cada tipo de fibra (1500°C aproximadamente).
- Luego de fundir el vidrio en el horno, se distribuye en canales que alimentan series de hileras (cada una compuesta por 400 a 4000 agujeros calibrados, entre 2 y 8 milímetros de diámetro) a una temperatura de 1250°C necesaria para el colado por gravedad para generar barras de milímetros de diámetro.
- A la salida de la hilera el vidrio es estirado a gran velocidad (entre 10 y 60 m/seg) y es enfriado primero por radiación y luego por pulverización de agua. El resultado de este proceso son filamentos de varias micras de diámetro por cada agujero.
- Los filamentos obtenidos no son utilizables debido a que no presentan cohesión y son vulnerables a la abrasión y a los ataques del agua, para contrarrestar estos defectos y conformar la fibra en función de su utilización, es necesario revestir los filamentos con una fina capa de ensimaje; éste es depositado a una temperatura de entre 80 y 120°C.
- Finalmente se procede a agrupar las fibras en unidades de acuerdo con los productos comerciales y finalmente se exponen a dispositivos de secado para eliminar el exceso de agua que conlleva el ensimaje.

2.1.3.1 Ensimaje

Dispersión acuosa de diversos compuestos químicos (tabla 2.1.2), que tiene por función generar una fina película encargada de revestir y agrupar los filamentos que componen las fibras; de acuerdo con el tipo de fibra, su aplicación y su disposición comercial se determina la combinación fibra- ensimaje [12]. La necesidad primordial del ensimaje es la de fortalecer el conjunto de la fibra de vidrio compuesto por cientos de filamentos, brindándole cohesión a los filamentos, aumentando o disminuyendo la rigidez y brindar protección contra la abrasión; sin él, la fibra presentaría los siguientes problemas [12]:

- Falta de cohesión entre filamentos.
- Sin resistencia a la abrasión entre filamentos y con superficies externas.
- Vulnerable al ataque del agua.
- Generación de cargas electrostáticas.
- Limitación para unirse químicamente a la matriz.
- No se adapta a los procesos de transformación.

Tabla 2.1.2. Principales componentes del ensimaje [12].

Constituyente	Porcentaje	Naturaleza química	Función
Líquido vector	85 -95	Agua	Soporte
Agentes filmógenos colantes	3 – 15	Acetatos, poliésteres, epoxi, copolímeros	Integridad, rigidez, protección, impregnación
Agentes lubricantes	0,05 - 2	Aminas con radicales grasos, oxialcoholamidas, sales de amonio cuaternario	Protección y lubricación
Agentes de puente	0,1 – 0,5	Silanos	Unión a la resina, resistencia, envejecimiento
Agentes antiestáticos	0,2 - 1	Sulfonatos de alquilarilo, sales de amonio cuaternario	Eliminar o reducir la electricidad estática

2.1.3.2 Fibra de vidrio E

El vidrio E es de los más usados en la industria, algunos ejemplos de su utilización son el aislamiento de conductores eléctricos, la fabricación de barnices y resinas sintéticas y de forma importante en la industria textil; adicionalmente ha sido ampliamente utilizada por la industria en la fabricación de materiales compuestos, donde ha llegado a representar cerca del 90% de los refuerzos utilizados [12]. En la tabla 2.1.3 se muestran los componentes más importantes de las fibras compuestas por vidrio E.

Sin embargo, las fibras de vidrio E presentan un grave inconveniente, el de ser atacadas por los álcalis cuando se utiliza como refuerzo de morteros de cemento Pórtland. Para evitarlo se puede recurrir a varios procedimientos: empleo de vidrios E con cementos ricos en alúmina y de bajo pH, vidrio E revestido con una película de resinas epoxídicas o empleándolo con cementos siderúrgicos, vidrio E con cementos de alto contenido en alúmina y añadiendo a la pasta un polímero [13]. Las soluciones sólo son adecuadas si los morteros no están sometidos a la acción de ambientes muy húmedos y si las temperaturas no son elevadas.

Tabla 2.1.3. Componentes del vidrio E [12].

Componente	Fórmula Química	Porcentaje
Sílice	SiO ₂	53-54
Cal	CaO	20 - 24
Magnesio	MgO	
Alúmina	Al ₂ O ₃	14 – 15,5
Óxido de Boro	B ₂ O ₃	6,5 - 9
Óxidos de Zirconio, sodio, potasio, hierro, titanio		≤ 1

2.1.3.2 Fibra de vidrio álcali-resistente

Si se opta por las fibras de vidrio álcali-resistente (AR) para generar el material compuesto, se obtienen los compuestos conocidos como GRC “Glass Fibre Reinforced Cement”; éste es el nombre comercial con el que se conocen a los composites formados por morteros de cemento reforzados con fibras de vidrio AR. La industria ha desarrollado un tipo de fibra con la capacidad de resistir este tipo de ambientes, se trata de las fibras compuestas por vidrio A con un alto contenido en álcalis y vidrio R con elevadas características mecánicas (resistencia a la tracción y elevado módulo de elasticidad) [12]; la fusión de estos componentes genera el vidrio AR, cuya principal característica es el álcali resistencia.

Tabla 2.1.4. Componentes del vidrio álcali-resistente [14].

Componente	Fórmula Química	Porcentaje
Sílice	SiO ₂	55-75
Óxido de Zirconio	ZrO ₂	15-20
Óxido de Sodio	Na ₂ O	11-21
Alúmina	Al ₂ O ₃	0-5
Óxido de Litio	Li ₂ O	0-5

Las fibras de vidrio álcali-resistentes son el principal componente de los morteros de GRC, tiene un diámetro que varía entre 14 y 20 µm y están compuestas aproximadamente por 200 filamentos; gracias a ellas se logran las características que distinguen a este

material, especialmente por sus componentes donde destaca el circonio que le proporciona la cualidad de álcali-resistencia (tabla 2.1.4) y por sus propiedades mecánicas (tabla 2.1.5) [14].

Tabla 2.1.5. Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio AR [14].

Propiedades	Vidrio AR
Densidad (g/cm ³)	2,68
Resistencia a la tensión (MPa)	3500
Módulo Elástico (GPa)	72
Elongación hasta la rotura (%)	4,3

2.1.4 Morteros de GRC

2.1.4.1 Elementos constituyentes

Generalmente los morteros de GRC se componen de cemento, arena silíceo, agua, aditivos y fibra de vidrio AR; cada uno de estos componentes se agrega dependiendo de las propiedades del producto final que se quiera obtener o del proceso de fabricación elegido. Se distinguen dos métodos de fabricación, el proceso de proyección simultánea y el premix. En la proyección simultánea se utilizan porcentajes de fibra del 5% del peso del total de la mezcla, y relaciones agua/cemento entre 0,30 y 0,35 y árido/cemento de 1. En el proceso de premix o premezcla se utilizan porcentajes de fibra del 3%, y relaciones agua/cemento de 0,35 y árido/cemento de 1 [1, 134]. Dependiendo de la proporción y longitud de las fibras, éstas pueden generar en los morteros de GRC diferentes características [1]:

- Proporciones bajas, disminuyen la segregación de materiales y evitan la microfisuración, proporcionando dureza y resistencia a los choques.
- Cuando se presentan entre el 1 y el 2%, su uso ideal es en mezclas armadas, reduciendo la densidad de los productos fabricados.
- Cuando se presentan entre el 2 y 3,5%, sirven de refuerzo primario en productos moldeados y vibrados de bajo costo.
- Cuando se utiliza un 5%, se incluyen en materiales que requieren gran resistencia.
- Fibras muy largas pueden dar problemas de amasado, de destrucción y deterioro superficial de la fibra por abrasión; la longitud utilizada para el proceso de premix está entre 6 y 24mm, siendo la de 12mm la de mejores prestaciones; en el proceso de proyección simultánea, la longitud ideal oscila entre los 30 y 45mm.

2.1.4.2 Proceso de proyección simultánea

Los sistemas de proyección simultánea son utilizados cuando se requieren elementos de gran tamaño y resistencia; este proceso consiste en la proyección de capas compactadas entre sí hasta formar el espesor de la lámina o panel de GRC, generalmente entre 10 y 15mm, generando un refuerzo en forma bidireccional. La proyección se realiza de manera concéntrica, proporcionando mortero e hilos cortados simultáneamente desde un solo punto. Este proceso simultáneo puede ser: a) manual (figura 2.1.5), donde un operario dirige la pistola de proyección; b) automática (figura 2.1.6), donde la pistola se desplaza de lado a lado sobre los moldes; c) con proyección robotizada, donde las máquinas controlan por ordenador la velocidad y ciclos de proyección, la intensidad del bombeo, entre otros.

Figura 2.1.5. Proceso de proyección simultánea manual [Elaboración propia].



Figura 2.1.6. Proceso de proyección simultánea automática [https://fibretech.org/grc-guide/production-techniques/05/03/2020].

2.1.4.3 Proceso de premezcla (premix)

El refuerzo de la fibra de vidrio actúa de forma tridimensional, pues las fibras se orientan en las tres direcciones de forma aleatoria. Para obtener una mezcla de óptima calidad se debe realizar en dos fases, la primera obtener un mortero homogéneo, lo que es fundamental para la incorporación uniforme del refuerzo y para conseguir la trabajabilidad necesaria, y la segunda consiste en la incorporación del refuerzo en forma de hilos cortados al mortero y su posterior amasado controlado para evitar el deterioro de la fibra.

En el proceso de fabricación se puede destacar las siguientes fases:

- Realización de la premezcla y colado en un molde.
- Vibrado del molde, se realiza a medida que se va vertiendo el mortero en el molde, con el vibrado se distribuye el mortero en el molde y se libera el aire atrapado permitiendo la compactación (figura 2.1.7).
- Desmoldado y posterior curado.



Figura 2.1.7. Colado y vibrado mortero preparado por el proceso de premezcla
[<https://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/cd-vol-10-num-6-august-september-20101/tools-concrete-mixers/05/03/2020>].

2.1.4.4 Propiedades mecánicas, químicas y físicas

Los morteros de GRC fabricados por el proceso de premix presentan menores prestaciones mecánicas que los fabricados por el proceso de proyección simultánea, la aplicación de cada uno de ellos dependerá de los requerimientos mecánicos de los

elementos a fabricar y de las condiciones de fabricación y puesta en obra. A continuación, en la tabla 2.6, se muestran las características mecánicas que corresponden a una placa de GRC de espesor normal de 10mm, a los 28 días de fabricación, y con una relación arena/cemento comprendida entre 0,5 y 1.

Tabla 2.1.6. Propiedades mecánicas GRC (10 mm de espesor, 28 días de fabricación) [13].

Característica	Unidad	Mortero común	Proyección	Premezcla
Contenido de fibra	% peso	0	5	3
Módulo de rotura a flexión (MOR)	MPa	5-12	20-30	10-14
Límite elástico a flexión (LOP)	MPa	3-6	7-11	5-8
Módulo de rotura a tracción (MOR)	MPa	3-5	8-11	4-7
Límite elástico a tracción (LOP)	MPa	3-5	5-7	4-6
Resistencia a compresión	MPa	20-50	50-80	40-60
Resistencia al choque	kJ/m ²	5-10	10-25	10-15
Módulo de elasticidad	GPa	9-15	10-20	10-20
Deformación a la rotura	%	0,1-0,2	0,6-1,2	0,1-0,2
Densidad del material	g/cm ³	1,7-2,1	1,9-2,1	1,8-2,0

2.1.4.5 Cualidades del GRC

Gracias a las cualidades de las fibras AR, los elementos fabricados con GRC presentan excelentes propiedades, convirtiéndose por su alto rendimiento y prestaciones en un refuerzo ideal para los materiales compuestos de cemento. Las principales características del GRC son [13]:

- Alta resistencia a la tracción y flexión.
- Gran resistencia al impacto.
- Impermeabilidad, aún en pequeños espesores.
- Resistencia a los agentes atmosféricos.
- Incombustibilidad, derivada de las características de sus componentes.
- Aptitud para reproducir variados acabados.
- Aptitud para ser moldeado.
- Gran resistencia a la fisuración.
- Reducción de la carga (peso) en los edificios.

2.1.4.6 Limitaciones del GRC

La modificación de las propiedades de los compuestos de GRC con el tiempo de envejecimiento es un aspecto de este material que es de extrema importancia; se refleja directamente en una disminución importante de las propiedades mecánicas y especialmente de la pérdida de resistencia y tenacidad. Este aspecto se convierte en una limitación a la hora de aplicar los compuestos de GRC; por esta razón actualmente se

estudia el desarrollo de nuevos materiales que puedan mejorar la durabilidad de estos compuestos, realizando modificaciones tanto en la estructura de la fibra como en la matriz cementante, y evaluando su comportamiento durante el envejecimiento [7]. Dos son los mecanismos que se conocen como causantes del deterioro de los compuestos de GRC:

- El primero es el ataque químico de las fibras álcali-resistentes cuando los compuestos se encuentran en ambientes húmedos, debido a la alta alcalinidad de la matriz cementante.
- El segundo es la acumulación de productos de hidratación entre los filamentos de las fibras, mecanismo microestructural. Este fenómeno puede ser nocivo para la fibra por varias razones: los cristales de hidróxido cálcico se incrustan en la superficie de la fibra, disminuyendo sus propiedades; la interfaz entre la matriz cementante y la fibra es fortalecida por los productos de hidratación del cemento, factor que puede incrementar las resistencias, pero en detrimento de la tenacidad del compuesto.

Finalmente se deben tener en cuenta los defectos presentes en la fibra, ya sea por el proceso de fabricación o por el proceso de amasado. Mediante estudios de microscopía electrónica, se ha observado que los especímenes jóvenes que no se han sometido a procesos de envejecimiento conservan sus propiedades mecánicas. Al ser sometidos a diferentes esfuerzos, presentan un comportamiento dúctil, y se aprecia que las fibras se conservan en buen estado y sin presencia de productos de hidratación entre sus filamentos; pero al ser sometidos a envejecimiento, se inicia el proceso de debilitamiento del compuesto, disminuyendo sus propiedades mecánicas; además, se observan productos de hidratación adheridos a la fibra y entre sus filamentos.

Para estimar la durabilidad de las características del GRC, se emplean varias pruebas de envejecimiento acelerado: someter los especímenes a una temperatura de curado superior a la establecida por norma, a procesos de curado a vapor con baja presión o sumergiéndolos en agua a elevadas temperaturas. El más común es el de la inmersión de los especímenes en agua a elevadas temperaturas con respecto al ambiente de servicio, especificando las equivalencias en tiempo de curado bajo condiciones normales.

2.2 Importancia de la durabilidad de hormigones y morteros

Siempre se exige a las construcciones en general, la conservación de las funciones para las que fueron diseñadas durante un periodo específico de tiempo, conocido generalmente como vida útil; es decir, conservar las propiedades de diseño, con el menor grado de alteración y sin incurrir en un mantenimiento excesivo. El concepto de durabilidad implica conocer la evolución del material en su entorno y la respuesta ante las acciones

físicas y químicas que se pueden presentar, es necesario controlar la degradación que se presenta y que genera una disminución de sus propiedades con el tiempo de exposición.

Un hormigón es “durable” cuando resiste, en grado satisfactorio, los efectos de las condiciones del entorno a los que ha sido expuesto, como el desgaste, las condiciones atmosféricas y los agentes fisicoquímicos que lo pueden afectar [8]. Generalmente cuando se habla condiciones de durabilidad, se refiere a tres parámetros fundamentales: resistencia mecánica, estabilidad en volumen y resistencia química; estos factores permiten determinar si los materiales conservan inalteradas sus propiedades y si continúan siendo funcionales y seguros en un tiempo determinado.

Específicamente para el caso del hormigón en masa y de morteros, se pueden generar deterioros por causa de la acción de agentes agresivos tanto externos como internos, que afectan al conjunto de los materiales constituyentes o a uno en específico, produciendo efectos nocivos que se pueden manifestar en forma de erosiones, fisuras, expansiones, etc. Generalmente los factores que influyen en la durabilidad del hormigón dependen del medio en el que se desarrollan y de la naturaleza y calidad de sus constituyentes; para tener un conocimiento general de los factores que pueden afectar la durabilidad de hormigones y morteros, se describen a continuación los mecanismos de ataque tanto físico como químico que pueden generar degradación de estos materiales.

2.2.1 Acciones de tipo físico

Las acciones de tipo físico pueden deteriorar al hormigón dando lugar a su desgaste superficial, pérdida de integridad o disgregación; pueden ser de diferentes tipos. A continuación, se describen aspectos generales sobre las acciones más comunes que pueden afectar a los materiales compuestos de hormigón.

2.2.1.1 Acción del hielo – deshielo

Se genera en aquellos elementos situados a la intemperie y en climas fríos, con oscilación de la temperatura incluso por debajo de cero grados centígrados. Consiste en la congelación y posterior descongelación del agua absorbida por morteros y hormigones, con el consecuente aumento de volumen por efecto de la congelación del agua; se producen tensiones internas en los poros del hormigón, que pueden iniciar fenómenos de desconchamientos superficiales, micro fisuración y agrietamientos. Estos efectos son tanto más importantes cuanto mayor sea la porosidad del hormigón y cuanto mayor sea el número de ciclos hielo-deshielo a los que se encuentre sometido [155].

2.2.1.2 Acción del agua en movimiento

Los daños provocados por el agua en movimiento pueden ser generados por tres problemas; la abrasión, la cavitación y la abrasión por impacto. Estos fenómenos se presentan generalmente en obras hidráulicas, debido a la alta velocidad del agua, la cual además puede transportar partículas sólidas o diferentes productos que pueden generar desgaste. Hormigones de altas resistencias y superficies bien acabadas, son materiales que presentan un buen comportamiento frente a estas acciones [155].

La abrasión sobre el hormigón es generada cuando el agua transporta a gran velocidad partículas de arena en suspensión, causando un desgaste superficial importante sobre él; generalmente el daño depende en gran medida de la resistencia del hormigón, el tipo de árido empleado, la velocidad del agua y de las partículas en suspensión (cantidad y naturaleza). La abrasión por impacto se da como resultado del choque del agua a alta velocidad contra el hormigón; erosionando primero la pasta de cemento, luego el árido fino y finalmente el árido grueso, formando agujeros importantes en el hormigón. Para evitar los efectos de estos fenómenos se recomienda emplear áridos de gran tamaño debido a la menor resistencia de pasta y mortero [155].

La cavitación, es consecuencia del choque del agua a gran velocidad contra irregularidades del hormigón, formando burbujas que implosionan rápidamente sobre la superficie; el constante y rápido cambio de impactos y succiones capilares producidas, da lugar al arrancamiento progresivo del hormigón [155]. Para prevenir el fenómeno de cavitación es recomendable el uso de árido de tamaño reducido y acabados superficiales de calidad.

2.2.1.3 Abrasión por sólidos

Este tipo de abrasión se genera por el rozamiento sobre el hormigón, especialmente en suelos de uso industrial, por el roce de estructuras y tráfico, por el impacto y deslizamiento de materiales u objetos; produciendo un desgaste superficial, que modifica la superficie y puede ocasionar su destrucción. Para el caso de pavimentos en hormigón, la resistencia al desgaste depende de la resistencia a compresión y de manera muy importante de la resistencia al desgaste de los áridos. La resistencia al impacto (percusión) de partículas sólidas, la adherencia entre pasta y árido cobra importancia [155]. De acuerdo con el uso específico de los pavimentos industriales, se determinan tratamientos superficiales para hacer frente a estas acciones, como el uso de resinas sintéticas y de áridos especiales, como el corindón y la bauxita, entre otros.

2.2.2 Acciones de tipo químico

Los agentes químicos son los causantes directos de la corrosión del hormigón, y la velocidad con la que un hormigón es afectado por estos agentes, determina su durabilidad; generalmente el blanco principal de las acciones de tipo químico es el cemento y en segunda instancia los áridos. La presencia de agua es fundamental para el desarrollo de los procesos de corrosión, además de disolver y difundir componentes agresivos, también tienen un papel importante la temperatura y la permeabilidad del hormigón. Los agentes químicos actúan sobre los silicatos cálcicos, aluminatos cálcicos y portlandita, entre otros, consumiendo alguno de éstos, o bien forman nuevos productos con propiedades diferentes a las iniciales y menos favorables para el hormigón.

La degradación química de hormigones presenta, principalmente, los siguientes mecanismos de reacción: a) Lixiviado: este mecanismo se observa por la sucesiva pérdida de masa del hormigón; b) Hinchamiento y posterior rotura: este mecanismo es debido a la formación de compuestos expansivos, en el interior de los poros capilares del hormigón [8]. A continuación, se describen aspectos generales sobre los agentes químicos más comunes que pueden afectar la durabilidad de hormigones y morteros.

2.2.2.1 Ataque por sulfatos

Los sulfatos son quizás los agentes agresivos químicos más perjudiciales para el hormigón, su acción junto con el agua produce un ataque directo al cemento, creando compuestos fuertemente expansivos. Los compuestos producidos por la reacción de los sulfatos con los componentes del cemento pueden llegar a producir la fisuración y pérdida de resistencia del hormigón; debido a la reacción de los iones sulfato con el aluminato tricálcico (C_3A) del cemento, se forma trisulfoaluminato cálcico hidratado (etringita secundaria) también llamada sal de Candlot ($Al_2O_3 \cdot 3CaO \cdot 3CaSO_4$), agente que es fuertemente expansivo y presenta un volumen 2.5 veces superior al del aluminato de partida; como consecuencia de esta expansión se produce la disgregación total del hormigón por la destrucción del material conglomerante.

Los sulfatos pueden encontrarse en el terreno, en contacto con cimentaciones, pueden estar en los fluidos que transporta una tubería o que están en contacto con un canal o una presa, pueden acompañar al agua de amasado o de curado de un hormigón, o bien pueden formarse por oxidación del SO_2 existente en atmósferas industriales o urbanas húmedas, y por tanto, en contacto con hormigones situados a la intemperie [155].

El caso del agua de mar es especial, ésta contiene sulfatos de calcio, magnesio y sodio, entre otros, que reaccionan con el aluminato tricálcico y cloruros que solubilizan la cal, pero el ataque es menos intenso que el de un agua que sólo contuviese la misma cantidad

de sulfatos que la de mar debido a que los cloruros presentes atenúan la acción de los sulfatos al crear cloro aluminato no expansivo o sal de Friedel ($C_3AH_{10}CaCl_2$).

2.2.2.2 *Ataque por cloruros*

La acción de los cloruros sobre el hormigón es nociva, y se puede producir gracias a los procesos de transporte a través del agua de los poros; primero debido al gradiente de concentración que se genera entre el hormigón y el ambiente exterior, y al fenómeno físico químico de la difusión; segundo debido a la humectación intermitente del hormigón, acción que permite al agua y las sustancias disueltas penetrar rápidamente en los poros del hormigón, gracias al fenómeno físico de succión capilar (ciclos de humectación-secado). Por estos factores se entiende la importancia de la porosidad para el ataque por cloruros, ya que de ella depende la resistencia del hormigón ante el transporte de sustancias disueltas en el agua del exterior al interior.

La acción de los cloruros depende de los iones a los que este unido, por ejemplo, con cloruro magnésico se puede producir un ataque sobre la portlandita formando productos solubles como el cloruro cálcico, el cual se elimina por lixiviación generando mayor porosidad. También una disolución concentrada de cloruro sódico, a largo plazo puede generar problemas en la armadura del hormigón cuando los cloruros penetran por los poros; además algunas sales tales como el cloruro magnésico al reaccionar con la portlandita se pueden cristalizar, creando tensiones importantes que pueden afectar el hormigón [155].

2.2.2.3 *Ataque por ácidos*

La agresividad de los ácidos sobre el hormigón se genera por el carácter alcalino de la pasta cementante, representada principalmente por el hidróxido cálcico, además de otros compuestos como los silicatos y aluminatos cálcicos hidratados; la acción de los ácidos transforma estos compuestos en sales cálcicas que en su mayoría son solubles, condición que genera un incremento de la porosidad y de la superficie disponible para el ataque, cuando las sales son eliminadas por lixiviación. También se puede generar un ataque de los ácidos a los áridos calizos o dolomíticos presentes en el hormigón [15]. Estas condiciones generan una disgregación gradual del hormigón.

La agresividad de los ácidos está determinada por su naturaleza y grado de concentración, y por el pH en la disolución del ácido; de esta forma, será más agresiva la acción del ácido, cuanto menor sea el pH presente. Además del pH, la reacción depende también de la solubilidad de las sales cálcicas resultantes, y la vida útil del hormigón dependerá de la velocidad con que estas sales sean disueltas. El descenso del pH del hormigón debido al

ataque ácido puede generar la despasivación de la armadura en caso de hormigón armado, iniciando una corrosión generalizada del refuerzo; los óxidos expansivos presentes en la corrosión crean tensiones internas que pueden fisurar el hormigón y hacerlo más vulnerable ante nuevos ataques.

2.3 Adiciones minerales

La composición tradicional de los hormigones mezcla de cemento, áridos y agua, ha dado paso a la inclusión de nuevos materiales, de carácter orgánico y mineral, que modifican los procesos de mezclado, su puesta en obra, sus prestaciones mecánicas y su durabilidad. Se puede entender por adición mineral, aquel material inorgánico que se presenta finamente dividido, que al ser añadido al hormigón mejora o confiere alguna propiedad especial; ciertos materiales pueden ser considerados como adiciones minerales no activas como el filler calizo; pero son aquellas que presentan un grado de actividad, las que realmente se consideran como adición y en este caso activa, debido a su acción puzolánica o hidráulica sobre el hormigón (tabla 2.3.1).

La acción puzolánica es la generada por un material silíceo o silicoaluminoso, el cual posee una baja o nula capacidad cementante, que finamente dividido y en presencia de humedad y a temperatura ambiente, reacciona químicamente con el hidróxido cálcico, generando un compuesto de propiedades cementantes [16]. La acción hidráulica, es la generada por un material finamente dividido, no cristalino o con baja cristalinidad, que contiene la cantidad suficiente de calcio para ser diluido en contacto con el agua en presencia de aluminatos y silicatos para formar un compuesto de propiedades cementantes en medio acuoso [16].

2.3.1 Materiales puzolánicos

La reacción puzolánica pura es una reacción química entre los componentes de la puzolana y el hidróxido cálcico; para las mezclas de puzolana y cemento Pórtland, la reacción se da con el hidróxido cálcico o portlandita liberada durante la hidratación del cemento (procedente de la hidratación de los silicatos tricálcicos y bicálcicos). Se trata de una reacción ácido-base, el reactivo alcalino y ácido corresponden al hidróxido cálcico y a la puzolana respectivamente. Para que el material finamente dividido pueda ser considerado una puzolana, debe cumplir dos condiciones necesarias [16]:

- La composición química debe ser rica en óxidos de carácter ácido, tales como el óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y el óxido de hierro (Fe_2O_3), todos ellos de carácter amorfo.

- El carácter amorfo que depende de la forma de producción de los materiales puzolánicos, los cuales se pueden obtener de dos formas: por enfriamiento rápido de un material fundido, quedando los átomos atrapados en una estructura desordenada, generando un sólido amorfo; o por la destrucción de otros materiales perfectamente ordenados, que, al ser sometidos a elevadas temperaturas, facilita que los átomos se enlacen de forma poco ordenada en sus posiciones cinéticamente más favorables.

Tabla 2.3.1. Clasificación, composición y características de las partículas de adiciones activas para cemento [16].

Clasificación y adiciones	Composición química y mineralógica	Características de las partículas
Adición hidráulica		
Escorias de alto horno	Silicatos vítreos que contienen Ca, Mg y Al. Contenido cristalino bajo, con compuestos del grupo de la melilita.	Debe acondicionarse por secado y molienda, hasta obtener una finura Blaine de 500 m ² /kg. Partículas irregulares y ligeramente rugosas.
Cenizas volantes calcáreas	Silicatos vítreos que contienen Ca, Mg, Al y alcalinos. Contenido vítreo medio (cuarzo y C ₃ A). También frecuente la cal libre y la periclusa. Puede mostrar carácter puzolánico.	Material en forma de polvo. Finura Blaine entre 300 y 400 m ² /Kg. Muchas partículas son esféricas, con textura lisa o rugosa. Es frecuente encontrar también partículas irregulares.
Adición puzolánica de alta reactividad		
Humo de sílice	Óxido de silicio en elevadas proporciones, de tipo amorfo,	Polvo extremadamente fino, formado por partículas esféricas de diámetro medio de 0,1 µm. Superficie específica de 20 m ² /g.
Metacaolín	Óxidos de silicio y de aluminio, de tipo amorfo.	Polvo muy fino, con diámetro medio de 1-5 µm. Partículas irregulares y de textura rugosa.
Ceniza de cáscara de arroz	Óxido de silicio de elevada pureza, de tipo amorfo. En el caso de estar cristalizada, su reactividad disminuye.	Partículas de diámetro menor de 45 µm, con elevada porosidad abierta, de textura rugosa y de forma irregular.
Adición puzolánica de reactividad media		
Cenizas volantes silíceas	Silicatos vítreos que contienen Al, Fe y alcalinos. Contenido cristalino bajo: cuarzo, mullita, sillimanita, hematites y magnetita.	Material en forma de polvo, finura Blaine entre 200 y 300 m ² /kg. La mayor parte de las esferas son sólidas de textura lisa. En ocasiones presenta cenosferas y plerosferas.
Puzolanas naturales	Vidrios de aluminosilicato, con algunos componentes cristalinos: mica, cuarzo y feldespatos.	El material debe ser molido por debajo de 45 µm. Las partículas son irregulares y de textura rugosa.
Adición puzolánica de reactividad baja		
Escorias de alto horno enfriadas lentamente, cenizas de parrilla, esquistos calcinados.	Esencialmente, presentan gran proporción de materiales cristalinos, y bajos contenidos en material amorfo.	El material debe ser finamente pulverizado para que se active su puzolanidad. Las partículas son irregulares y de textura rugosa.

En la reacción puzolánica se combinan los óxidos ácidos (Al_2O_3 y SiO_2) con el hidróxido cálcico, generando hidratos con carácter cementante e hidráulico [16]. De esta manera, se deben tener en cuenta dos reacciones, la primera es la hidratación del cemento, hidratación de los silicatos bicálcico (C_2S) y tricálcico (C_3S) formando el gel silicato cálcico hidratado (C-S-H) y el hidróxido cálcico (CH); la segunda es la reacción del calcio resultante de la hidratación del cemento en forma de hidróxido cálcico (CH), que no contribuye al desarrollo de las resistencias, el cual reacciona con los componentes de la puzolana formando silicatos, aluminatos y silicoaluminatos cálcicos hidratados (C-S-H, C-A-H, C-A-S-H), compuestos que sí contribuyen al desarrollo de las resistencias mecánicas.

2.3.2 Beneficios del uso de adiciones minerales en cementos y hormigones

En la actualidad, son muchos los beneficios que se obtienen por el uso de adiciones minerales, por ejemplo el uso de una tonelada de cenizas volantes representa en términos medios, la reducción del consumo de cemento en cerca de 0,8 t de cemento y 3.000 MJ de energía obtenida de combustibles fósiles [17]. La sustitución de productos originales por diferentes tipos de subproductos representa variados beneficios:

- Ventajas de tipo tecnológico: algunas adiciones minerales permiten obtener mejores materiales, con mejores resistencias y más durables.
- Ventajas de tipo económico: las adiciones pueden sustituir parcialmente constituyentes de valores representativos, especialmente el cemento; además, generalmente las adiciones, por tratarse de subproductos, son materiales baratos y sólo incurren en costos de transporte.
- Ventajas de tipo ecológico: el uso de las adiciones en cementos y hormigones, además de evitar su depósito en vertederos, preserva el consumo de recursos naturales o materias primas (tanto en la fabricación del clinker, cementos de adición, como en la sustitución de cemento en hormigones), produce ahorro energético y un ahorro en la producción de emisión de gases de efecto invernadero, en particular el dióxido de carbono (CO_2).

Hormigones y morteros tienen como componente principal el cemento Pórtland tipo I, por su función como conglomerante; este material presenta problemas de durabilidad frente al ataque químico, como se ha tratado anteriormente, debido en parte a que es un material poroso. La acción de las puzolanas, tanto naturales como artificiales, al sustituir parte del cemento Pórtland para fabricar hormigones y morteros, permite reducir la fracción de cemento presente en la matriz, susceptible a diferentes tipos de ataques; disminuyendo además la cantidad de hidróxido cálcico o portlandita liberada como

producto de hidratación del cemento, modificando de forma benéfica la matriz cementante.

Las puzolanas son materiales finamente molidos, con una elevada superficie específica, que, al reaccionar con el hidróxido cálcico, producto de la hidratación del cemento, producen mayor cantidad de silicatos y aluminatos cálcicos hidratados semejantes a los productos de hidratación del cemento. Estos ocupan una mayor cantidad de poros, reduciendo su tamaño y como consecuencia se obtiene un hormigón más compacto e impermeable y, por tanto, más durable.

2.3.3 Humo de sílice (HS)

El humo de sílice es un producto secundario procedente de la fabricación de silicio elemental y aleaciones ferro silíceas en hornos de arco eléctrico; es un material de características amorfas, debido a la gran velocidad de enfriamiento a la que es sometido. Presenta una composición química compuesta fundamentalmente por SiO_2 ($\geq 85\%$), se encuentran además componentes minoritarios tales como Fe_2O_3 , CaO , MgO , entre otros. Es un producto de gran finura, sus partículas son esféricas con un diámetro medio de $0,1 \mu\text{m}$ y presentan una gran superficie específica ($20 \text{ m}^2/\text{g}$ frente a $0,3 - 0,35 \text{ m}^2/\text{g}$ del cemento Pórtland) [17].

El humo de sílice es un producto con un gran carácter puzolánico, gracias a su morfología, constituido por partículas esféricas de gran finura, y a su elevado contenido de sílice. Al incorporarlo como adición o sustitución puzolánica (reemplazando parcialmente al cemento), se produce un efecto benéfico sobre los elementos fabricados con los morteros y hormigones que lo contienen; como resultado se obtiene una matriz cementante más densa, impermeable, lo cual favorece al incremento de las propiedades mecánicas y de durabilidad. Es habitual el uso de aditivos plastificantes para compensar el efecto negativo que tiene el humo de sílice sobre la trabajabilidad de los morteros.

Comercialmente se presenta en variados formatos: en forma de material micropelletizado, en forma de suspensión acuosa y como producto sólido en polvo compactado y sin compactar; siendo más usado comercialmente en forma de polvo compactado o densificado (HSD). El humo de sílice sin tratamientos (no densificado) es el subproducto que se recoge en los filtros de los hornos durante la producción de silicio metal o ferro silicio, y presenta una gran finura y baja densidad ($200 - 350 \text{ kg}/\text{m}^3$); el humo de sílice densificado resulta del tratamiento de compactación posterior.

El HSD es un material aglomerado de partículas micrométricas y submicrométricas con una densidad aproximada de entre $480 - 650 \text{ kg}/\text{m}^3$ [18], la densificación a la que es

sometido transforma el material a tamaños de partículas que oscilan entre 20 – 100 μm , motivo por el cual es necesario desagregar las partículas y disminuir su tamaño. Para la transformación del material varios autores plantean un proceso efectivo conocido como sonicación del HSD, el cual consiste en la aplicación de ultrasonidos mediante una sonda a un medio acuoso que contiene las partículas densificadas de humo de sílice; se genera un material de características especiales y con alta reactividad puzolánica y en consecuencia una mejora importante de las resistencias mecánicas, humo de sílice sonicado (HSS), el cual presenta una distribución de tamaños de partícula notablemente inferior al HSD [18].

2.3.4 Catalizador de craqueo catalítico (FCC)

El proceso de craqueo es la reformación de la estructura molecular de algunos hidrocarburos, para mejorar naftas y convertirlas en combustibles para automotores y para producir compuestos aromáticos [18]. Mediante la desintegración o craking de una molécula de hidrocarburo, ésta se fractura en dos o más fragmentos pequeños, rompiendo enlaces carbono-carbono; existen tres tipos de desintegración: pirólisis, desintegración catalítica e hidrólisis.

- Pirólisis. Es el proceso pionero usado para la desintegración, empleado principalmente en operaciones de coquificación y reducción de viscosidad. Su finalidad principal es la de valorar residuos no destilables [189].
- Desintegración catalítica de lecho fluido (FCC). La desintegración catalítica se emplea principalmente para fabricar gasolina, olefinas e isobutano, generalmente por descomposición selectiva de destilados pesados; progresivamente desplazó al proceso de pirólisis. Debido a que las reacciones de desintegración son gobernadas por catalizadores preparados específicamente, la gasolina producida contiene proporciones sustanciales de hidrocarburos con alto índice de octano como compuestos aromáticos, parafinas y olefinas. Las sustancias empleadas como catalizadores en las unidades de desintegración catalítica modernas son de naturaleza cristalina y pueden ser denominadas catalizadores zeolíticos, ya que son silicatos de alúmina hidratados modificados. Se presentan en forma de microesferas, con un tamaño promedio de 60 μm de diámetro (10% nominal en peso se presentan con un tamaño menor de 40 μm y otro 10% mayor de 105 μm). La circulación dentro del sistema catalizador reduce gradualmente el tamaño de las microesferas, debido a la formación de finos que salen de la unidad en la corriente de gas de combustión del regenerador; para equilibrar estas pérdidas se agrega catalizador nuevo [20].
- Hidrólisis. Este proceso difiere de la desintegración catalítica en que emplea diferente catalizador y una atmósfera de hidrógeno a presiones totales de entre

800 y 2500 psi. Debido a que la acumulación de un depósito carbonáceo sobre el catalizador es extremadamente lenta, los periodos de proceso en línea varían de algunas semanas a un año o más. En los procesos de hidrólisis se puede utilizar una gama más amplia de materias primas que en la desintegración catalítica; entre éstas se incluyen no sólo destilados pesados, sino también sustancias extraídas por medio de solventes de productos residuales, los que contienen varias partes por millón de complejos organometálicos [20].

En general, se puede decir que las partículas de FCC presentan una morfología variada, de forma esférica y en algunos casos irregulares, presentan un alto grado de porosidad y una superficie específica alta. Una característica adicional es el índice de blancura del FCC con valores mínimos de 75, característica a tener en cuenta cuando se utilice cemento blanco para la preparación de morteros y hormigones, en la norma UNE 80305:2001 se define el procedimiento para la medida del color en las cementos blancos y fija un índice de blancura mínimo de 85 [21].

El FCC se considera como una adición puzolánica muy activa a edades tempranas, mejorando de forma importante las resistencias mecánicas de los morteros. Éste puede ser utilizado como sustitución de parte del cemento o como sustitución de parte del árido, caso en el cual funcionará como una adición cementante: para ambos casos se obtienen mejoras en la resistencia. Por tratarse de partículas porosas molidas, con una superficie específica alta, su presencia en los morteros demanda mayor cantidad de agua para el amasado, hecho que se soluciona con la utilización de plastificantes para evitar problemas de trabajabilidad.

2.3.5 Ceniza volante (CV)

Según la norma UNE 450-1:2006 [22], se define a las cenizas volantes como “el producto sólido y en estado de fina división procedente de la combustión del carbón pulverizado en los hogares de las centrales termoeléctricas y que es arrastrado por los gases del proceso y recuperado de los mismos filtros”. De las cenizas producidas aproximadamente el 80% corresponde a cenizas volantes y el 20% a cenizas de hogar. En los últimos años, a pesar del incremento del uso de energías renovables, el carbón sigue siendo una opción energética importante.

Durante el año 2015 el 29% de la energía mundial se generó a partir del carbón y se espera que para el año 2035 sea del 24%. Para el año 2015 China fue el mayor consumidor de carbón, con 50% de la demanda mundial (1920 millones de toneladas equivalentes de petróleo- mtep) y se espera que siga en 47% para 2035; en la India las proyecciones indican que se duplicará el consumo como fuente energética para el sector eléctrico entre

2015 y 2035 pasando de 407 a 833 mtep; en Estados Unidos, aunque se disminuirá el consumo a la mitad aun representa porcentajes importantes de 396 mtep en 2015 a 198 en 2035. En cuanto a la reutilización China reutiliza un 70%, India un 43% y Estados Unidos un 53%, Italia y países bajos reutilizan el 100%; las principales áreas de aplicación identificadas son: 44,19% en la producción de cemento y concreto, 15,25% en la construcción de carreteras, terraplenes y diques, 12,49% en rellenos de tierra, 8,84% en relleno de minas, 7,61% en ladrillos, bloques y azulejos, 2,47% en agricultura y 9,14% en otros sectores.[23].

Las cenizas se presentan en polvo, suave al tacto y de color gris claro, marrón o negra dependiendo de la proporción de hierro y carbón sin quemar; su finura sin moler es similar a la del cemento y oscila entre 0,2 y 200 μ m, con un diámetro medio que suele estar entre 15 y 45 μ m. La densidad aparente es aproximadamente de 0,89 g/cm³ y el peso específico de las partículas oscila entre 2 y 2,9; en general las partículas son esféricas o esferoidales, debido al enfriamiento rápido de las gotas de material fundido; es posible encontrar partículas huecas (cenosferas), pequeñas partículas que se depositan en cenizas huecas (plerosferas) y partículas de carbón inquemado [16] [17].

Se pueden distinguir dos tipos de cenizas volantes, dependiendo de la composición química del carbón de origen: las ricas en calcio, (cenizas volantes calcáreas o sulfo-cálcicas) y las ricas en silicio (cenizas volantes silíceas o silico-aluminosas). Los minerales que suelen encontrarse en las cenizas son (tabla 2.3.2): mullita (3Al₂O₃.2SiO₂), cuarzo (SiO₂), magnetita (Fe₃O₄), hematites (Fe₂O₃), wustita (FeO), goethita (FeOOH), pirita (FeS₂), calcita (CaCO₃), anhidrita (CaSO₄), periclusa (MgO) y óxido de calcio libre (CaO) [17]. La actividad puzolánica es más importante en las cenizas volantes silicoaluminosas, debido a su elevado carácter vítreo y a su alto contenido en óxidos de silicio y aluminio. Si se trabaja con cemento del tipo CEM I, la reactividad de la ceniza se observa a tiempos prolongados, generalmente entre los 28 y 90 días.

Al estudiar la fijación de portlandita para una pasta con un 20% de ceniza volante, se observa que a los 28 días la fijación es despreciable o negativa, esto es debido al “efecto partícula” de la CV, que activa la hidratación del cemento, incrementándose la cantidad de hidróxido cálcico liberado, mayor al valor obtenido para una pasta sólo de cemento [244]. Si bien no fija una cantidad importante de portlandita, no genera una disminución destacable de la resistencia a los 28 días con respecto a una pasta control, ya que el efecto partícula de la CV, además de acelerar la hidratación del cemento, distribuye mejor los productos que se generan [244].

El uso de las cenizas volantes provoca efectos variados sobre el hormigón, dependiendo de la forma y tamaño de las partículas, además del porcentaje de sustitución [17] [24]

[255]; estos efectos pueden representar mejoras sobre los procesos de mezclado, puesta en obra, prestaciones mecánicas y durabilidad:

- Reduce la cantidad de agua necesaria para obtener una docilidad equivalente a la de un hormigón sin cenizas.
- Produce un aumento de la plasticidad y una mayor cohesión.
- Permite una reducción de la cantidad de cemento.
- Genera un aumento en los tiempos iniciales y finales de fraguado.
- Disminuye el calor de hidratación de la masa de hormigón.
- Reduce la fisuración superficial.
- Disminuye la segregación de los áridos, disminuyendo la exudación.
- Disminuyen las resistencias iniciales, pero se igualan o superan a edades posteriores.
- Se aumenta la resistencia al ataque de sulfatos.
- Puede reducir la reacción con los áridos y disminuir la expansión nociva del hormigón.

Tabla 2.3.2. Composición química promedio de las cenizas volantes [17].

Compuesto	Cenizas con alto contenido en calcio (% en peso)	Cenizas con bajo contenido en calcio (% en peso)
SiO ₂	34,1	42,6-59,8
Al ₂ O ₃	14,2	21,8-34,5
Fe ₂ O ₃	7,2	6,3-18,1
CaO	38,0	2,8-7,0
SO ₃	4,2	0,19-1,9
MgO	1,5	1,2-2,6
K ₂ O	1,4	0,38-6,0
Na ₂ O	0,44	0,15-0,94
Sílice reactiva	30,9	0,94
Cal libre	17,1	Inapreciable-0,74
Carbono total	0,34	0,27-3,9

Se han desarrollado diferentes procedimientos para modificar las características de las CV con el fin de mejorar las propiedades de morteros y hormigón, es así como mediante la clasificación por aire y la extracción magnética se obtienen fracciones que mejoran la trabajabilidad de los morteros; sin embargo, el procedimiento que más beneficios genera es la molienda, incrementando la finura del material y favoreciendo el desarrollo de las resistencias mecánicas [25].

2.4 Antecedentes sobre morteros de GRC y adiciones activas

Los composites de cemento Pórtland reforzados con fibras de vidrio han sido desarrollados desde la década del 70, en sus inicios se utilizaba el vidrio E para la elaboración de los filamentos que conforman las fibras de refuerzo; gracias a desarrollos investigativos importantes, dentro de los cuales destacan el trabajo realizado por el grupo de A.J. Majumdar [2, 34], se avanzó en el conocimiento de los componentes de estos composites, permitiendo la identificación de problemas relacionados directamente con el desempeño mecánico de los elementos construidos con GRC. Los esfuerzos iniciales facilitaron la modificación tanto de componentes y dosificaciones como de las propiedades de los morteros reforzados con fibra de vidrio, especialmente se indujo el cambio de la fibra E por la fibra AR, y es así como se conformó el composite que se conoce por las siglas GRC.

En este apartado se realiza una breve descripción del trabajo realizado por diferentes autores sobre el GRC, especialmente a partir de finales de la década de los 80 hasta los inicios del siglo XXI, con la finalidad de conocer los desarrollos y planteamientos propuestos para el mejoramiento de estos composites, como punto de partida para la orientación y definición de la investigación desarrollada en el presente escrito. Se enuncian diversos aportes dirigidos hacia la mejora de las propiedades mecánicas y de durabilidad de estos composites.

“Direct incorporation of silica fume into glass fibre strands as a means for developing GFRC composites of improved durability” [26]

The international journal of cement and lightweight concrete, vol. 9, 1987, n° 3.

A. Bentur and S. Diamond.

Se plantea el tratamiento previo de la fibra de vidrio AR por inmersión en una lechada de microsílíce, como el método más efectivo para mejorar el comportamiento mecánico y la durabilidad de los compuestos con fibras de vidrio. Se estudia el comportamiento mecánico de probetas de pastas de cemento Pórtland con dos capas de fibras de vidrio AR continuas, con sustituciones del 10 y 16% de cemento por microsílíce, y tratamiento previo de la fibra impregnándola con una lechada de microsílíce durante 10 minutos.

Se ha demostrado que los compuestos con sustitución por microsílíce y con la fibra tratada, después de ser sometidos a procesos de envejecimiento acelerado sumergidos en agua a 50°C, presentan muy buenas propiedades mecánicas y de durabilidad; el compuesto control es ligeramente superado por el compuesto con sólo sustitución, y es ampliamente superado por los compuestos con inclusión de microsílíce.

Cuando se incorpora microsílíce a la matriz y además se trata previamente la fibra, la diferencia es pequeña al compararse con un compuesto con solo cemento y fibra tratada, pero el beneficio de la combinación de los dos procedimientos se aprecia ampliamente cuando los compuestos son envejecidos. Se plantea una hipótesis para explicar el beneficio del tratamiento previo de la fibra, “las partículas de microsílíce que recubren la fibra evitan que el hidróxido cálcico se deposite, limitando la capacidad de deformación de los filamentos y de extracción luego de la fractura”.

“Reaction of alkali-resistant glass fibres with cement. part 1. review, assessment and microscopy” [27]

Glass technology vol. 32, 1991, n° 3.

V.T. Yilmaz and F.P. Glasser.

La naturaleza del ataque a las fibras generalmente no es homogénea, en algunos puntos de la fibra, predomina la formación de capas con diferentes productos de la hidratación del cemento, la portlandita y la etringita que son cristalinos y el hidrogel de silicato cálcico que es amorfo; con el tiempo o con procesos de envejecimiento, se observa que esta capa desarrolla diferentes estructuras y en algunos casos se genera la hidroxilación y el lixiviado del vidrio. Otro tipo de ataque los largos cristales de portlandita que cortan la fibra en zonas no afectadas, generando un contacto directo del vidrio con la matriz, cada corte funciona como una fisura que progresivamente va reduciendo la longitud efectiva de la fibra, reduciendo las propiedades mecánicas del compuesto.

“Reaction of alkali-resistant glass fibres with cement. part 2. durability in cement matrices conditioned with silica fume” [28]

Glass technology vol. 32, 1991, n° 4.

V.T. Yilmaz and F.P. Glasser.

Se describen los mecanismos de daño que pueden afectar la álcali-resistencia de la fibra en las matrices de cemento Pórtland, uno o varios mecanismos pueden predominar sobre el resto o actuar en conjunto, o incluso al someter el compuesto a elevadas temperaturas, algunos se pueden desarrollar más rápido; todos estos mecanismos son motivo de discusión por parte de los investigadores:

- Disolución de la masa de la fibra, por ejemplo, el transporte de circonio de la fibra hacia el cemento adyacente genera hoyuelos poco profundos en la superficie de la fibra.

- Hidroxilación extensiva del vidrio acompañada por lixiviación de iones, esto ocurre en respuesta al alto grado de pH de la matriz, iones de óxido conectores del vidrio son atacados por el agua de la pasta transformándose en el ion hidroxilo causante de la hidroxilación.
- Formación de una capa o envoltorio compuesto de productos de la hidratación del cemento sobre la fibra, estos productos son modificados ya que son resultado de la interacción entre la fibra y el cemento. En conjunto con la capa formada por la hidroxilación, se forma una interfase física y química en forma de anillo que progresivamente genera una alteración química, que inicia la hidroxilación y lixiviación del vidrio del interior de la fibra. La fractura de los compuestos se propaga a lo largo de las fibras que han sufrido hidroxilación o que han modificado los productos de la hidratación del cemento.
- Distribución de la portlandita en diferentes direcciones sobre la superficie de la fibra, esto ocurre en la fase inicial de hidratación del cemento, y previene o inhibe la formación de una capa pasiva normal y lidera el corte de la fibra por parte de los cristales de portlandita.
- Fractura de la fibra, ésta se genera cuando los cristales de portlandita contactan la fibra, generando cortes o fisuras que dan la dirección de la fractura.
- Recristalización de la componente de circonio de la fibra, se produce a edades avanzadas, cerca de 180 días, el óxido de circonio se concentra en fases cristalinas formando una capa dura protectora alrededor de la fibra.
- El circonio no es un componente permanente de la capa pasiva, el óxido de circonio es transportado y se precipita sobre la fibra como silicato cálcico circonado, probablemente hidratado, debido a esto la capa pasiva necesita continuamente ser recargada de circonio y esta necesidad se suple sacrificando más vidrio de la fibra.
- Vacíos en la pasta de cemento adyacente a la fibra, actúan como sitios preferenciales para el ataque, además inducen fracturas de la pasta a la fibra.

“Chemical and microstructural changes at alkali-resistant glass fiber-cement interfaces” [29]

J.Am. Ceram. Soc., 74 (12), 1991, 3054-3060.

V.T. Yilmaz, E.E. Lachowski and F.P. Glasser.

Se observa en pastas de GRC la composición de los productos de corrosión de la fibra AR, curados durante 180 y 360 días a 55°C; el análisis muestra la riqueza en circonio y calcio, también la presencia de silicio y una cantidad pequeña de sodio. El silicio y el sodio se disuelven y dejan un residuo rico en circonio, además, el calcio se incrementa por la migración que se da desde la pasta hasta la zona del vidrio.

El comportamiento a flexión de los especímenes curados a 20°C, se manifiesta con una pequeña mejora de resistencia en los primeros días, que se incrementa a valores máximos entre los 30 y 60 días de curado, después disminuye y se sostiene alrededor de los 12 MPa hasta después de un año. A 55°C, el curado del cemento y el deterioro de la fibra es mucho más rápido, de esta manera los valores máximos de resistencia se obtienen a edades cortas de 3 a 7 días, después decrecen rápidamente a valores de 10 MPa para el primer año. Cuando se inicia la reacción del cemento, la estructura original de fibras distribuidas homogéneamente sobre los poros de la pasta de cemento desaparece y da paso a varios procesos que suceden simultáneamente y afectan a la naturaleza del material. Los cristales de portlandita chocan con las fibras, acelerando la corrosión y generando muescas locales que causan el corte completo de la fibra; además, se inicia un ataque en masa de la fibra, se presenta la hidroxilación y disolución, dejando huecos rodeados de productos de la reacción entre el cemento y el vidrio.

La capa formada por los productos de reacción del cemento y el vidrio es la responsable del endurecimiento de la interfase fibra-matriz y de la mejora de la resistencia a flexión de la pasta. Esta capa se presenta en dos formas, primero sobre la fibra original rígida a manera de espaguete como una estructura estable, obtenida después de un año a 55°C; la segunda como un hueco corto de pared rígida a manera de tubos de macarrones. Se sugiere que este desarrollo microestructural es una característica natural que evoluciona, que puede ser práctica para disminuir y no para prevenir la reacción que se presenta entre el cemento Pórtland y la fibra; y es en esta línea en la que se debe trabajar para mejorar las propiedades mecánicas de los morteros de GRC.

“Chemical attack on alkali-resistant glass fibres in a hydrating cement matrix: characterization of corrosion products” [30]

Journal of non-crystalline solids 151, 1992, 236-244.

V.T. Yilmaz.

Las fibras AR son atacadas por el ion hidroxilo presente en las soluciones de cemento hidratado depositadas en los poros, este ataque lidera la hidroxilación de las superficies de la fibra de vidrio. Al iniciar el proceso de corrosión, se genera una capa en la superficie de la fibra, formada por productos de corrosión ricos en calcio, y simultáneamente por una capa pasiva rica en circonio, el cual puede escapar de esta capa y recrystalizarse; esto genera la lixiviación del silicio y el sodio de la superficie de la fibra, permitiendo el ataque químico al vidrio.

Se observa un incremento de los contenidos de circonio y calcio en la capa que recubre la fibra, al mismo tiempo que se observa la disolución del silicio, el cual se encuentra en

cantidades mayores en la pasta de cemento alejado de la fibra y acompañada del sodio. La velocidad de hidroxilación puede ser estimada como $2\mu\text{m}$ por año a una temperatura de curado de 55°C , es decir, una fibra de $10\mu\text{m}$ de diámetro será corroída completamente a esta temperatura en dos o tres años. Esta velocidad de corrosión es lenta para temperaturas de curado normales (20°C), pero puede afectar la vida de servicio y la durabilidad de morteros de GRC.

“Techniques for determining some microstructural parameters in glass reinforced cement” [31]

Magazine of concrete research, vol. 48, 229-236, 1996.

M. Kakemi, D.J. Hannasnt, M. Mulheron.

Se han desarrollado técnicas de análisis microestructural del comportamiento del refuerzo de morteros con fibras de vidrio, analizando el conjunto conformado por la fibra de vidrio y la interfase matriz-fibra; para entender el mecanismo de refuerzo se determina claramente la evolución de la fractura de este conjunto.

Primero se presenta la transmisión de tensiones a través de la interfase a los filamentos ubicados en el perímetro de la fibra, los cuales están en contacto directo de la fibra con la matriz. El trabajo de estos filamentos representa un aporte muy importante a la resistencia de los compuestos, cuando los filamentos externos fallan progresivamente, se genera la fractura del conjunto y se transfiere la carga a los filamentos menos esforzados, ubicados en el centro de la fibra. Estos, aunque realizan un pequeño aporte a la resistencia, tienen como función principal la de deslizarse y generar la extracción de la fibra o pull out. La técnica está compuesta por varios procesos:

- Evaluación de la distribución de las fibras en la matriz, mediante el análisis de imágenes SEM (figura 2.3.1), determinando el perímetro efectivo de la fibra y cuantificando la superficie de contacto de la fibra con la matriz, es decir la interfase, diferenciando el área correspondiente tanto a fibra como a matriz cementante; evaluación del proceso de fractura del conjunto fibra-interfase.
- Ensayo bajo tensión uniaxial de especímenes especiales, descargando en tres etapas específicas del proceso de fractura, después cada espécimen es sumergido en ácido clorhídrico durante 7 días para disolver la matriz y evaluar por microscopía óptica la evolución de la fractura de los filamentos de la fibra para cada fase.
- Análisis de la transmisión de luz a través de los filamentos de la fibra, de una sección delgada del compuesto para diferentes fases del proceso de fractura,

determinando cualitativamente la rotura de los filamentos por la pérdida de transmisión de luz observada en la sección de cada fibra analizada.

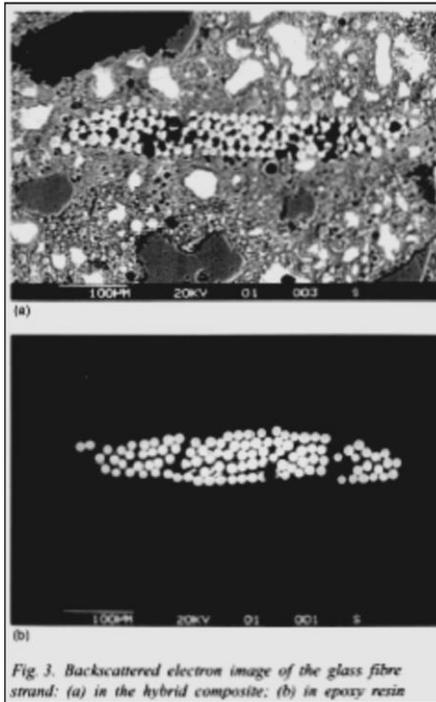


Fig. 3. Backscattered electron image of the glass fibre strand: (a) in the hybrid composite; (b) in epoxy resin

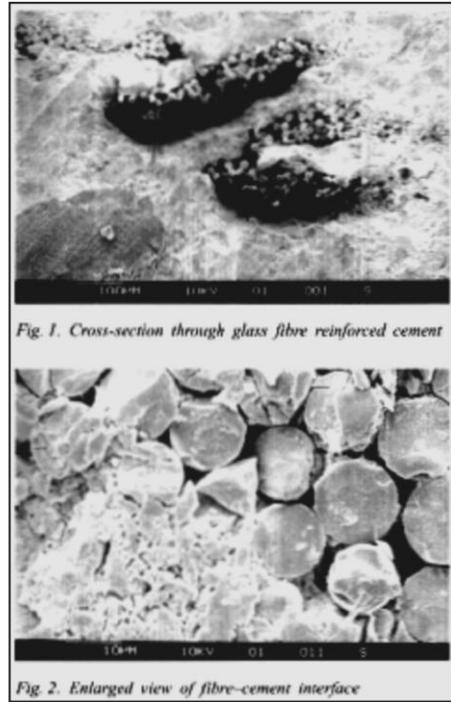


Fig. 1. Cross-section through glass fibre reinforced cement

Fig. 2. Enlarged view of fibre-cement interface

Figura 2.3.1. Microfotografía muestra embutidas en resina [31].

“Durability of glass fiber reinforced cement composites: effect of silica fume and metakaolin” [32]

Advanced cement based materials, vol. 5, 100-108, 1997.

Shashidhara Marikunte, Corina Aldea and Surendra P. Shah.

Se trabajan morteros de GRC, con fibras AR y adiciones de un 25% de humo de sílice y metacaolín, materiales que demandan una mayor cantidad de agua que el mortero control; además, se adiciona un 5% de polímero acrílico en peso del compuesto.

El comportamiento a flexión y tensión de los morteros de GRC depende de los componentes de la matriz, principalmente de la cantidad de polímero y agua presente en ella. El humo de sílice no presenta una mejora en el comportamiento mecánico respecto al mortero control con fibra, además, al ser sometido a envejecimiento, sus prestaciones mecánicas se reducen y son similares a las del control. Por el contrario, con la adición de un 25% de metacaolín, se obtiene una mejora representativa del comportamiento a flexión

y en la tenacidad de los morteros, el comportamiento a tensión no presenta mejoras ni disminuciones incluso después de ser sometidos a envejecimiento.

“Effect of high content of fly ash on the properties of glass fiber reinforced cementitious composites” [33]

Cement and concrete research, vol. 27, n° 12, 1997, 1885-1891.

Y. Zhang, W. Sun, L. Shang and G. Pan.

Se trabajan especímenes de GRC de 4x4x16 cm, con relación agua/ material cementante de 0.3 y relación material cementante/árido de 0.5; contenido de fibra AR del 2% y adición de superplastificante para obtener trabajabilidades similares. Además, se mezcla el agua con el superplastificante, y se agrega a la mezcla seca de cemento CV y arena previamente homogeneizada.

Los morteros con sustitución de cemento por CV del 40 al 60%, tienen resistencias a flexión menores que el control de 7 a 28 días, pero posteriormente, a los 60 días, se incrementan, aunque no a la magnitud del control. Al ser sometidos a procesos de envejecimiento sumergidos en agua a 80°C durante 11 días, el control disminuye su resistencia a flexión hasta los 7 MPa, por el contrario, los morteros con sustitución mejoran sus valores de flexión entre 10 y 15 MPa; a mayor porcentaje de sustitución y mayor grado de finura de la CV, mayor es la resistencia. El contenido de hidróxido cálcico disminuye con la edad, a mayor porcentaje de sustitución y mayor grado de finura de la CV, menor es el contenido de hidróxido cálcico. Además, se observa que la fibra no es atacada en presencia de la CV, incluso cuando se somete a procesos de envejecimiento.

“Accelerated ageing characteristics of glass-fibre reinforced cement made with new cementitious matrices” [34]

Composites: part A 30 (1999) 1073–1080

P. Purnell, N.R. Shorta, C.L. Page, A.J. Majumdar, P.L. Walton

Se propone este estudio por la preocupación constante sobre la durabilidad del GRC a largo plazo, especialmente en ambientes húmedos. Se ha demostrado que ambientes relativamente secos la resistencia inicial del material no cambia significativamente con el tiempo, sin embargo, en un medio de humedad alta y ambientes agresivos las propiedades del compuesto se ven afectadas. La reducción de las propiedades del GRC se atribuye normalmente a la corrosión química de las fibras por iones de hidróxido derivados de la matriz de cemento hidratante, se suma también la precipitación de hidróxido de calcio en

los filamentos de la fibra de vidrio producto de la densificación de la matriz en la interface con la fibra.

Se han elaborado diferentes compuestos de GRC para ser comparados con el GRC control compuesto por una matriz de cemento portland convencional (OPC), la primera matriz se conforma con la adición de un 20% de metacaolín, la segunda matriz utiliza una formulación comercial de cemento de retracción compensada (OPC más clinker de sulfoaluminato de calcio y anhidrita) y una adición del 10% metacaolín; los compuestos fueron envejecidos entre 7 días y 360 días mediante inmersión en agua a 20, 38 y 65°C. Se pretende con la modificación de la matriz, reducir la concentración de iones hidroxilo en la fase porosa de la matriz cementante para producir un ambiente menos agresivo para las fibras.

La concentración de iones en la fase porosa de la matriz se determinó sometiendo muestras de pasta de cemento cilíndricas de 45 mm de diámetro y 75 mm de altura, a presiones de hasta 380 MPa para la extracción del líquido presente en los poros del compuesto; luego se realizó el análisis de iones para determinar el tipo de ion presente determinando que el hidroxilo fue el de mayor interés. Para los compuestos sin envejecer, la mayor concentración de iones hidroxilo la presenta el compuesto control, este comportamiento se conserva luego de los 6 meses iniciales de envejecimiento a 20°C; después con el envejecimiento a 38 y 65°C los tres compuestos presentan concentraciones similares; esto se debe a la lixiviación desde la matriz y a la aceleración de la reacción puzolánica.

Los estudios mostraron que con el envejecimiento a 65°C se aceleran las reacciones de hidratación, además, se generan diferentes hidratos en las nuevas matrices. Luego de 6 meses de curado se observa la mayor presencia del gel de silicatos cálcicos hidratados y etringita ($C_6A\hat{S}_3H_{32}$), se observa que las matrices son mineralógicamente similares a excepción de la matriz con 20% de metacaolín, la cual muestra la presencia de gehlenita hidratada por la reacción del metacaolín con el hidróxido cálcico. Después del envejecimiento un porcentaje importante de la etringita es reemplazada por hydrogarnet ($C_3A\hat{S}H_4$), normalmente formada a temperaturas menores a 50°C; sólo en la matriz con sustitución por metacaolín se observan cantidades importantes de monosulfato (C_4ASH_{14}) generalmente formado a elevadas temperaturas.

El comportamiento mecánico de los compuestos fue evaluado luego de un año de curado a 20°C y se no se observó deterioro significativo. Después del envejecimiento se produjo deterioro notable de todos los compuestos, aunque los compuestos modificados conservan en parte su resistencia luego de un año de envejecimiento. Se plantea que el proceso de envejecimiento con agua a elevadas temperaturas no sólo acelera la reacción

de hidratación, sino que puede modificar la naturaleza intrínseca tanto de la matriz cementante convencional como de las matrices modificadas, se puede asumir que para temperaturas entorno a los 38°C no se generan cambios apreciables como sí se presentan a temperaturas elevadas cercanas a los 65°C. Finalmente no se recomienda aplicar modelos de predicción como el propuesto por Litherland [43], en el cual se sugiere que 40 días a 60°C equivalen a 30 años de exposición natural; sin embargo se afirma que sí se puede utilizar como una técnica que permita determinar el envejecimiento de la matriz.

“Microstructural observations in new matrix glass fibre reinforced cement” [2]

Cement and concrete research, 30, 2000, 1747-1753.

P. Purnell, N.R. Short, C.L. Page, A.J. Majumdar.

Se implementa la técnica de petrografía de sección delgada, con el fin de analizar las secciones de las fibras, aplicando luz polarizada para determinar la naturaleza de los depósitos presentes en la interfase y entre los filamentos de la fibra. Esta técnica es un complemento adecuado a la técnica de microscopía electrónica de barrido.

No se observó corrosión general en los morteros de GRC estudiados, se observan formaciones alrededor de las fibras y entre sus filamentos cuando éstos son sometidos a procesos de envejecimiento, pero sin degradación de la superficie de la fibra. Con la sustitución de metacaolín o de clinker rico en sulfoaluminato cálcico, se observan formaciones, pero de un material diferente a la portlandita, incluso después de los procesos de envejecimiento, sin presentar detrimento de la fibra y de las propiedades mecánicas del GRC. La pérdida de resistencia aparece debido al incremento de las fisuras formadas al interior de los filamentos durante el proceso de elaboración del GRC.

“A static fatigue model for the durability of glass fibre reinforced cement” [6]

Journal of materials science, vol. 36, 2001, 5385-5390.

P. Purnell, N.R. Short, C.L. Page.

Es inevitable que en las fibras se generen fisuras durante su manipulación en los procesos de ensimaje, empaque y preparación del GRC; el incremento en número y magnitud de estas fisuras provocan su rotura. La portlandita se deposita entre las fibras, entre sus filamentos (200 aproximadamente por fibra) y específicamente en estas fisuras, ejerciendo presión y generando corrosión en las zonas afectadas y posteriores roturas.

Las fibras AR teóricamente son álcali-resistentes, pero no son completamente inertes. A través de la solución acuosa formada por el cemento, se inicia la disolución de los iones

de sodio, luego la del ion hidroxilo que ataca la red de silicio del vidrio generando la posterior disolución de los iones de silicio, provocando el deterioro de la fibra. Se plantea un modelo de predicción, que puede ser aplicado para determinar la vida de servicio de los componentes del GRC, y que toma como referencia los valores del módulo de rotura (MOR), el esfuerzo a primera fisura (LOP) y el tiempo de curado. La vida de servicio se puede determinar cómo el estado de degradación de la fibra después del módulo de rotura, hasta un valor comparable al esfuerzo de la primera fisura.

“Effects of alkali-resistant glass fiber reinforcement on crack and temperature resistance of lightweight concrete” [35]

Cement and concrete composites, 24, 2002, 223-227.

F.A. Mirza, P. Soroushian.

Se estudian morteros ligeros en probetas de 4x4x16 cm, con diferentes contenidos de fibra de vidrio AR, al comparar con el control se obtiene una mejora de la ductilidad y la resistencia a flexión. El incremento de la resistencia a flexión de morteros ligeros es rápido, cuando se trabajan porcentajes de fibra de hasta el 1.5%, a partir de este punto se normaliza el incremento de resistencia y es entre 2,5 y 3% donde se presentan los mejores valores (entre 3,5 y 4 MPa a 14 días de curado).

Las probetas se someten a cambios drásticos de temperatura, 1 hora a 400°C a los 7 días de curado con un programa de calentamiento de 40°C/min.; al ser ensayadas a los 14 días presentan altos niveles de resistencia residual a flexión al compararlos con el control. La caída de la resistencia a flexión después de la exposición a elevadas temperaturas es debida a los procesos de fisuración y micro fisuración que se generan en la matriz, por la presencia de una presión interna a temperaturas altas y por la restricción interna a los efectos de retracción térmica por el enfriado; la efectividad de las fibras en el control de la fisuración explica su contribución a la resistencia del hormigón a la temperatura. Una aplicación directa son las tuberías de hormigón o morteros, en las cuales se observa que para el control se presentan fisuras anchas por la retracción y para el mortero con fibra se presentan mayor número de fisuras más pequeñas y en diferentes direcciones.

“Improving bond between fiber mesh and cementitious matrix” [36]

Cement and concrete research, 32, 2002, 783-787.

B. Mu, C. Meyer, S. Shimanuvich.

Se trabajan procesos de envejecimiento mediante curado a vapor con baja presión durante 25 días, equivalentes a un año a 20°C o a un día sumergido a 80°C. Se plantean

especímenes de 25.5x25.5x152.4mm, se utilizan mallas de fibra de polipropileno y de fibra de vidrio AR con un módulo de elasticidad de 3,5 GPa y 70 GPa y una resistencia a la tensión de 620 MPa y 1800 MPa, respectivamente. Se colocan una y dos capas de cada tipo de material. Al igual que los morteros con fibras independientes, al someterlos al proceso de envejecimiento, la interfase entre la fibra y la matriz se ve afectada, reduciendo la ductilidad y tenacidad del espécimen.

El mortero con malla de fibra de vidrio AR es el que presenta mejor comportamiento, en el caso de las mallas de polipropileno, se puede mejorar su comportamiento, mejorando la interfaz entre la fibra y la matriz con diferentes tratamientos; además, se debe tener en cuenta que la relación coste/tenacidad de la malla con fibra AR es 6,4 veces mayor que la de polipropileno.

“Permeability of cracked hybrid fiber- reinforced mortar under load” [37]

ACI materials journal, vol. 99, n° 4, 2002, 379-385.

J.S. Lawler, D. Zampini, S.P. Shah.

El motivo más común para la inclusión de las fibras en morteros y hormigones es el incremento de la ductilidad bajo cargas de flexión y tensión. Tan pronto como la carga es aplicada, pequeñas y discontinuas microfisuras se desarrollan a través del material, las microfibras son las encargadas de retardar la unión de las microfisuras para formar fisuras más grandes. La primera macrofisura coincide con el pico de carga y con la visualización de la fisura; posterior a esto, el esfuerzo se concentra en la apertura de la fisura y es en este momento donde las macrofibras funcionan como puentes localizados. La carga posterior al pico se prolonga incrementando la tenacidad, hasta que la fibra falla por “pull out” (sale de la matriz) o se rompe (figura 2.3.2).

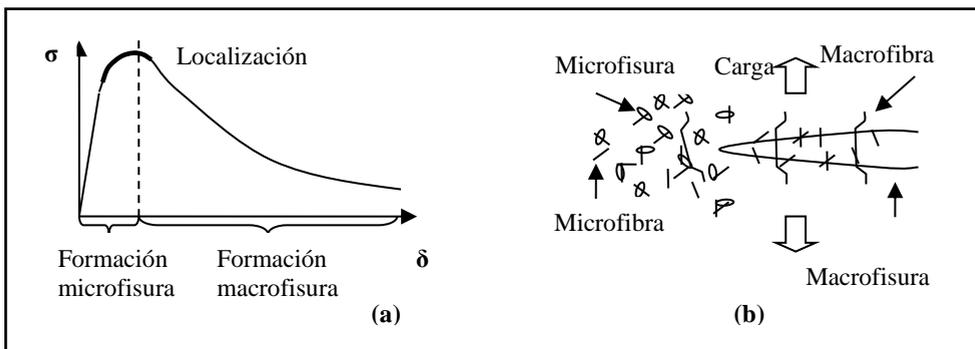


Figura 2.3.2. Relación entre: (a) respuesta mecánica y desarrollo de la fisura. (b) escala relativa de la fisura con interacción de la fibra [37]

“Optimisation and glass fibre reinforcement of mortars with very fine fillers” [38]

“Composites materials in concrete construction. Proceedings of the international seminar held at the University of Dundee”. Dundee, Escocia, 2002, pp. 324-331.

A.H.H.Waesslich, H. Moertel and V. Rudert.

Se realizaron procesos de envejecimiento, sumergiendo especímenes en agua a una temperatura de 60°C durante al menos 28 días. Para una temperatura media anual de 8°C en Alemania, 28 días de envejecimiento equivalen a más de 30 años de exposición para el clima de Alemania.

Se comparó el comportamiento de las fibras de vidrio E y AR, en morteros de cemento Pórtland y con materiales muy finos como sustitución, y en todos los casos la fibra AR presenta un mejor comportamiento. Además, después de ser sometidos a procesos de envejecimiento, el que contiene fibra AR continúa siendo el de mejor comportamiento; estos resultados se ven mejorados con la adición en altos porcentajes de la combinación de metacaolín y humo de sílice.

“Enhancement of aging resistance of glass fiber reinforced cement” [39]

Materials and structures, vol. 36, 2003, 323-329.

X. Qian, B. Shen, B. Mu and Z. Li.

Se propone la adición de polvo de PVA (polivinil alcohol) para mejorar las condiciones de durabilidad de los compuestos de GRC. La energía superficial de las fibras de vidrio atrae moléculas solubles de polímero, activando la acumulación del polímero en la superficie de la fibra; de esta manera se forma una película delgada sobre la fibra que previene la formación y acumulación de productos de hidratación, especialmente el hidróxido cálcico. Debido a la ductilidad de esta película, los esfuerzos generados en la interfase entre la fibra y la matriz son menores, ayudando esto a incrementar los esfuerzos de tensión y la ductilidad de los compuestos.

“Silica fume treatment for improving durability of alkali resistant glass fibres in cement matrixes” [40]

Solid state phenomena, vols.90-91, 2003, 209-214.

A. Ayadi, M. Palou and A. Iratni.

Se trabajan morteros de GRC con diferentes porcentajes de sustitución por humo de sílice; se realizan ensayos de tensión, observándose una mejora representativa de la resistencia a tensión con el porcentaje de sustitución. Al someter los morteros a envejecimiento acelerado sumergiéndolos en agua a 80°C, se disminuye de manera importante la

resistencia a tensión para los primeros días de curado, aunque se sostiene por encima del control; los autores sugieren que si se continúa con el envejecimiento las resistencias disminuirán lentamente hasta un valor constante.

Se obtienen los valores de pH de pastas de cemento hidratados con y sin humo de sílice (Tabla 2.3.3), sumergidas en agua a 80°C durante 21 días, la alcalinidad de la pasta disminuye respecto al control, pero el medio sigue siendo alcalino y agresivo para la fibra. Para los morteros sometidos a 21 días de envejecimiento y con sustitución por humo de sílice, se observa que las fibras permanecen inalteradas y sobre su superficie se observan partículas pequeñas y largas de productos de hidratación; se mejora la resistencia a tensión, además, se reduce el daño por corte de las fibras debido a los cristales de hidróxido cálcico, pero no se mantiene una alta resistencia a flexión.

Tabla 2.3.3. pH pastas de cemento sometidas 21 días a proceso de envejecimiento a 80°C.

Matriz	100% cemento Pórtland	15% humo de sílice	25% humo de sílice	40% humo de sílice
pH	12,62	12,22	11,45	10,80

“Prediction of lifetime of alkali-resistant glass fibres in cementitious concretes” [41]

6th RILEM Symposium on fibre-reinforced concrete, BEFID 2004, Varenna, Italia, pp. 615-624.

H. Schorm, M. Schiekol

La investigación realizada sugiere tres grupos para clasificar los procesos que pueden generar cambios en la fibra AR: la reducción del material de la fibra generada por procesos químicos termodinámicos, normalmente procesos de corrosión que afectan tanto al ensimaje como al cuerpo de la fibra; mecanismos de incremento de masa causado por procesos químicos, los cuales no generan corrosión pero sí disminuyen o alteran la unión entre la fibra y la matriz; finalmente el mecanismo característico fisura-puente generado por los hilos de vidrio AR, el cual es independiente de los procesos de cambio de la fibra pero que se puede ver afectado por ellos.

De estos mecanismos el ataque químico sobre la superficie de los filamentos es el primero en afectar la fibra alterando los polímeros del ensimaje, después de descompuesto el ensimaje se da la corrosión del cuerpo de la fibra. El ataque alcalino lidera la extracción del dióxido de silicio y una hidratación del dióxido de zirconio, el cual puede formar una capa protectora para ataques posteriores al combinarse con los iones alcalinos y alcalinotérreos. Una fibra AR bajo condiciones extremas (80°C, pH=13) durante 240 días, el espesor del ensimaje se reduce a un 10% de su valor inicial; sin embargo, al exponer la

fibra a condiciones más reales (25°C, pH<13), el ensimaje no se elimina antes de los 4,5 años. Con la inclusión de materiales puzolánicos se puede disminuir el pH observando pequeñas pérdidas en el espesor del ensimaje con el tiempo.

La distribución de los filamentos en la fibra no es homogénea y se pueden producir grandes cavidades entre ellos, las cuales son ocupadas por los productos hidratados que generan enlaces entre filamentos y entre filamentos y matriz, alterando la superficie y las longitudes de alargamiento. Cuando se presenta una fisura, ésta se une por la fibra y las tensiones son absorbidas inicialmente por los filamentos externos, la longitud efectiva de alargamiento de los filamentos se incrementa desde la superficie al centro de la fibra. Los filamentos con poca longitud de alargamiento se rompen primero sin importar su ubicación en la fibra y las tensiones son distribuidas por los filamentos sin romper, incrementando el esfuerzo en éstos. Se puede dar que los filamentos restantes soporten las tensiones, o en caso contrario que los filamentos con mayor longitud efectiva continúen el proceso.

“Analysis of glass fiber reinforced cement (GRC) fracture surfaces” [42]

Construction and building materials 24 (2010), 1302-1308

Alejandro Enfedaque, David Cendón, Francisco Gálvez, Vicente Sánchez-Gálvez

Se evalúa el proceso de fractura de compuestos de GRC proyectado, jóvenes y envejecidos en agua a 50°C, adicionados con materiales puzolánicos (10 y 20% de humo de sílice, 10% de metacaolín, 10% de resina acrílica) mediante el análisis de la curva tensión vs. deformación y el estudio de la microestructura de la zona de fractura mediante SEM.

Al evaluar el comportamiento mecánico se aprecia que los compuestos con adición puzolánica superan al compuesto control sin adición después del tiempo de envejecimiento. Después del análisis de la curva tensión vs. deformación, se determinó con claridad la evolución del compuesto antes de la fractura (figura 2.3.3), a continuación, se muestran los conceptos más importantes:

- Los compuestos jóvenes presentan un comportamiento elástico hasta el límite de proporcionalidad (LOP).
- Luego se presenta un decrecimiento de la tensión mostrando un material menos rígido, en la curva se observan pequeñas subidas y bajadas múltiples por las micro fisuras presentes contrarrestadas por la acción de las fibras.
- El proceso sigue hasta que el grado de tensión es tan alto que produce una fisura importante, se identifica en la gráfica por un cambio súbito de pendiente que

representa una disminución notable en la tensión, este punto se denomina punto de quiebre (bend over point- BOP).

- La curva continua su evolución, pero con una pendiente menor incrementando el grado de elongación relacionado directamente con la apertura de la fisura, en este punto la tensión es soportada por el efecto puente que generan las fibras. Esta zona es más larga para el GRC joven, demostrando el esfuerzo de pull out o extracción de la fibra realizado antes de la fractura.

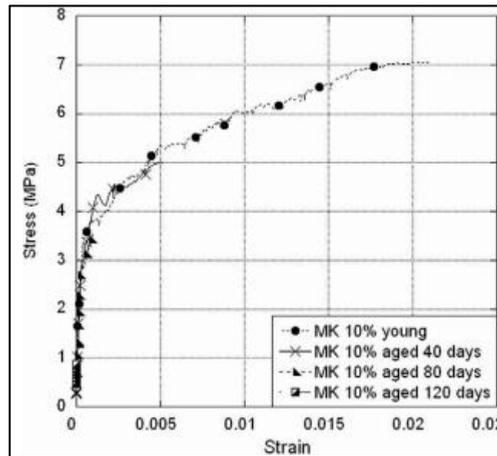
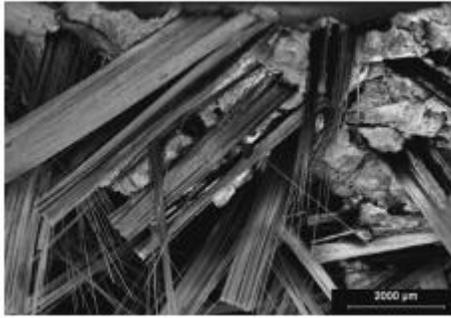
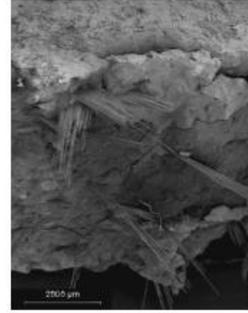


Figura 2.3.3. Curva tensión deformación compuesto con 10% de metacaolín (MK10%) [42].

Mediante el análisis de imágenes se evalúa el estado de las fibras en la zona de fractura antes y después del envejecimiento (figura 2.3.4). En las muestras del GRC joven, se observan gran cantidad de fibras extraídas de la matriz (pulled out) y un número menor de fibras rotas, en este caso la tensión del compuesto es altamente influenciada por el esfuerzo de pull out. La superficie de fallo es dentada, factor que apoya el concepto de que las micro fisuras crecen hasta que encuentran una zona donde las fibras están más próximas, zona con la capacidad de soportar esfuerzos mayores; cuando el esfuerzo llega a su punto máximo se genera la fractura por la zona de mayor debilidad (figura 2.11a). Para las muestras de GRC envejecido el comportamiento es totalmente diferente, la fractura dentada desaparece, la mayoría de las fibras se rompen por la tensión generada desapareciendo de la zona de fractura (no se observa el fenómeno). Este comportamiento se observa para edades superiores a 40 días de envejecimiento tanto para el control como para los compuestos con adiciones, excepto para la adición de 10% de metacaolín que conserva un número de filamentos extraídos (pulled out) (figura 2.3.4b).



(a)



(b)

Figura 2.3.4. Compuestos con 20% de metacaolín, (a) GRC joven, (b) GRC envejecido [42].

“Modelling of ageing effects on crack-bridging behaviour of AR-glass multifilament yarns embedded in cement-based matrix” [43]

Cement and concrete research 41 (2011) 403–411

M. Butler, S. Hempel, V. Mechtcherine

Se propone un modelo que estudia el comportamiento de compuestos muy finos (con tamaño máximo de partículas de 1mm) con fibras de vidrio AR y el efecto sobre su comportamiento como puente entre fisuras, al ser sometidos a un proceso de envejecimiento en cámara húmeda a 40°C durante 28, 56, 90, 180 y 360 días; se presentan dos tipos de matriz orientadas a la reducción de la alcalinidad de la matriz y del contenido en hidróxido cálcico, la primera un compuesto con un cemento rico en escorias de alto horno y adición de ceniza volante y microsíllice; la segunda se diferencia por la ausencia de escorias en el cemento. Se identifica una reducción del pH de ambas matrices; en la matriz uno se observa una reducción de la alcalinidad de la matriz pasando de 12,4 a 11,8 en la escala de pH después de 360 días de envejecimiento; en la segunda matriz, se aprecia una disminución menor debido a la ausencia de escorias en el cemento.

Se realizó la evaluación de diferentes parámetros a partir de las curvas de ancho de fisura vs. carga aplicada en pruebas de extracción de hilo o pull out, acompañado por un análisis microestructural mediante imágenes SEM. Según el modelo, cada filamento posee una longitud de deformación específica dependiendo de su posición en la sección transversal del hilo; esta longitud de deformación depende de la unión característica entre el filamento simple y matriz cementante, que varían con la edad. Las degradaciones en el rendimiento mecánico de la fibra y de sus filamentos, se pueden rastrear principalmente con los cambios en la microestructura en la interfaz entre matriz cementante y filamentos y entre los filamentos mismos, respectivamente. El proceso de extracción de la fibra se puede analizar mediante las curvas de extracción, que se dividen en tres zonas fundamentalmente: zona 1, no se observan cambios macroscópicos en el compuesto; zona

2, se genera un retroceso brusco en la tensión debido al no encontrar oposición; zona 3, se genera la oposición a la tensión aplicada iniciando el proceso de extracción (figura 2.3.5).

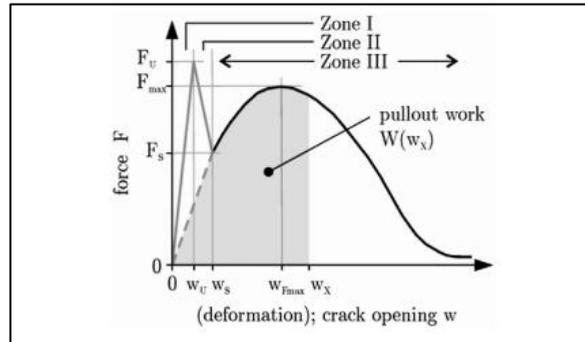


Figura 2.3.5. Representación gráfica de la curva típica para el proceso de extracción de la fibra [43].

En la figura 2.3.6 se presenta la magnitud apertura de la fisura debido a la carga de extracción aplicada. El comportamiento mecánico de la matriz 1 se aprecia en la figura 2.13a, el valor máximo de fuerza de extracción disminuye aproximadamente un 25% y el trabajo de extracción de la fibra (pull out work) disminuye en un 40%, si se comparan las muestras envejecidas con de referencia. En la figura 2.13b se observa la matriz 2, de forma similar al compuesto anterior el comportamiento mecánico disminuye con el envejecimiento, la fuerza máxima de extracción es un 10% más alta que la obtenida para la matriz 1, el trabajo de extracción de la fibra es similar para ambas matrices de referencia, con el envejecimiento esta propiedad disminuye para la matriz 2.

La densificación de la interfaz entre fibra y matriz reduce la capacidad de deformación de los filamentos lo que provoca una falla precipitada. La causa de la pérdida de resistencia de los filamentos puede ser atribuida a las muescas mecánicas generadas por la incrustación de minerales sobre la superficie del filamento, así como a la muesca química generada por la reacción de la superficie del vidrio con la matriz generando defectos superficiales.

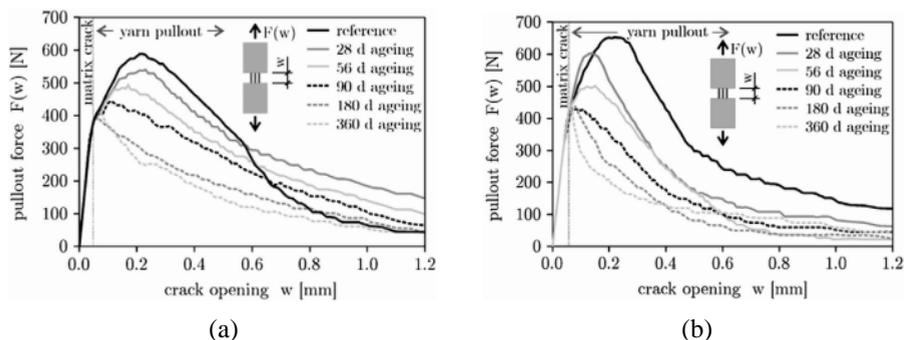


Figura 2.3.6. Representación fuerza de extracción (N) vs. Apertura de fisura (mm) para las matrices 1 (a) y 2 (b). Curado a 20°C y 65% de humedad relativa (referencia), envejecimiento a 40°C y 99% de humedad relativa (diferentes edades) [43].

“Ultrasonic characterization of GRC with high percentage of fly ash substitution” [44]

Ultrasonics 60 (2015) 88–95

V. Genovés, J. Gosálbez, R. Miralles, M. Bonilla, J. Payá

En este estudio se presentan compuestos de GRC con relaciones agua/material cementante (A/MC) de 0,30 y 0,35, con sustitución parcial del 60% del cemento por ceniza volante; se evalúa la resistencia mecánica de los compuestos y de forma comparativa se implementan pruebas no destructivas de caracterización mediante la aplicación de ultrasonidos; de forma complementaria se evalúan la microestructura, porosidad y la evolución de la actividad puzolánica.

El comportamiento mecánico para las diferentes dosificaciones demostró que tanto la resistencia a la compresión como el módulo de elasticidad son mayores para la matriz con relación A/MC de 0,30, compuestos con mayor densidad, rigidez y con una fractura frágil; los compuestos con relación A/MC de 0,35 presentan una matriz más dúctil con resistencias a la flexión y tenacidad mayores. La evaluación de la actividad puzolánica demuestra que las matrices con sustitución por CV presentan un contenido menor de hidróxido cálcico, lo que brinda mayor estabilidad química para las fibras de los compuestos. Los resultados de las pruebas de ultrasonidos demuestran que a menor relación A/MC se obtiene una porosidad menor, condición que favorece la velocidad de propagación de las ondas y se relaciona de forma directa con la resistencia a la compresión y con el módulo de elasticidad; matrices con mayor porosidad tienen una capacidad mayor para atenuar las ondas de ultrasonidos.

“Microstructure of interface between fibre and matrix in 10-year aged GRC modified by calcium sulfoaluminate cement” [45]

Cement and concrete research 76 (2015) 20–26

Meimei Song, Phil Purnell, Ian Richardson

En este trabajo se utilizaron composites de GRC proyectado compuestos por dos matrices, la primera de cemento portland convencional, la segunda por un cemento enriquecido por un aditivo rico en sulfoaluminatos cálcicos (Nashrin); ambas reforzadas con fibras AR dispersas con una fracción de volumen del 5%, con una relación arena/material cementante de 1:1 en masa para reducir la contracción por secado y una relación arena/material cementante de 0,31 para la matriz enriquecida con sulfoaluminato y 0,32 para la matriz convencional. Se evaluó la evolución de los hidratos de la matriz (TG-DTA), su composición mineralógica (DRX) y el comportamiento mecánico de compuestos durante 10 años a 25°C; complementado con un microanálisis de imágenes de petrografía de sección de las fibras en la matriz y SEM con la intención de evaluar el espacio entre los filamentos y la química de las fases ubicadas entre las fibras.

Los resultados de DRX confirman que el compuesto adicionado está libre de hidróxido cálcico (CH) en cambio registra grandes cantidades de etringita, lo que confirma lo observado en las pruebas de DTA que sugieren una preponderancia de la etringita sobre el gel de silicatos cálcicos hidratados (SCH); además, se revelan restos significativos de belita no hidratada incluso después de 10 años de envejecimiento, factor que se puede atribuir al rápido consumo de agua durante la hidratación del sulfoaluminato de calcio dentro del primeros días dejando sin agua suficiente para la hidratación de la belita a edades posteriores.

Después de 10 años de envejecimiento a 25 ° C, se observó una degradación severa en los compuestos convencionales, exhibiendo fibra rotas de forma abrupta, acompañado de una severa densificación dentro y alrededor de las fibras. Las fases hidratadas identificadas entre los filamentos son mezclas de CH según el microanálisis. En los compuestos a base de sulfoaluminato de calcio, la matriz comenzó a ocupar los espacios entre los filamentos a una edad temprana pero no se desarrollaron grandes rellenos ni densificaciones, se observa la ocupación de la superficie de la fibra con el gel SCH con el envejecimiento.

El compuesto modificado presenta un aceptable comportamiento a flexión y tenacidad luego de 10 años comparado con el compuesto convencional. Se observan pérdidas de tenacidad en contraste con buenas resistencias aun después del envejecimiento, lo que plantea matrices con fractura frágil, contrario a lo que sugieren otros estudios que plantean una pérdida general del comportamiento mecánico; es por esto que en el presente estudio se sugiere que es más importante el efecto de densificación de la matriz que el

debilitamiento de las fibras, hecho que favorece la condición de la utilización de estos nuevos compuestos en términos de durabilidad a largas edades.

“Study on the time-dependent mechanical properties of glass fiber reinforced cement (GRC) with fly ash or slag” [46]

Construction and building materials 217 (2019) 128–136

Congmi Cheng, Juan He, Jian Zhang, Yinan Yang

Se propone el estudio de las propiedades mecánicas y los mecanismos de degradación de compuestos de GRC premezclado con fibras AR con sustitución de cemento por cenizas volantes y escoria en porcentajes del 20 y 40%, curados en condiciones naturales durante 28, 180 y 360 días y procesos de envejecimiento acelerado durante 8 días a 80°C.

En la figura 2.3.7a muestran los resultados para el módulo de rotura (MOR) para las muestras estudiadas, se aprecia como su evolución está relacionada con la ganancia de resistencia de la matriz y el deterioro de la fibra. Para el inicio del curado los compuestos de GRC con adiciones obtienen un MOR menor si se comparan con los compuestos sin fibra y GRC sin adiciones, este comportamiento se mantiene durante el tiempo de curado, aunque la diferencia disminuye progresivamente hasta los 360 días por la evolución de la matriz modificada. Con el envejecimiento el compuesto de GRC sin adiciones se ve afectado notablemente disminuyendo MOR incluso a valores cercanos a los morteros sin fibra y con sustitución, caso contrario el de los compuestos de GRC con sustitución por CV que disminuyen levemente (20%CV) o aumentan su resistencia (40%CV); esto confirma el beneficio para la resistencia de los compuestos por la modificación de la matriz, además, la pérdida de propiedades por el deterioro de la fibra en la matriz convencional.

Si se evalúa la energía de fractura con el tiempo de curado y envejecimiento el comportamiento es diferente (figura 2.3.7b). Se observa como a los 28 días de curado todos los GRC tienen una alta energía de fractura acompañado de un comportamiento dúctil, luego a los 180 días la energía de fractura de los compuestos disminuye más del 50% mostrando un comportamiento frágil, a partir de esta edad los cambios son menores. Los resultados muestran que después de los 180 días de curado no se observa corrosión en las fibras, el deterioro se inicia a los 360 días de curado y es notable para los 8 días de envejecimiento; llama la atención que la disminución de la energía de fractura es relativamente baja en este periodo. La hidratación de materiales cementantes hacen que la unión fibra matriz sea más fuerte y que sea difícil la extracción de la fibra generando su ruptura, este factor es fundamental para la ganancia de resistencia, pero se incrementa su fragilidad, esta es la clave para facilitar agrietamiento y disminuir la tenacidad del

compuesto. Se observa por el cambio de energía de fractura y la extracción de la fibra, que la corrosión química de la misma no es la razón clave de la degradación del rendimiento de GRC.

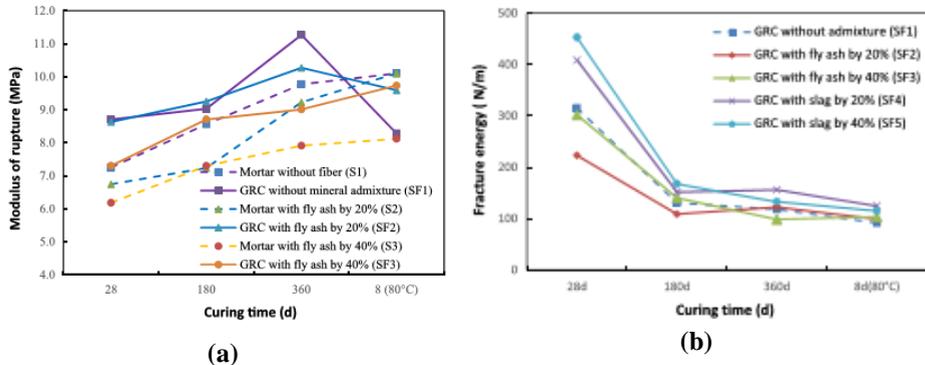


Figura 2.3.7. (a) Relación entre módulo de ruptura y tiempo de curado; (b) relación entre energía de fractura y tiempo de curado, en condiciones naturales durante 28, 180 y 360 días y envejecimiento durante 8 días a 80°C [46].

2.5. Bibliografía

1. P.I. Comino Almenara. La Fibra de vidrio AR en la construcción. En: Congreso de materiales compuestos MATCOMP95, Sevilla, España. 1995, 523-531.
2. P. Purnell, N.R. Short, C.L. Page, A.J. Majumdar. Microestructural observations in new matrix glass fibre reinforced cement. *Cement and Concrete Research*. 2000; 30: 1747-1753.
3. J. Payá, M.V. Borrachero, J. Monzo, M. Bonilla, C. León, L. Soriano. Morteros de cemento compuestos con fibras AR y puzolana procedente de catalizadores FCC usados: resultados preliminares. En: V Congreso Nacional de Materiales Compuestos MATCOMP2003, Zaragoza, España. 2003, 865-872.
4. C. León, J. Payá, M. Bonilla, L.F. Lalinde, M.V. Borrachero. Estudio del comportamiento de GRC con la adición puzolánica FCC frente procesos de envejecimiento controlado. En: VI Congreso Nacional de Materiales Compuestos MATCOMP05, Valencia, España, 2005, 947-954.
5. J. Payá, M. Bonilla, M.V. Borrachero, J. Monzó, E. Peris-Mora, L.F. Lalinde. Reusing of fly ashes in glass fibre reinforced cement: a new generation of high-quality GRC composites. *Waste Management*. 2007; 27: 1416-1421.
6. P. Purnell, N.R. Short, C.L. Page. A static fatigue model for the durability of glass fibre reinforced cement. *Journal of Materials Science*. 2001; 36: 5385-5390.
7. A. Bentur, A. Mindess. Fibre reinforced cementitious composites. *Modern Concrete Technology*, 2ª edición. 2007.

8. I. Girbés. Evaluación del uso de subproductos industriales de carácter puzolánico en conglomerantes de cemento Pórtland. Influencia de su utilización sobre la durabilidad de los materiales. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia. 2004.
9. Y. Zhang, W. Sun, L. Shang, G. Pan. Effect of high content of fly ash on the properties of glass fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Research*. 1997; 27(12): 1885-1891.
10. J.C. Anderson, K.D. Leaver, R.D. Rawlings, J.M. Alexander. *Materials Science*. Editorial Limusa, 2ª edición. 1998.
11. S. Delvasto. Materiales compuestos de base cementicia fibro-reforzados, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
12. P. Antequera, L. Jiménez, A. Miravete. Los Materiales Compuestos de Fibra de Vidrio. Universidad de Zaragoza, Secretariado de publicaciones. 2000.
13. P.I. Comino Almenara. La Realizaciones en GRC en la construcción. En: Congreso de materiales compuestos MATCOMP95, Sevilla, España. 1995, 533-538.
14. Cem-FIL reinforcement. Catálogo de fibras AR. Saint-Gobain, Vetrotex S.A.
15. M. Fernández Cánovas. Patología y terapéutica del Hormigón armado. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Servicio de publicaciones. 3ª Edición actualizada. 1994.
16. J. Payá. Adiciones activas en el hormigón según la EHE. Exigencias y posibilidades. Hormigón verde. En: I Curso sobre tecnología del hormigón, Universidad Politécnica de Valencia, ETSICCP. 2005.
17. Catálogo de residuos utilizables en la construcción. Ministerio de Agricultura, Alimentación y medio ambiente, Ministerio de Fomento. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. 2011, <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre-2011/>.
18. D. Martínez Velandia. Caracterización y reactividad de materiales puzolánicos: el humo de sílice y su estado de densificación. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia. 2006.
19. C. Gini. Tecnología del petróleo. Librería El Ateneo. 1963.
20. D.M. Considine, R. Palacios. Tecnología del petróleo. México, D.F.: Marcombo. 1977.
21. L. Soriano Martínez. Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizadores de craqueo catalítico usado (FCC). Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia. 2007.
22. Norma UNE-EN 450:1995. "Cenizas volantes para hormigón. Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad".
23. A. Bhatta, S. Priyadarshinia, A. Mohanakrishnana, A. Abría, M. Sattlera, S. Techapaphawitc. Case study. physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. *Case Studies. Case Studies in Construction Materials*. 2019;11(e00263).

24. F. Amahjour. Estudio de la reactividad de las puzolanas artificiales: cenizas volantes y humo de sílice y su reutilización en ingeniería civil. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia. 2000.
25. J. Payá, J. Monzó, M.V. Borrachero, E. Peris-Mora, E. González-López. Modificación de las características de las cenizas volantes para mejorar las propiedades del hormigón. En: Congreso de materiales compuestos MATCOMP95, Sevilla, España. 1995, 565-570.
26. A. Bentur, S. Diamond. Direct incorporation of silica fume into glass fibre strands as a means for developing GFRC composites of improved durability. *The International Journal of Cement and Lightweight Concrete*. 1987; 9(nº 3).
27. V.T. Yilmaz, F.P. Glasser. Reaction of alkali-resistant glass fibres with cement. Part 1. Review, assessment and microscopy. *Glass Technology*. 1991; 32(nº 3).
28. V.T. Yilmaz, F.P. Glasser. Reaction of alkali-resistant glass fibres with cement. Part 2. Durability in cement matrices conditioned with silica fume. *Glass Technology*. 1991; 32(nº 4).
29. V.T. Yilmaz, E.E. Lachowski, F.P. Glasser. Chemical and microstructural changes at alkali-resistant glass fiber-cement interfaces. *J.Am. Ceram. Soc.* 1991; 74 (12): 3054-3060.
30. V.T. Yilmaz. Chemical attack on alkali-resistant glass fibres in a hydrating cement matrix: characterization of corrosion products. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1992; 151: 236-244.
31. M. Kakemi, D.J. Hannasnt, M. Mulheron, V.T. Yilmaz. Techniques for determining some microstructural parameters in glass reinforced cement. *Magazine of Concrete Research*. 1996; 48: 229-236.
32. S. Marikunte, C. Aldea, S.P. Shah. Durability of glass fiber reinforced cement composites: effect of silica fume and metakaolin. *Advanced Cement Based Materials*. 1997;5: 100-108.
33. Y. Zhang, W. Sun, L. Shang, G. Pan. Effect of high content of fly ash on the properties of glass fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Research*. 1997; 27(nº 12): 1885-1891.
34. P. Purnell, N.R. Short, C.L. Page, A.J. Majumdar, P.L. Walton. Accelerated ageing characteristics of glass-fibre reinforced cement made with new cementitious matrices. *Composites: Part A*. 1999; 30: 1073–1080.
35. F.A. Mirza, P. Soroushian. Effects of alkali-resistant glass fiber reinforcement on crack and temperature resistance of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2002; 24: 223-227.
36. B. Mu, C. Meyer, S. Shimanuvich. Improving bond between fiber mesh and cementitious matrix. *Cement and Concrete Research*. 2002; 32: 783-787.
37. J.S. Lawler, D. Zampini, S.P. Shah. Permeability of cracked hybrid fiber- reinforced mortar under load. *ACI Materials Journal*. 2002; 99(4): 379-385.

38. A.H.H. Waesllisch, H. Moertel, V. Rudert. Optimisation and glass fibre reinforcement of mortars with very fine fillers. En: *Composites Materials in Concrete Construction. Proceedings of the International Seminar Held at the University of Dundee Dundee, Escocia. 2002*, 324-331
39. X. Qian, B. Shen, B. Mu, Z. Li. Enhancement of aging resistance of glass fiber reinforced cement. *Materials and Structures*.2003; 36: 323-329.
40. A. Ayadi, M. Palou, A. Iratni. Silica fume treatment for improving durability of alkali resistant glass fibres in cement matrixes. *Solid State Phenomena*.2003;90-91: 209-214.
41. H. Schorm, M. Schiekel. Prediction of lifetime of alkali-resistant glass fibres in cementitious concretes. En: *6th RILEM Symposiun on Fibre-Reinforced Concrete, BEFID 2004, Varenna, Italia. 615-624.*
42. A. Enfedaque, D. Cendón, F. Gálvez, V. Sánchez-Gálvez. Analysis of glass fiber reinforced cement (GRC) fracture surfaces. *Construction and Building Materials*. 2010; 24: 1302-1308.
43. M. Butler, S. Hempel, V. Mechtcherine. Modelling of ageing effects on crack-bridging behaviour of AR-glass multifilament yarns embedded in cement-based matrix. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41: 403–411.
44. V. Genovés, J. Gosálbez, R. Miralles, M. Bonilla, J. Payá. Ultrasonic characterization of GRC with high percentage of fly ash substitution. *Ultrasonics*.2015; 60: 88–95.
45. M. Song, P. Purnell, I. Richardson. Microstructure of interface between fibre and matrix in 10-year aged GRC modified by calcium sulfoaluminate cement. *Cement and Concrete Research*. 2015; 76: 20–26.
46. C. Cheng, J. He, J. Zhang, Y. Yang. Study on the time-dependent mechanical properties of glass fiber reinforced cement (GRC) with fly ash or slag. *Construction and Building Materials*.2019; 217: 128–136.doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.063.

3. EXPERIMENTAL

3.1. Materiales empleados

3.1.1. Cemento

La empresa CEMEX (Buñol-Valencia) suministró el cemento gris tipo CEM I 52,5 R y el cemento blanco tipo CEM BL II/B-LL 42,5 R, Asland Lafarge (Puerto Sagunto-Valencia) suministró el cemento gris tipo CEM I 52,5 R (tabla 3.1.1). A los cementos del tipo CEM I 52,5 R se les adiciona un 25% de filler calizo para disminuir su estándar de resistencia a 42,5 R con el fin de igualar el estándar del cemento blanco utilizado.

Tabla 3.1.1. Composición química promedio de los cementos (% en peso). *pérdida por calcinación.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	*PPC
CEM I 52,5 R CEMEX	22,05	5,44	3,64	62,53	2,43	3,75	1,42	1,6
CEM BL II/B-LL 42,5 R CEMEX	18,96	2,33	0,19	63,92	0,36	3,62	0,98	8,63
CEM I 52,5 R Asland	19,97	4,52	2,99	62,53	1,25	3,51	0,9	2,54

3.1.2. Filler calizo

Este fue tamizado por la malla de 80µm y de acuerdo con el ensayo de termogravimetría el contenido promedio en carbonato cálcico (CaCO₃) es del 87,8% aproximadamente, condiciones adecuadas para poder ser adicionado al cemento. Se adiciona filler en una cantidad correspondiente al 25% en peso de cemento y se mezcla con el mismo. Posteriormente a esta mezcla se adiciona el material puzolánico.

3.1.3. Fibra de vidrio AR

Se utilizaron fibras de vidrio Cem-FIL AR (álcali-resistente) de diferentes longitudes, en especial las de 12 y 24mm de longitud utilizadas comercialmente para los morteros de GRC premezclados y proyectados respectivamente, no dispersables en agua, suministradas por la empresa Vetrotex Cem-FIL S.L. (Alcalá de Henares-Madrid). Para la experiencia de morteros de GRC con mezcla de fibras, diferentes tipos tales como: fibras E de 12mm, fibras AR dispersables y no dispersables de 6, 12 y 24mm. En la tabla 3.1.2 se observa la diferencia de composición entre la fibra AR y E.

Tabla 3.1.2. Composición de fibras vidrio AR y fibras vidrio E [2, 3].

COMPONENTE		FIBRA AR (%)	FIBRA E (%)
Sílice	SiO ₂	55-75	53-54
Cal	CaO		20 - 24
Magnesio	MgO		
Alúmina	Al ₂ O ₃	0-5	14 – 15,5
Óxido de Boro	B ₂ O ₃		6,5 - 9
Óxidos de circonio, sodio, potasio, hierro, titanio			≤ 1
Óxido de Circonio	ZrO ₂	15-20	
Óxido de Sodio	Na ₂ O	11-21	
Óxido de Litio	Li ₂ O	0-5	

3.1.4. *Materiales puzolánicos*

El catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) utilizado fue suministrado por la empresa BP OIL España S.A. (Grao de Castellón-Valencia). La ceniza volante (CV) fue suministrada por la central termoeléctrica de Andorra (Teruel). El humo de sílice densificado (HS) fue suministrado por la empresa Ferro Atlántica (Sabón-A Coruña).

3.1.5. *Árido*

Como componente de los morteros de GRC que se incluyen en este trabajo tenemos un árido silíceo AFA80 (tabla 3.1.3) suministrado por la empresa Caolines Lapidra (Lliria – Valencia) con un módulo de finura de 3,1.

Tabla 3.1.3. Granulometría árido AFA80.

Tamiz(mm)	Retenido (g)	% retenido	% acumulado
2	0	0	
1,6	0	0	0
1	1	0,10	0,10
0,5	336	33,74	33,84
0,16	570,3	57,27	91,11
0,08	73,2	7,35	98,46
<0,08	15,3	1,54	100,00
Σ	995,8	100,00	323,52

3.1.6. *Agua*

Para la preparación de pastas y morteros se utilizó el agua suministrada por la red de agua potable de Valencia, cuyo análisis promedio se indica en la tabla 3.1.4.

Tabla 3.1.4. Análisis promedio de agua potable, * expresado como mg/l de CaCO₃.

Cloruros(mg/l)	* Ca y Mg Dureza total	Sulfatos (mg/l) (SO ₄)	Conductividad (μS/cm)	pH
93	480	298	939	7,88

3.1.7. Aditivos

Para el correcto amasado de los morteros se ha utilizado el superplastificante Melment L240 de la empresa Degussa Construction Chemicals España S.A. [1]. Se trata de un aditivo superplastificante de nueva generación, a base de éter policarboxílico, reductor de agua de alta actividad que permite la confección de hormigón de elevadas resistencias iniciales sin merma de resistencias finales. Se trata de un superplastificante. En la tabla 3.1.5 se observan sus características técnicas.

Tabla 3.1.5. Características técnicas aditivos [1].

CARACTERÍSTICA	MELMENT L240
<i>Función principal</i>	Superplastificante / Reductor de agua de alta actividad
<i>Función secundaria</i>	Acelerante de endurecimiento
<i>Efecto secundario</i>	Riesgo de disgregación a dosificación elevada
<i>Aspecto físico</i>	Líquido azul grisáceo
<i>Densidad (20°C)</i>	1,19±0.03 g/cm ³
<i>pH (20°C)</i>	8 – 11,5
<i>Contenido en cloruros</i>	≤ 0,1%

3.1.8. Reactivos

En la tabla 3.1.6 se presentan los distintos reactivos utilizados en el presente trabajo, algunos de ellos como agentes químicos agresivos para atacar los morteros.

Tabla 3.1.6. Características de los reactivos utilizados.

REACTIVO	PUREZA (%)	CASA COMERCIAL
Acetona	99,6	Guinama S.L.
Fenolftaleína	98	Panreac Química S.A.
Cloruro Cálcico anhidro	95	Panreac Química S.A.
Sulfato Sódico anhidro	99,5	Guinama S.L.
Cloruro Amónico	99,5	Guinama S.L.
Ácido Sulfúrico	96	Panreac Química S.A.

3.2. Equipos y procedimientos utilizados

3.2.1. Molienda

El molino de bolas utilizado en los procesos de molienda de la CV y el FCC está compuesto por un recipiente cerámico de un litro de capacidad, en el cual se introducen bolas de alúmina de 2cm de diámetro y el material a moler; luego con un temporizador se programa el tiempo de molienda específico (figura 3.2.1a). En la tabla 3.2.1 se muestran los procesos de molienda utilizados para este trabajo.

Tabla 3.2.1. Procesos de molienda utilizados.

Material	Tiempo de molienda (min)	Nº de bolas	Peso material (g)
CV	20	78	400
CV	40	78	400
FCC	20	98	300

3.2.2. Preparación de los morteros de GRC

3.2.2.1. Equipos

Para las placas de GRC se dispone de moldes de metacrilato de 1cm de espesor (figura 3.2.1b), de las placas se cortan probetas de 1x5x22,5cm, de acuerdo con la norma UNE EN 1170-5:1998 [2]; el proceso de compactación del mortero se realiza mediante una mesa de vibración (figura 3.2.1c). Para los prismas de GRC de 4x4x16cm, se dispone de moldes con tres compartimentos horizontales para la preparación simultánea de tres probetas (figura 3.2.1d), las dimensiones del interior de cada compartimiento son de 40x40mm de sección transversal y 160mm de longitud. Se utiliza una compactadora compuesta de una mesa rectangular unida rígidamente por dos brazos ligeros a un eje de rotación (figura 3.2.1e); la mesa es levantada por una leva de acero a una velocidad uniforme de una revolución por segundo, que le permite caer libremente desde una altura de 15mm.

La amasadora utilizada cumple con la norma UNE-EN 196-1:1996 [3] y consta de un recipiente de acero inoxidable con una capacidad de 5 litros aproximadamente y una pala de acero inoxidable, los cuales se fijan con firmeza y, además, permiten ajustar su separación (figura 3.1f). Se dispone de dos velocidades de rotación, lenta de 140 ± 5 rpm. y rápida de 285 ± 5 rpm.



Figura 3.2.1. (a) molino de bolas, (b) molde de metacrilato, (c) mesa de vibración, (d) molde metálico, (e), compactadora, (f) amasadora.

3.2.2.2. Procedimiento de amasado y curado:

La preparación de las probetas de mortero se realizó tomando como base el procedimiento conocido como “sprayed”, según el catálogo de fibras AR- Vetrotex [4] y la norma UNE-EN 196-1:1996 [3]; para tratar de obtener resultados óptimos se han realizado varias modificaciones teniendo en cuenta los materiales utilizados.

- Homogeneizar la mezcla de cemento y filler calizo con la puzolana a utilizar según sea el caso (CV, FCC, CV + FCC), los cuales conforman el material cementante.
- Durante 30 s, a velocidad rápida, se mezclan el material cementante con el agua más 2/3 del plastificante.
- Los siguientes 30 s, a velocidad rápida, se añade gradualmente el árido.

- Se deja reposar la mezcla, y se remueve del fondo y de las paredes del recipiente el material que no se ha mezclado o que permanece adherido.
- Se continúa con 30s, a velocidad rápida, adicionando el tercio restante de plastificante. Luego de este proceso se procede a realizar la prueba de trabajabilidad (procedimiento descrito en el siguiente apartado).
- Luego durante 30s, a velocidad lenta, se adiciona la fibra.
- Se finaliza el amasado con 45 s a velocidad lenta, para que las fibras queden bien distribuidas por toda la mezcla.
- Una vez finalizado el amasado, se rellenan los moldes de 4x4x16cm y se compacta la mezcla con la ayuda de una compactadora que cumpla las especificaciones exigidas por la norma, el molde se llena en una fase y se compacta de la siguiente forma: para el mortero control 30 golpes, cuando el mortero presenta sustitución de cemento por CV 30 golpes, cuando es FCC 45 golpes y cuando se mezclan CV y FCC 37 golpes.
- Se retira el molde de la compactadora y se quita el exceso de mortero con una regla plana, una vez enrasado perfectamente el molde, se cubre con una placa de vidrio para evitar la evaporación y se procede a su curado en la cámara húmeda bajo las condiciones que establece la norma.
- A las 24 horas se procede al desmoldado de las probetas, posteriormente, se guardan sumergidas en agua en la cámara húmeda durante 28 días, tiempo fijado para la edad de curado.
- Luego se llevan al baño termostático donde se inicia el proceso de envejecimiento a una temperatura de 55°C, las probetas permanecen sumergidas durante 7, 14, 21 y 28 días.
- Para finalizar, las probetas se sumergen en agua hasta media hora antes de realizar el ensayo.

3.2.2.3. *Trabajabilidad*

Las pruebas de trabajabilidad se realizaron con el objeto de determinar el contenido de plastificante necesario para obtener un mortero fresco y con la consistencia adecuada para trabajar con la fibra (figura 3.2.2), según la norma UNE EN 1170-1 [5]:

- Se sitúa un tubo de plástico de 5 cm de diámetro por 5 cm de altura, en el centro de una placa de metacrilato o vidrio.
- Se llena el tubo con el mortero sin fibra, se agita suavemente la base para eliminar burbujas de aire agitando y se enrasa.
- Se eleva lentamente el tubo de la placa, permitiendo que el mortero fluya sobre la superficie en forma de círculos concéntricos.

- Se espera 30 segundos para tomar la lectura del anillo, la interpretación del resultado dependerá del método de preparación y del proceso de colocación. En este caso, se buscan 16cm diámetro aproximado del anillo (equivalente al anillo 5 descrito en la norma), condición que nos permite obtener una consistencia adecuada para el proceso de compactación por vibración.



Figura 3.2.2. Pruebas de trabajabilidad para morteros de GRC. (a) Mortero con consistencia inadecuada (b) Mortero con consistencia adecuada.

3.2.3. *Análisis termogravimétrico (ATG)*

Se ha utilizado un módulo TGA 850 Mettler-Toledo (figura 3.2.3a), que permite medir simultáneamente la curva termogravimétrica (TG) y la curva térmico-diferencial (DTA) (figura 3.2.4). El equipo está compuesto por: una termobalanza analítica sensible, un horno, un sistema de purga de gases y un ordenador para el control y visualización de los datos. Se utilizan crisoles de aluminio de 100µl con tapa sellable perforada, para facilitar la obtención de una atmosfera autogenerada, permitiendo una interacción entre la muestra y su fase gaseosa por un tiempo mayor; el resultado es una mayor separación de los procesos de pérdida de masa, desplazando los picos a temperaturas superiores.

El objetivo de estudiar las pastas mediante esta técnica es evaluar los cambios que sufren las pastas de cemento con y sin sustitución de puzolana, así como en las pastas de cal / puzolana; evaluando la pérdida de masa debida a las reacciones de deshidratación de descomposición del hidróxido cálcico ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y del agua combinada de los silicatos y silicoaluminatos cálcicos hidratados (SCH y SACH respectivamente); además se puede evaluar la cantidad de cal fijada consumida por las puzolanas, determinando la cantidad de hidróxido cálcico presente en las pastas con puzolana comparadas con la pasta de sólo cemento, la cual contiene el 100% del hidróxido cálcico para un tiempo específico (tabla 3.8). Para realizar este ensayo se eligió la siguiente rutina:

- Se define el intervalo de temperatura.

- Se coloca la muestra en un crisol de aluminio sellado que lleva una tapa con un pequeño orificio.
- Se inicia el ensayo con una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmósfera de nitrógeno con un flujo de 75 ml/min.
- El intervalo de temperatura seleccionado nos permite visualizar la pérdida de masa que más nos interesa, la debida a la deshidroxilación de la portlandita (hidróxido cálcico).

Tabla 3.2.2. Fórmulas para el cálculo de la cantidad de hidróxido cálcico, cal fijada y agua combinada de los hidratos.

HIDRÓXIDO CÁLCICO CH_p	$\frac{H}{PM_{H_2O}} \times PM_{CH}$	<i>H</i> : pérdida de agua evaluada sobre los 520-600°C <i>PM_{CH}</i> : peso molecular de la cal. <i>PM_{H2O}</i> : peso molecular del agua.
CAL FIJADA CF (%)	$\frac{((CH_c \times C\%) - CH_p)}{(CH_c \times C\%)} \times 100$	<i>CH_c</i> : cantidad de hidróxido cálcico que contenía la pasta la pasta control en un tiempo determinado de curado. <i>CH_p</i> : cantidad de hidróxido que queda en la pasta con puzolana a la misma edad de curado. <i>C%</i> : cantidad de cemento (expresada en tanto por uno) en la pasta con puzolana.
AGUA COMBINADA DE LOS HIDRATOS AH (%)	$P_t - H$	<i>P_t</i> : pérdida total de agua <i>H</i> : pérdida de agua que corresponde al hidróxido cálcico.

Se entiende por análisis térmico al grupo de técnicas que permiten medir una propiedad física de una sustancia y los productos de reacción, sometiendo la muestra a un programa de temperatura controlado. Son variados los métodos térmicos, su diferencia radica en las propiedades medidas y en los programas de temperatura. El método utilizado en este trabajo es la termogravimetría, mediante el cual se obtiene el registro continuo de la masa de una muestra presente en una atmósfera controlada en función de la temperatura o del tiempo, al someterla a un programa de temperatura.

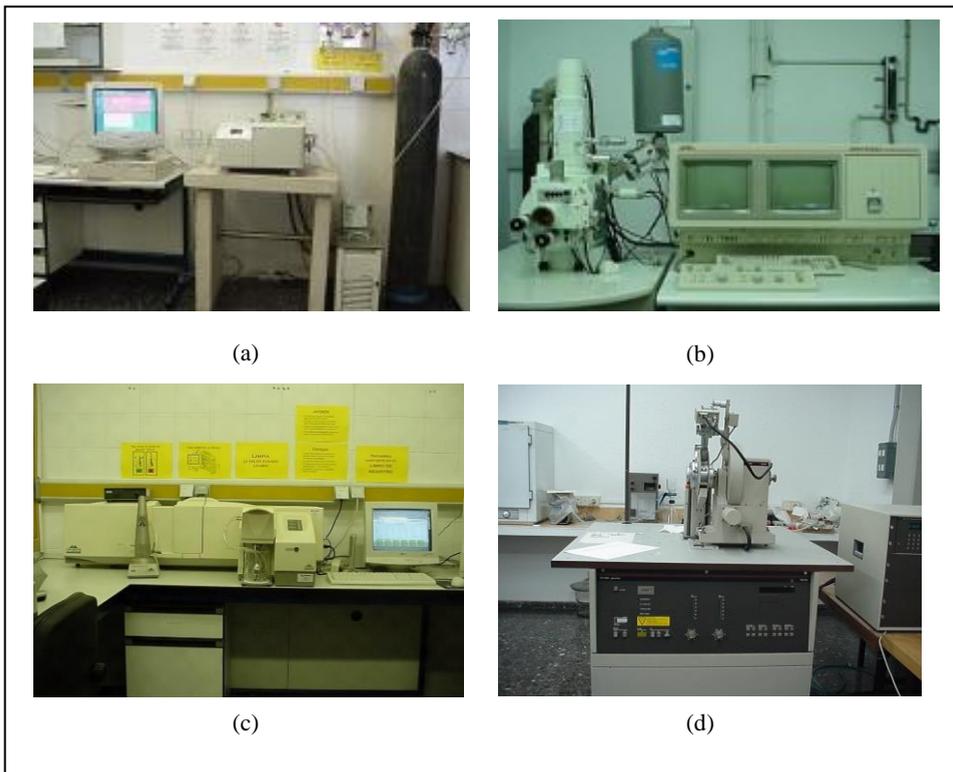


Figura 3.2.3. (a) TG, (b) SEM, (c) Granulómetro, (d) DRX.

El registro gráfico de la variación de masa o del porcentaje de masa en función del tiempo se denomina termograma o curva de descomposición térmica (TG); para realizar un análisis adecuado se analiza su derivada (DTG), la cual nos proporciona información sobre la velocidad de pérdida o ganancia de masa con la temperatura o el tiempo; la curva de DTG permite identificar con mayor facilidad las alteraciones de masa, especialmente cuando existen varios procesos o cuando las pérdidas son pequeñas (figura3.2.4) [6].

La curva térmico-diferencial (DTA) representa la diferencia entre la temperatura de la muestra y la del entorno, y el tiempo o temperatura de calentamiento a una determinada atmósfera, lo cual permite relacionar el calor involucrado en el proceso; finalmente se puede medir simultáneamente la curva TG y la DTA, sin necesidad de usar material de referencia mediante la curva térmico-diferencial simple (SDTA). El procedimiento para la preparación de las diferentes pastas estudiadas fue el siguiente:

- Homogeneizar la mezcla de cemento y filler calizo con la puzolana a utilizar, los cuales conforman el material cementante y mezclarlo con el agua.

- Colocar la pasta en un recipiente cerrado y mantenerla en la cámara húmeda o en el baño termostático durante el tiempo estipulado.
- Moler la pasta en el mortero de ágata adicionando acetona, para detener el proceso de hidratación.
- Filtrar la muestra molida y secar en la estufa a 60°C, 30 minutos.

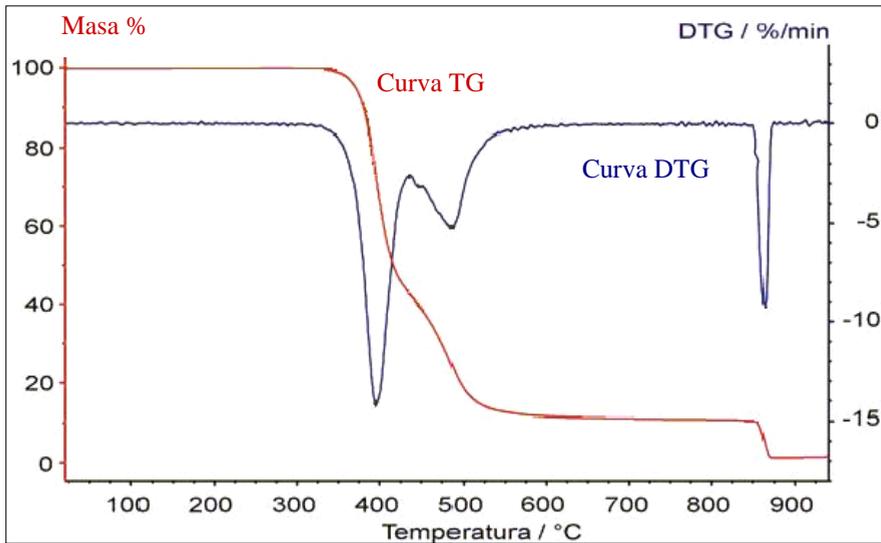


Figura 3.2.4. Termograma o curva de descomposición térmica.

3.2.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En el campo de la ciencia de los materiales, y especialmente en el área de materiales compuestos, es de gran importancia el conocimiento detallado de la naturaleza física y química de las superficies de los sólidos a escala micrométrica [6].

La microscopía de barrido de electrones (SEM), permite obtener imágenes claras de gran aumento, observando la microestructura de los materiales que son sometidos al análisis; para obtener imágenes más nítidas las muestras se pueden recubrir con oro (Au), con paladio (Pd) o con su aleación. Si se necesita realizar microanálisis, este se realiza con la técnica de la sonda de electrones (EMPA) recubriendo la muestra con carbono, todo esto con el fin de facilitar la conductividad eléctrica a través de la muestra. La obtención de la imagen se realiza a partir del barrido de la superficie con una pistola de electrones que emite un haz muy fino, lo cual produce diversos tipos de señales: electrones retrodispersados (BSE), secundarios (SE) y de Auger, además, fluorescencia de rayos X y otros fotones de diversas energías.

El equipo utilizado es el modelo JEOL JSM6300 (figura 3.3b) y las imágenes se obtienen a partir de un barrido sobre la muestra de electrones secundarios generados aplicando un voltaje de 20 kV a una distancia de trabajo de 15mm, las señales utilizadas para el estudio de superficies corresponden a electrones secundarios. El microanálisis se realizó con el equipo OXFORD INSTRUMENT modelo Link-Isis, el programa de adquisición de rayos x utilizado fue el X-Ray analysis y el programa para cuantificar el SEM Quant.

Para el estudio óptico se utilizó un microscopio modelo Olympus SZ61, con un rango de magnificaciones que se extiende de 6,7x a 45x (con oculares 10x) con un amplio índice de aumento de 6.7:1, el cual lleva incorporada una cámara para la captación de imágenes, modelo ALTRA 20. La finalidad de este estudio era la identificación de la zona de interfase entre la matriz y el haz de filamentos de fibra de vidrio AR, observando la forma que presentan en las matrices estudiadas.

3.2.5. *Análisis granulométrico por difracción láser*

La determinación de tamaños y la distribución de las partículas se realizó mediante el analizador de tamaños de partícula Mastersizer 2000 de Malvern Instruments (Fig. 3.3c). El rango de medida de este equipo permite medir partículas en la franja de 0,02 a 2000 micrómetros. La difracción se basa en la dispersión de un láser generada al encontrar un obstáculo, produciendo una serie de interferencias constructivas y destructivas que dan lugar a un patrón de difracción.

3.2.6. *Difracción de rayos X (DRX)*

El principio de la difracción de rayos X (DRX), se basa en la interacción entre el vector eléctrico de la radiación X y los electrones de la materia de la muestra por la que pasa, dando lugar a una dispersión. Cuando los rayos X son dispersados por el entorno ordenado de un cristal, se da lugar a interferencias constructivas entre los rayos dispersados, ya que las distancias entre los centros de dispersión son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la radiación; el resultado es la difracción (ley de Bragg).

Al evaluar una muestra por la técnica de difracción de rayos X se pretende demostrar si se trata de sustancias cristalinas o por el contrario de sustancias con una estructura amorfa. Se ha utilizado un difractómetro de rayos X modelo Philips PW1710 Based (figura 3.3d). Se ha utilizado la radiación K_{α} de Cu y monocromador secundario (filtro de Níquel) que elimina la radiación K_{β} de Cu. La intensidad y voltaje del tubo generador de rayos X se ha ajustado en todas las medidas a 20 mA y 40kV, respectivamente, con una velocidad de barrido de 0,02 grados por minuto y un rango total 2-theta de 5 a 60° y 10 a 60°. El

análisis de los resultados se efectuó usando el programa DRXWin 1.4, y la base de datos elaborada con el programa Creafit 1.3.

3.2.7. *Proceso de sonicación*

Para desagregar las partículas de humo de sílice densificado y disminuir su tamaño, se utilizó una sonda de ultrasonidos Sonicator3000 suministrada por la empresa MISONIX (figura 3.2.5). El funcionamiento de la sonda consiste en la transformación de energía eléctrica en mecánica a través de la sonda. Esta energía es transmitida por la punta de la sonda (sumergida en la muestra) en forma de ultrasonidos, los cuales generan un movimiento vertical con una amplitud que es función de la potencia suministrada por el equipo.

El proceso de sonicación se puede programar en ciclos de 0 a 10 horas y niveles 1 a 10 de potencia, variando el tiempo, nivel e intervalos de potencia (directamente proporcional a la amplitud de los ultrasonidos); con una potencia máxima de 600 vatios, cada nivel indica el grado de oposición que ejerce la muestra al trabajo realizado por los ultrasonidos. Se planteó un proceso de sonicación en vía húmeda a potencia constante durante 10 minutos, nivel 10 de potencia, con una oposición ejercida por la muestra de 120 vatios aproximadamente, para una suspensión de humo de sílice densificado (HSD) y agua, con una relación sólido/líquido de 0,29 [7].

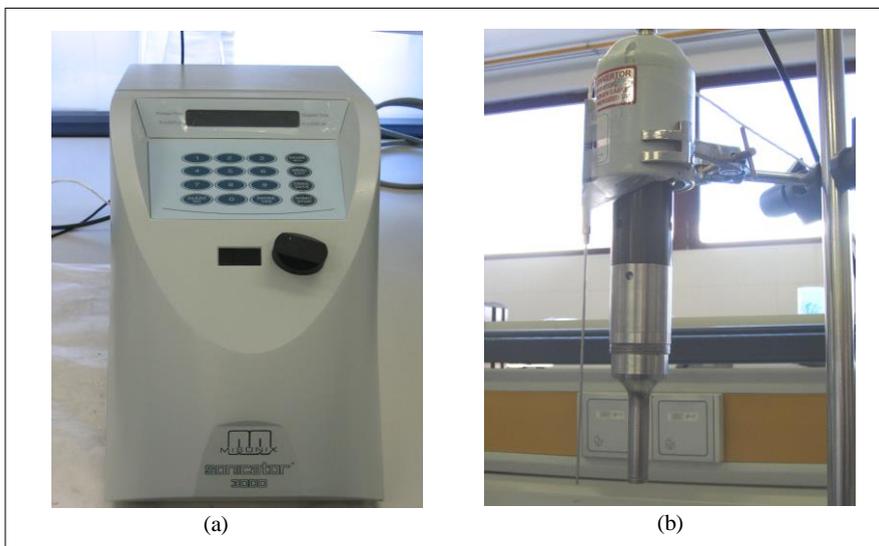


Figura 3.2.5. (a) SONICATOR3000, (b) Sonda de ultrasonidos.

3.2.8. Ensayos mecánicos

3.2.8.1. Diagrama carga vs. flecha

Para el registro del diagrama “Carga vs. Flecha”, se ha utilizado una prensa multi ensayos INSTRON 2240 (figura 3.2.6 a y b) con una capacidad de 100kN, se cuenta además con el software BLUE HILL2 para el procesamiento de la información, de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1170-5:1998 [2]. De este gráfico se extraen la flecha, la carga y la tensión en el límite de proporcionalidad y en la rotura (Figura 3.2.7); y gracias al software, se obtienen de forma indirecta los valores de módulo de elasticidad y tenacidad:

- *Módulo de rotura (MOR)*: Representa el punto donde se genera la rotura de la probeta; se obtienen las variables de carga (F_{MOR} - kg) y flecha o desplazamiento (Δ_{MOR} - mm).
- *Límite de proporcionalidad (LOP)*: Representa el punto aproximado donde se genera la primera fisura, el compuesto inicia el cambio de un comportamiento elástico a plástico, se obtienen las variables de carga (F_{LOP} - kg) y flecha o desplazamiento (Δ_{LOP} - mm).
- *Módulo de elasticidad (ϵ)*: Correspondiente a la pendiente del tramo elástico (MPa).
- *Tenacidad*: Energía en Julios (J) que absorbe un material hasta romperse, representada como el área bajo la curva carga-flecha hasta que la carga de rotura (módulo de rotura - MOR), disminuya en un 80%.

3.2.8.2. Resistencia a flexión y compresión

Para la determinación de la resistencia mecánica a flexión y compresión de las probetas con dimensiones 4x4x16cm, se utiliza una prensa universal de acuerdo con el procedimiento establecido por la norma UNE-EN 196-1:1996 [3] (Figura 3.2.6c y d). El ensayo a flexión se realiza a tres probetas prismáticas con un solo punto de carga, en el centro de la luz; se registra el valor de carga máxima necesaria para fracturar la probeta (tabla 3.2.3); para el ensayo a compresión, se utilizan los dos prismas resultantes de cada probeta.

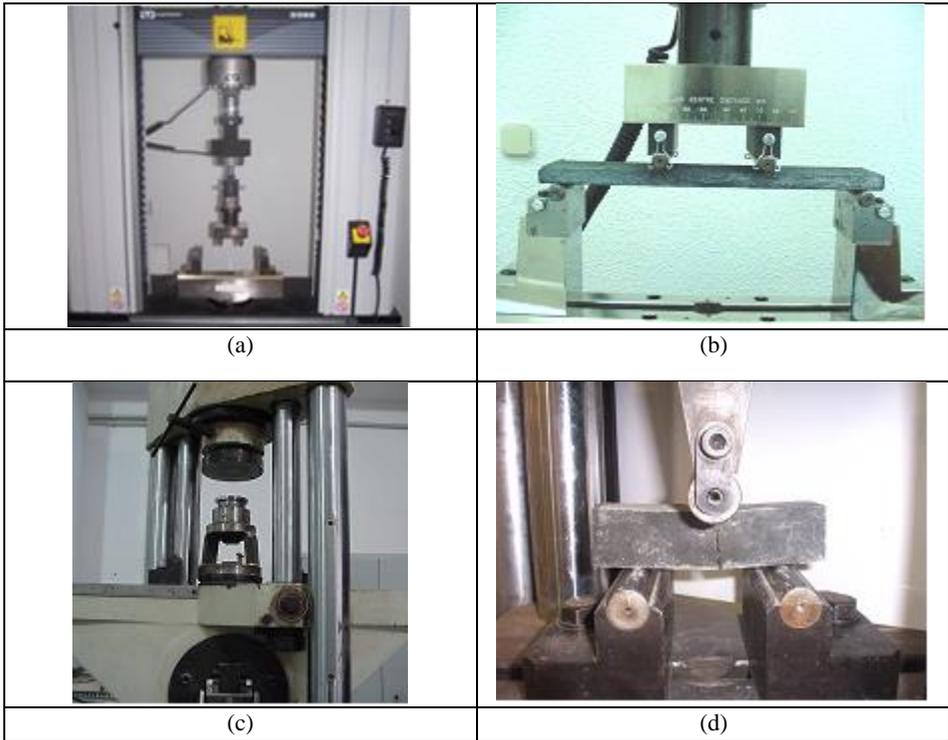


Figura 3.2.6. Equipos utilizados para los ensayos a flexión y compresión: (a) Prensa multi ensayos INSTRON 2240, (b) soportes para ensayo a flexión 4 puntos, (c) máquina de ensayo universal, (d) soportes para ensayo a flexión 3 puntos.

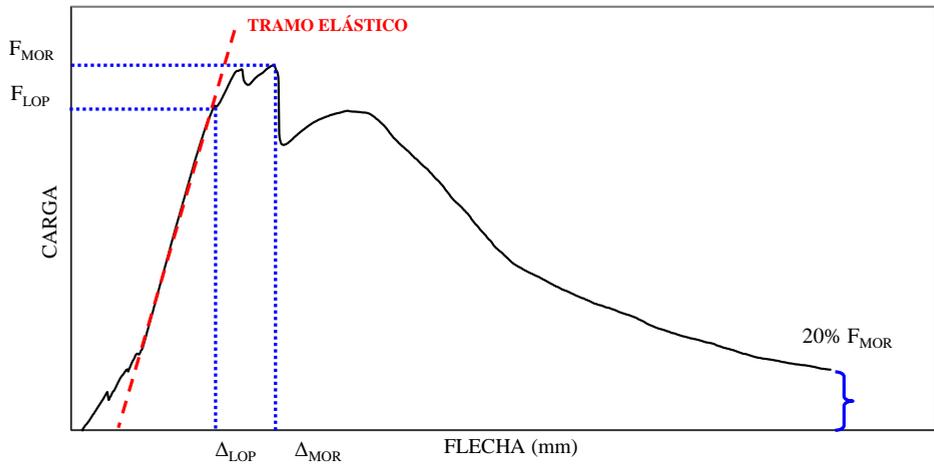


Figura 3.2.7. Variables curva Carga vs. Flecha [2].

Para el ensayo a flexión de probetas de 1x5x22.5cm, se utiliza la prensa multiensayos INSTRON 2240 (figura 3.2.6 a y b), la cual permite registrar la curva carga-flecha y el módulo de rotura (MOR), punto en el cual se genera la fractura de la probeta, de acuerdo con a la norma UNE-EN 1170-5:1998 [2]; en este caso, el ensayo se realiza con dos puntos de carga correspondientes a los extremos del tercio medio de la luz (tabla 3.2.3).

Tabla 3.2.3. Resistencia a flexión (UNE-EN 1170-5:1998 [2] y 196-1:1996 [3]).

Resistencia a Compresión (MPa, N/mm ²) Probetas 4x4x16 cm. UNE-EN 196-1:1996	$R_c \approx \frac{F_c}{1600}$	F_c : Carga de rotura (N) 1600: 40x40mm, superficie de los platos o placas auxiliares (mm ²)
Resistencia a Flexión (MPa, N/mm ²) Probetas 4x4x16 cm. UNE-EN 196-1:1996	$R_f \approx \frac{1.5 * F_f * l}{b^3}$	F_f : Carga de rotura (N) l : Distancia entre apoyos (mm) b : Lado (mm)
Resistencia a Flexión (MPa, N/mm ²) Probetas 1x5x22.5 cm. UNE-EN 1170-5:1998	$R_f \approx \frac{F_f * l}{(b * d^2)}$	F_f : Carga rotura (LOP, MOR) (N) l : Distancia entre apoyos (mm) b : Ancho (mm) d : Espesor (mm)

Como complemento a las propiedades mecánicas se incluyen en este estudio el modelo de análisis planteado por Xincheng Pu [8]. El autor plantea el análisis del comportamiento mecánico de morteros con diferentes adiciones mediante el uso de índices específicos de resistencia (tabla 3.2.4). Con su aplicación se puede determinar el efecto puzolánico y el grado de ganancia de resistencia de los morteros; además, permiten diferenciar el aporte a la resistencia por el efecto puzolánico y por la hidratación del cemento.

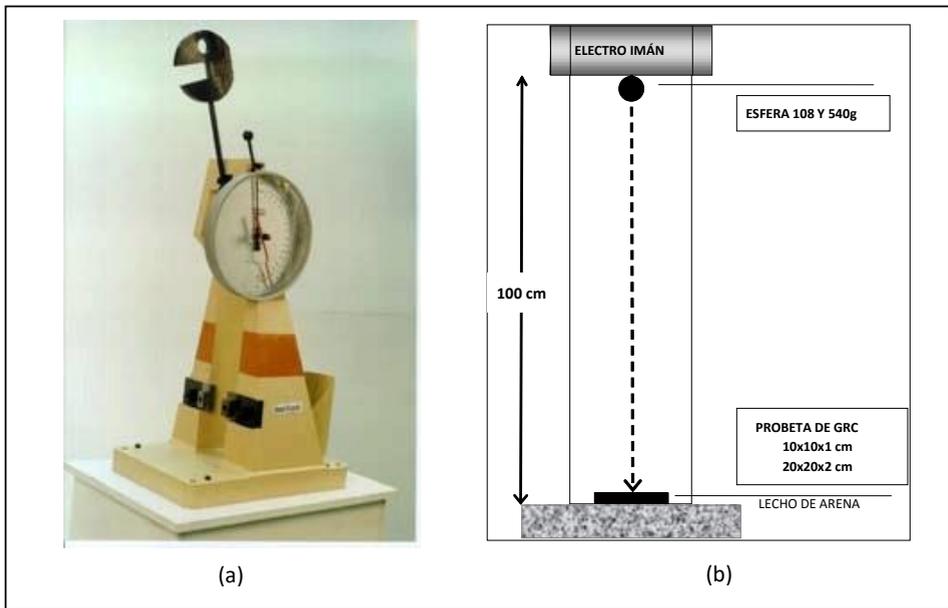
Tabla 3.2.4. Índices específicos de resistencia para evaluar el comportamiento mecánico de los morteros [8].

No	ÍNDICE	UNIDAD	FÓRMULA
I	Resistencia específica mortero control (REC)	MPa	$\frac{R_o}{100}$
II	Resistencia específica mortero con puzolana (REP)	MPa	$\frac{R_p}{(100 - \% \text{ sustitución})}$
III	Resistencia específica del efecto puzolánico (REEP)	MPa	$II - I$
IV	Grado de ganancia o relación entre las resistencias específicas (GG)		$\frac{II}{I}$
V	Grado de contribución del efecto puzolánico (GCEP)	%	$\frac{(II - I)}{II} \times 100$
VI	Grado de contribución de la hidratación del cemento (GCH)	%	$\frac{I}{II} \times 100$

3.2.8.3. Resistencia al impacto

La resistencia al impacto es una magnitud que cuantifica la cantidad de energía que absorbe un material al romperse bajo la acción de un impacto, por unidad de superficie de rotura; se expresa en julios por metro cuadrado (J/m^2). La resistencia al impacto se diferencia de la tenacidad en que ésta cuantifica la cantidad de energía absorbida por un compuesto, bajo la acción de un esfuerzo progresivo, y no de un impacto.

Se ha utilizado para determinar la resistencia al impacto el péndulo Izod, resultando un valor indicativo de la fragilidad o la resistencia a los choques del material ensayado (probetas sin entalla), según la norma UNE-EN ISO 180:2001 [9]. El péndulo utilizado fue el dinamómetro al choque 629-D, suministrado por la empresa NEURTEK S.A (figura 3.2.8a).



Además, se implementó el método de caída libre de peso, en las condiciones usualmente utilizadas por otros autores (figura 3.2.8b) [10]. La metodología consiste en sostener mediante un electroimán, una esfera de acero de 108 o 540g a una altura de 100cm, y dejarla caer sobre la cara superior de la probeta, la cual debe estar apoyada y nivelada sobre la superficie o un soporte; de acuerdo a los primeros resultados y para disminuir el nivel de incertidumbre se incluyó una cama de arena como apoyo para la probeta. Normalmente se utilizan probetas de 2 a 2.5cm de espesor, en nuestro estudio se utilizó un conjunto de 5 probetas cuadradas de 10 y 20cm de arista y un espesor de 1cm (espesor igual al de las placas de GRC fabricadas) y 2cm respectivamente; se controla el número

de impactos necesarios para producir la primera fisura en la cara inferior y la rotura. En este caso se entiende por rotura el momento en que una fisura que atravesase completamente el espesor de la probeta, y se pueda visualizar en la superficie inferior de la misma, con una apertura mayor a 1mm.

3.2.9. *Envejecimiento acelerado*

Las probetas fueron sometidas a un proceso de envejecimiento, sumergiéndolas en un baño termostático a una temperatura de 55°C, el cual está compuesto por un dispositivo aislado térmicamente, dos resistencias que calientan el agua del baño, un agitador que remueve el agua para homogeneizar su temperatura y un termostato que conecta o desconecta las resistencias para mantener constante la temperatura del agua. El curado de los morteros se realizó en cámara húmeda, dejándolos durante 28 días sumergidos en agua; posteriormente, se sometieron al proceso de envejecimiento acelerado, durante 7, 14, 21 y 28 días. De acuerdo con diferentes autores, los estudios de envejecimiento acelerado especifican las equivalencias en tiempo real, según las condiciones planteadas por cada autor, para cada uno de los períodos de envejecimiento a los que fueron sometidas las probetas de mortero estudiadas (tabla 3.2.5).

Tabla 3.2.5. Equivalencia en días para los procesos de envejecimiento acelerado.

AUTOR	CONDICIONES PROCESO DE ENVEJECIMIENTO	EQUIVALENCIA EN DÍAS PARA UN DÍA DE ENVEJECIMIENTO	EQUIVALENCIA PARA ESTUDIO	
			ENVEJECIMIENTO EN AGUA A 55°C	
			7 días	28 días
K.L. Litherland [11]	Ambiente húmedo, temperatura de 80°C	365	No aplica	No aplica
A. Ayadi [12]	Ambiente húmedo, Sumergir en agua 80°C,	1672	No aplica	No aplica
P. Purnell [14]	Sumergir en agua 55°C, clima Reino Unido	100	730	2920
A.H.H. Waellich [13]	Sumergir en agua 60°C, clima Alemania	391	2920	10950

Existen diferencias entre los procesos planteados y los tiempos reales de equivalencia, cada uno de ellos depende de las condiciones ambientales del lugar donde se realizan y de los modelos utilizados para su cálculo; los modelos de Litherland [11] y Ayadi [12], no aplican a nuestro caso por tratarse de temperaturas de envejecimiento mayores. Pero podemos aceptar que, con el proceso de envejecimiento utilizado en este estudio, se ha trabajado en condiciones que se acercan a los planteamientos de Waellich [13] y Purnell

[14]; morteros sometidos a 28 días de envejecimiento acelerado tendrían una edad real de 2920 y 10950 días respectivamente.

Existe una gran diferencia en la edad determinada por cada modelo, puede ser causa de las condiciones ambientales de trabajo o de los 5°C de temperatura adicionales para el modelo de Waellisch [13]; pero podemos aceptar que estas referencias nos brindan un parámetro óptimo para evaluar las condiciones de durabilidad de morteros y pastas, a edades que pueden superar los 20 años.

3.2.10. Absorción de agua y densidad seca

Para la determinación del porcentaje de absorción de agua por inmersión y la densidad seca (tabla 3.2.6), se ha seguido el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1170-6:1998 [15]:

- Medir las probetas y calcular el volumen aparente de la probeta en cm³ (también se puede calcular con el método de pesado hidrostático).
- Colocar las probetas en un tanque lleno de agua de fondo plano, en forma vertical apoyadas sobre un corte longitudinal, durante 24 horas. Las probetas deben estar cubiertas por al menos 2cm de agua.
- Retirar las probetas del tanque, secarlas con un paño húmedo para eliminar el agua superficial y pesarlas. Luego llevar las probetas a un horno ventilado de secado, hasta que alcancen masa constante.

Tabla 3.2.6. Fórmulas para el cálculo del % de absorción y la densidad seca [15].

<i>Absorción de agua por inmersión después de 24 horas (porcentaje de masa)</i>	$\gamma \approx \frac{m_w - m_d}{m_d} * 100$	<i>m_d</i> : Masa de la probeta tras el secado, masa seca en gramos.
<i>Densidad seca (kg/m³)</i>	$\rho_d \approx \frac{m_d * 10^3}{V * 10^6}$	<i>m_w</i> : Masa de la probeta después de una inmersión de 24 horas, masa húmeda en gramos. <i>V</i> : Volumen de la probeta en cm ³ .

3.2.11. Ciclos de humectación - secado

Las probetas de GRC fueron sometidas a dos procesos de curado, el primero durante 28 días a 20°C para las probetas control y con sustitución puzolánica; el segundo, sólo para un grupo de probetas con sustitución puzolánica, se curaron durante 7 días a 20°C y luego 21 días sumergidas en agua a 55°C, para acelerar la reacción puzolánica y el desarrollo

de sus resistencias. Luego los especímenes envejecidos y sin envejecer, fueron sometidas a ciclos de humectación y secado de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-ENV 1170-8:1997 [16]. Las probetas fueron sumergidas durante 24 horas, bien en agua o bien en una disolución con un 3.5% de NaCl. Posteriormente se secaron en un horno ventilado a una temperatura de 60°C durante 23 horas. Luego se retiraron del horno y se dejaron enfriar durante una hora. Este ciclo se repitió 10, 25 y 50 veces, tanto para las probetas saturadas con agua como para las saturadas con la disolución de NaCl, realizando un registro visual y registrando la masa de cada probeta al final de cada ciclo. Finalmente se evaluó la resistencia a flexión para cada una de las series.

3.2.12. Ciclos de hielo – deshielo

Las probetas de GRC envejecidas y sin envejecer mediante los procesos citados en el apartado anterior, fueron sometidas a ciclos de congelación y descongelación de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C 1185-03 apartado 12 “Freeze-Thaw-Cladding Products” [17]. Las probetas fueron introducidas en una cámara frigorífica para ser primero enfriadas y posteriormente congeladas a una temperatura de -20°C durante 2 horas, luego se retiraron de la cámara frigorífica para realizar el proceso de descongelación a una temperatura de 20°C durante dos horas sumergidas en agua. Este ciclo se repitió 50 y 100 veces, realizando un registro visual y registrando la masa de cada probeta al final de cada ciclo. Finalmente se evaluó la resistencia a flexión para cada una de las series.

3.2.13. Exposición ante agentes agresivos

Posterior a los procesos de curado y envejecimiento de las probetas de GRC, éstas fueron sumergidas en diferentes disoluciones agresivas: cloruro amónico 1M, sulfato sódico al 10% y ácido sulfúrico 0.5M. Se realiza un registro visual y se registra la evolución en el tiempo de la masa de cada probeta, controlando periódicamente la evolución del pH de cada disolución, el cual varía constantemente como efecto de la interacción entre las disoluciones y las probetas; se busca con este método el determinar un rango de pH de cada disolución que permita mantener de forma aproximada un medio agresivo constante. De esta forma, cuando el pH se incrementa y sobrepasa el límite dispuesto, es necesario sustituir la disolución.

3.3. Fases de estudio

El estudio del comportamiento mecánico (resistencia a flexión, compresión e impacto), químico (nivel de formación de productos de hidratación y su naturaleza) y la durabilidad de morteros de GRC fabricados con cemento Pórtland sustituido por puzolanas en diferentes porcentajes y fibras álcali-resistentes, se desarrolla a través de cinco fases que se describen a continuación. (tabla 3.3.1)

En la primera fase de aproximación, se desarrolla el conocimiento general de los morteros de GRC premezclado con probetas de 4x4x16cm con fibras no dispersables de 12mm y su respuesta ante procesos de envejecimiento acelerado; además, se incluye la modificación de las dosificaciones con la integración de los diferentes materiales puzolánicos (ceniza volante molida y sin moler, catalizador de craqueo usado y las mezclas entre ellos). Adicionalmente, se realiza el estudio del comportamiento mecánico de los diferentes morteros y la evolución de la matriz cementante.

En la segunda fase se continúa con el conocimiento de los composites de GRC premezclado de formato 1x5x22,5cm con mezcla de fibras de diferentes características bajo condiciones de curado normales, fibras álcali resistentes (AR) de 6, 12 y 24 mm dispersables (D) y no dispersables (ND); se seleccionaron los prototipos con mejor comportamiento mecánico adicionados con ceniza volante molida (CVm) y su respuesta a procesos de envejecimiento acelerado, se abordó el estudio de propiedades mecánicas y la evolución de la matriz cementante.

En la tercera fase, se profundiza en el conocimiento de los composites de GRC premezclado de formato 1x5x22,5cm con fibras álcali resistentes no dispersables de 12mm; se abordó a fondo el estudio del papel de las puzolanas en probetas de GRC premezclado, con combinación de los diferentes materiales puzolánicos (ceniza volante molida - CVm y su mezcla con humo de sílice sonicado – HSS), se estudió la respuesta de los diferentes prototipos al proceso de envejecimiento acelerado, se abordó el estudio de propiedades mecánicas y la evolución de la matriz cementante.

En la cuarta fase se observa el comportamiento de los elementos constitutivos GRC premezclado de formato 1x5x22,5cm con fibras álcali resistentes no dispersables de 12mm, en condiciones normales de curado y luego de ser envejecidos, al ser sometidos a diferentes acciones físicas y químicas, para evaluar su durabilidad. Se realizaron procesos de humectación–secado, hielo-deshielo y exposición ante agentes químicos agresivos, sobre los especímenes; también se analiza la respuesta de las fibras álcali-resistentes después de ser sometidas a diferentes agentes agresivos.

En la quinta fase se estudian los composites de GRC GRC proyectado de 1,2x10x30cm con hilos cortados de 30 mm de fibras álcali resistentes no dispersables y diferentes puzolanas (ceniza volante CV molida y sin moler y catalizador de craqueo catalítico FCC); se estudió la respuesta de los diferentes prototipos al proceso de envejecimiento acelerado.

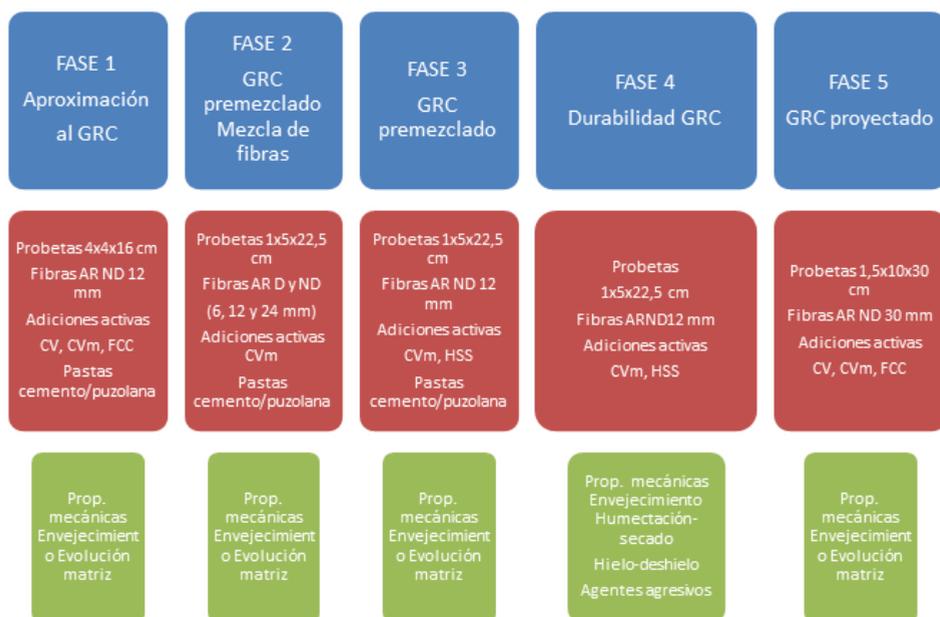


Figura 3.3.1. Fases de estudio proyecto.

3.4. Bibliografía

1. Melment L240. Aditivo superplastificante, reductor de agua de alta actividad para hormigón. [http://www.bettor-mbt.es/\(07/05/2007\)](http://www.bettor-mbt.es/(07/05/2007)).
2. Norma UNE-EN 1170-5: 1998. Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de la resistencia a flexión, método denominada ensayo completo a flexión.
3. Norma UNE-EN 196-1: 1996. Métodos de ensayos de cementos.
4. Cem-FIL reinforcement. Catálogo de fibras AR. Saint-Gobain. España, Vetrotex S.A, 2000.
5. Norma UNE-EN 1170-1: 1998. Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de la consistencia de la matriz, método denominado por exposición.
6. D.A. Skoog, J.J. Leary. Análisis instrumental. España: McGraw-Hill, 4ª edición, 1994.
7. D. Martínez Velandia. Caracterización y reactividad de materiales puzolánicos: el humo de sílice y su estado de densificación. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia. 2006.
8. X. Pu. Investigation on pozzolanic effect of mineral additives in cement and concrete by specific strength index. Cement and Concrete Research. 1999, 29: 951-955.

9. Norma UNE-EN 180:2007. Plásticos, determinación de la resistencia al impacto Izod (ISO 180:2000).
10. G. Ramakrishna, T. Sundararajan. Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study. *Cement and Concrete Composites*. 2005, 27: 547–543.
11. K.L. Litherland, D.R. Oakley, B.A. Proctor. The use of accelerated ageing procedures to predict the long-term strength of GRC composites. *Cement and Concrete Research*. 1981, 11: 455–466.
12. P.M. Ayadi, A. Iratni. Silica fume treatment for improving durability of alkali resistant glass fibres in cement matrixes. *Solid State Phenomena*. 2003, 90-91: 209-214.
13. A.H.H. Waeslisch, H. Moertel, V. Rudert. Optimisation and glass fibre reinforcement of mortars with very fine fillers. En: *Composites Materials in Concrete Construction. Proceedings of the International Seminar Held at the University of Dundee; Dundee, Escocia*. 2002, 324-331
14. P. Purnell, N.R. Short, C.L. Page. A static fatigue model for the durability of glass fibre reinforced cement. *Journal of Materials Science*. 2001; 36: 5385-5390.
15. Norma UNE-EN 1170-6:1998. Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Determinación de la absorción de agua por inmersión y determinación de la densidad seca.
16. Norma UNE-ENV 1170-8:1998. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Ensayo de tipo de envejecimiento a la intemperie cíclico.
17. Norma ASTM C1185-03. Standard Test Methods for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber-Cement Flat Sheet, Roofing and Siding Shingles, and Clapboards.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este apartado tiene como objetivo estudiar la influencia de las diferentes adiciones activas en morteros de cemento Pórtland reforzados con fibras de vidrio, observando el comportamiento de los elementos constitutivos del material en condiciones normales de curado y al ser sometidos a procesos de envejecimiento controlado y diferentes medios agresivos, evaluando la durabilidad y la mejora de los compuestos por medio de la determinación de sus propiedades mecánicas, químicas y físicas. El estudio del comportamiento mecánico de los diferentes morteros, su respuesta a los diferentes procesos, la modificación de la interfase entre la fibra AR y el matriz cementante, así como su evolución y la evaluación de pastas equivalentes de cemento - puzolana, son los criterios de estudio más importantes tenidos en cuenta durante la investigación.

4.1. Caracterización físico - química

Para conocer la naturaleza de los diferentes materiales puzolánicos utilizados, se emplearon las técnicas de difracción de rayos X, granulometría por difracción láser, microscopía electrónica, microscopía óptica y análisis térmico; se analizan las propiedades físicas y químicas de las puzolanas (CV, FCC y HS), de las fibras y la influencia que puedan generar sobre las propiedades de los morteros.

4.1.1. Materiales puzolánicos

4.1.1.1. Composición química

En la tabla 4.1.1, se observa la composición química de los materiales puzolánicos utilizados para la preparación de los morteros. Se aprecia como el FCC presenta valores por encima del 40% tanto de SiO₂ como de Al₂O₃, los demás componentes se encuentran de forma minoritaria (<1% en peso). La CV es de la clase F, las llamadas silicoaluminosas, sus principales características son el poseer un bajo contenido en calcio [1,2], en este caso 9,83% de CaO, y contenidos importantes de óxidos de silicio, aluminio y hierro, en este caso presenta un 40.94% de SiO₂, 24,65% de Al₂O₃ y 13.59% de Fe₂O₃. Finalmente, el HS presenta el mayor porcentaje de dióxido de silicio de las puzolanas utilizadas, con un 90,77%, y un aporte del 4,53% de Fe₂O₃.

Tabla 4.1.1 Composición química de los materiales puzolánicos (%), pérdida al fuego (*).

PUZOLANA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	*PF
FCC	48,2	46,0	0,95	<0,01	<0,01	n.d	<0,01	0,50	1,50
CV	40,94	24,65	13,59	9,83	1,59	1,60	1,40	0,34	2,44
HS	90,77	0,46	4,53	0,78	0,23	0,02.	0,37	0,21	3,43

El estudio de análisis térmico de las puzolanas utilizadas se indica en las figuras 4.1.1 y 4.1.2, correspondientes a las curvas TG, DTG y SDTA, con una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Para un rango de 35 a 1000°C en una atmósfera de aire con un flujo de 75 ml/min.; el comportamiento de las puzolanas al ser sometidas a un proceso de calentamiento es estable, no se presentan grandes pérdidas masa. Para el caso de la CV, se presenta una descomposición sobre los 700°C correspondiente a la pérdida de CO₂ de los carbonatos presentes en la ceniza, además la curva de SDTA indica una pérdida por oxidación de carbón (evento exotérmico cercano a los 700°C en atmósfera de aire). La pérdida presente en el análisis del HS, alrededor de los 600°C corresponde al carbón, hecho confirmado por el fenómeno exotérmico presente en la curva SDTA alrededor de los 600°C (oxidación de carbón). Para el caso del FCC solo se observa una pérdida al inicio del calentamiento hasta los 200°C, correspondiente a la humedad presente en la muestra y a los grupos OH residuales de los silicoaluminatos.

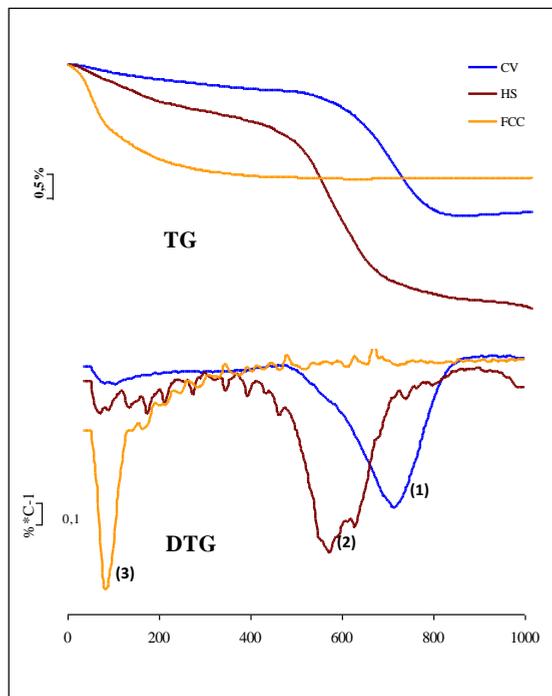


Figura 4.1.1. Curvas TG y DTG de las puzolanas utilizadas. (1) Pérdida de CO₂ carbonatos CV; (2) pérdida de carbón HS; (3) pérdida grupos OH residuales silicoaluminatos.

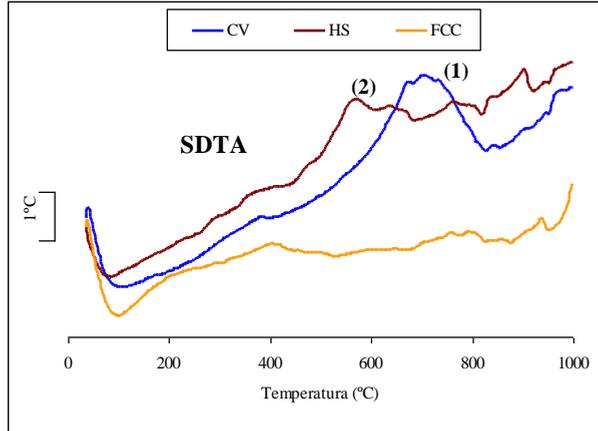


Figura 4.1.2. Curvas SDTA de las puzolanas utilizadas. (1) Pérdida por oxidación de carbón en CV; (2) pérdida por oxidación de carbón en HS.

4.1.1.2. Composición mineralógica

Para observar la composición mineralógica presente en las puzolanas utilizadas, éstas se sometieron al análisis por DRX. Para la CV (figura 4.1.3), se observa el comportamiento de un material de naturaleza amorfa, característica importante para la reactividad de la puzolana, es por esto por lo que se presenta en el difractograma una banda ancha con la presencia de algunos picos, de poca intensidad, característicos de la ceniza [1]: mullita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), hematites (Fe_2O_3), cuarzo (SiO_2), calcita ($CaCO_3$) y magnetita (Fe_3O_4).

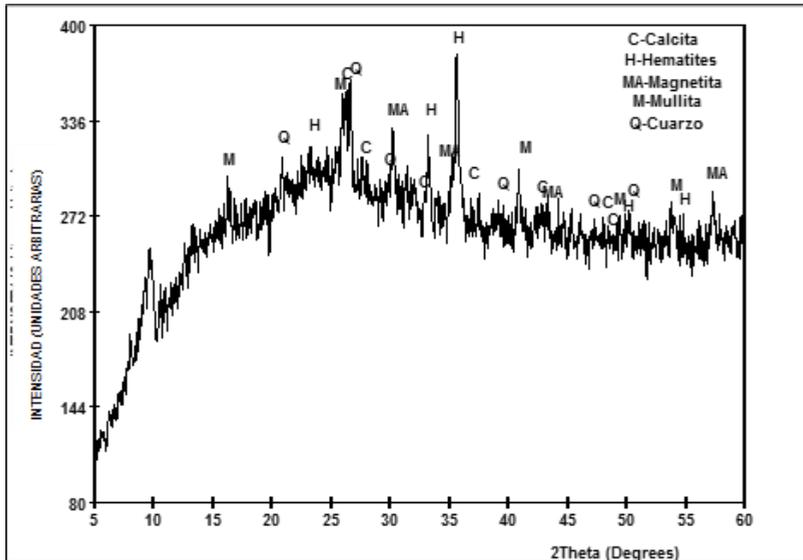


Figura 4.1.3. Difractograma de rayos X de la CV.

En el caso del FCC (figura 4.1.4), según los investigadores se trata de un material altamente reactivo con gran actividad puzolánica [3], además se confirma su naturaleza amorfa con el resultado de la difracción de rayos X: observamos una banda ancha característica de estos materiales amorfos y con picos representativos de zeolita activa tipo faujasita ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$). Si observamos el difractograma para el humo de sílice densificado (figura 4.1.5), se encuentran picos característicos de baja intensidad, como el cuarzo, la tridimita y la cristobalita; además se aprecia como la línea base presenta una desviación notoria, característica fundamental de materiales amorfos [3].

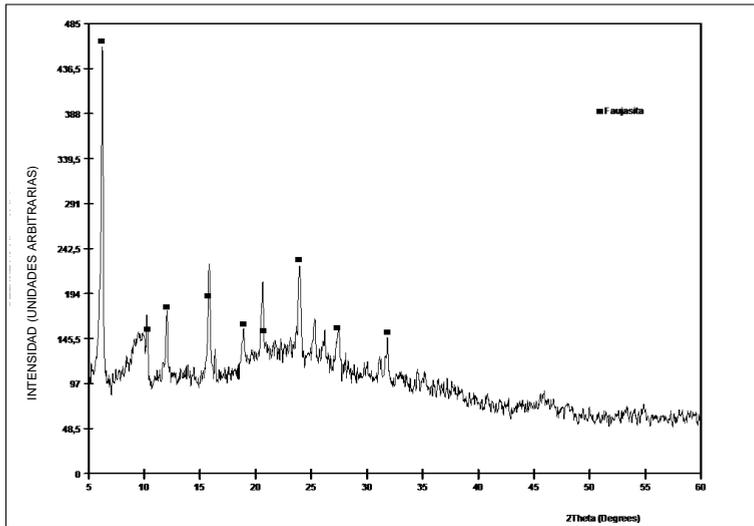


Figura 4.1.4. Difractograma de rayos X del FCC.

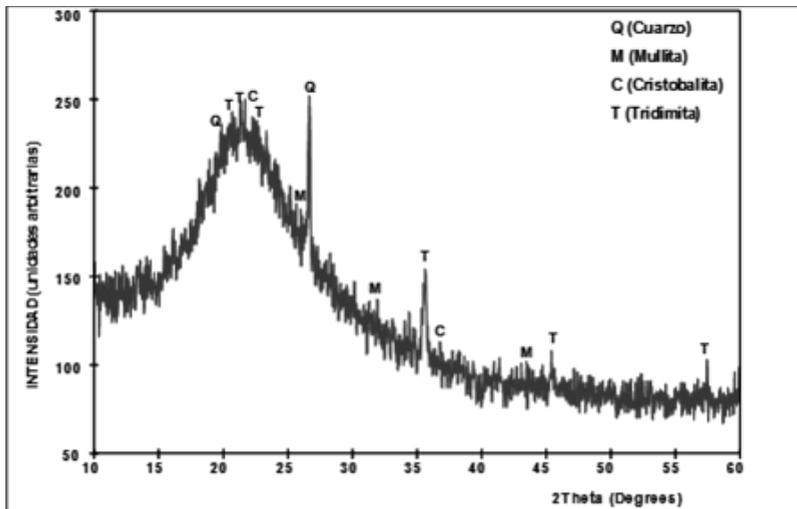


Figura 4.1.5. Difractograma de rayos X del HS.

4.1.1.3. Granulometría

Se estudiaron mediante la técnica de granulometría por difracción láser, la CV en su estado original y sometida a procesos de molienda, el FCC molido y el HS densificado (HSD) y luego de ser sometido al proceso de sonicación (HSS). En la tabla 4.1.2 y en la figura 4.1.6 se aprecian el diámetro medio y los deciles obtenidos para cada puzolana; $d(0,1)$, $d(0,5)$ y $d(0,9)$ representan que el 10%, 50% y 90% del volumen total de las partículas respectivamente son inferiores o iguales a un tamaño específico en μm . Se observa que las partículas de CV molidas durante 20 y 40 minutos disminuyen su diámetro medio en un 60% y 70% respectivamente, si se comparan con el diámetro de la CV original. De forma similar, el diámetro medio de HSD sometido al proceso de sonicación durante 10 minutos, disminuye hasta en un 70% aproximadamente; de esta forma se confirma el efecto buscado con los procesos de molienda de la CV [4], del FCC y el proceso de sonicación del HSD [5], lo cual permite obtener partículas con una superficie específica mayor.

Tabla 4.1.2. Parámetros granulométricos de muestras estudiadas.

Puzolana	Diámetro medio	d (0,1) μm	d (0,5) μm	d (0,9) μm
FCC	27,0	1,92	19,27	64,23
CV	29,92	2,30	18,55	74,32
CVm20min	12,85	1,63	9,35	28,8
CVm40min	10,38	1,46	8,19	22,25
HSD	76,67	7,95	34,82	199,55
HSS	23,47	2,45	18,36	52,57

Si se analiza la figura 4.1.6, se observa claramente la distribución de los tamaños de partícula de acuerdo con los deciles para las puzolanas utilizadas. Se aprecia como el HSD presenta las partículas de mayor tamaño y la CV molida 40 minutos presenta las de menor tamaño.

Si evaluamos el $d(0,5)$ se conforman tres grupos básicos: el primero corresponde al HSD, con valores de $34,82\mu\text{m}$; el segundo grupo lo conforman el FCC, la CV y el HSS, con $d(0,5)$ de 19,27, 18,55 y $18,36\mu\text{m}$ respectivamente; y el tercero lo conforman la CV molida durante 20 y 40 minutos, con $d(0,5)$ de 9,35 y $8,19\mu\text{m}$, respectivamente. Los valores obtenidos para $d(0,5)$, representan el tamaño máximo para un rango que comprende el 50% en volumen de las partículas de la muestra, en este caso la tendencia es similar, aunque ligeramente menor a la del diámetro medio. En general, se obtienen valores menores a las $20\mu\text{m}$ para el 50% de volumen de la muestra, exceptuando el HSD.

Si evaluamos el $d(0,9)$ la tendencia es similar, se distinguen tres grupos conformados primero por el HSD con las partículas más grandes, seguido por el FCC, la CV y el HSS, con $d(0,9)$ de 64,23, 74,32 y 52,57 μm respectivamente; el tercero corresponde a la CV molida con valores menores a 30 μm , siendo la CVm 40 minutos la que presenta tamaños menores (22,25 μm).

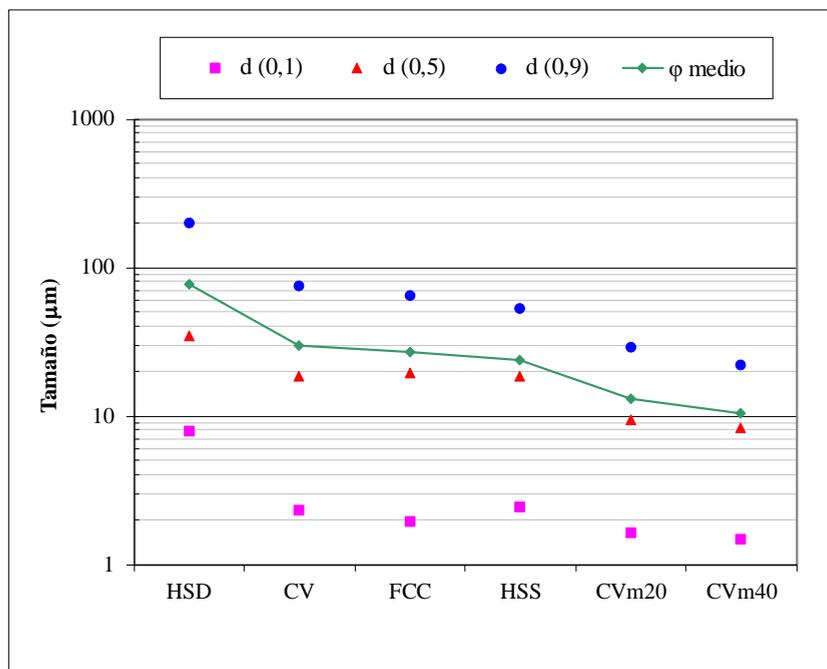


Figura 4.1.6. Diámetro medio y distribución de tamaños de partícula de acuerdo con deciles.

4.1.1.4. Morfología

Se estudiaron las diferentes morfologías y texturas de las puzolanas utilizadas, la CV molida y sin moler, el FCC molido y el HS sonicado y sin sonicar. En la figura 4.1.7a se muestra micrografías de las partículas de FCC sin moler, con una morfología variada, de forma esférica e irregular, de superficie porosa. En la figura 4.1.7b el FCC se encuentra ya molido, se observan fragmentos de partículas molidas de diferentes tamaños. En la figura 4.1.7c se muestra la CV original, se aprecian partículas de textura lisa y rugosa con cierta apariencia porosa, aunque en menor grado que el FCC, esféricas y de diferentes tamaños; al ser molidas durante 20 minutos (figura 4.1.7d), se observan fragmentos de diferentes tamaños y algunas partículas que conservan su estado original (partículas esféricas). En las figuras 4.1.7e y 4.1.7f, se aprecian las partículas de humo de sílice agrupadas, muy pequeñas, esféricas y de diversos tamaños; este material se conoce comercialmente como humo de sílice densificado.

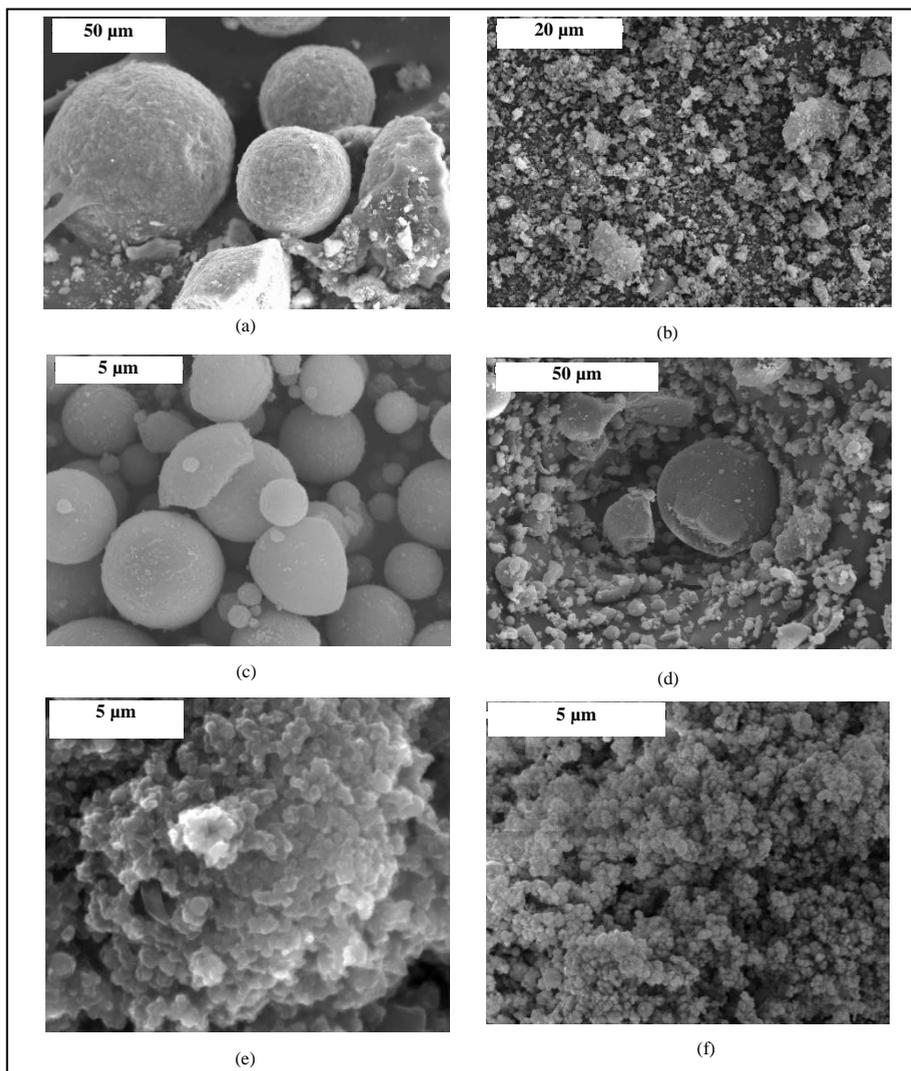


Figura 4.1.7. Micrografías obtenidas por SEM: (a) catalizador sin moler, (b) catalizador molido 20 min, (c) ceniza volante sin moler, (d) ceniza volante molido, (e – f) humo de sílice densificado.

Si evaluamos la mezcla de las puzolanas, específicamente el caso de la mezcla 10%FCC-50%CV, en las figuras 4.1.8a y 4.1.8b se observan muestras de la mezcla de CV molido y sin moler respectivamente con FCC molido. Se aprecian cenizas que no han sufrido alteración, fragmentos de cenizas y catalizador molidos de diferentes tamaños, con partículas trituradas adheridas a su superficie o entre las cenizas más pequeñas. En la figura 4.1.8c se muestra una partícula de catalizador molido, que en su interior alberga gran cantidad de CV en su estado original de tamaños muy pequeños; en la figura 4.1.8d

se aprecian partículas de catalizador y cenizas, que sobre sus superficies albergan partículas más pequeñas de material molido.

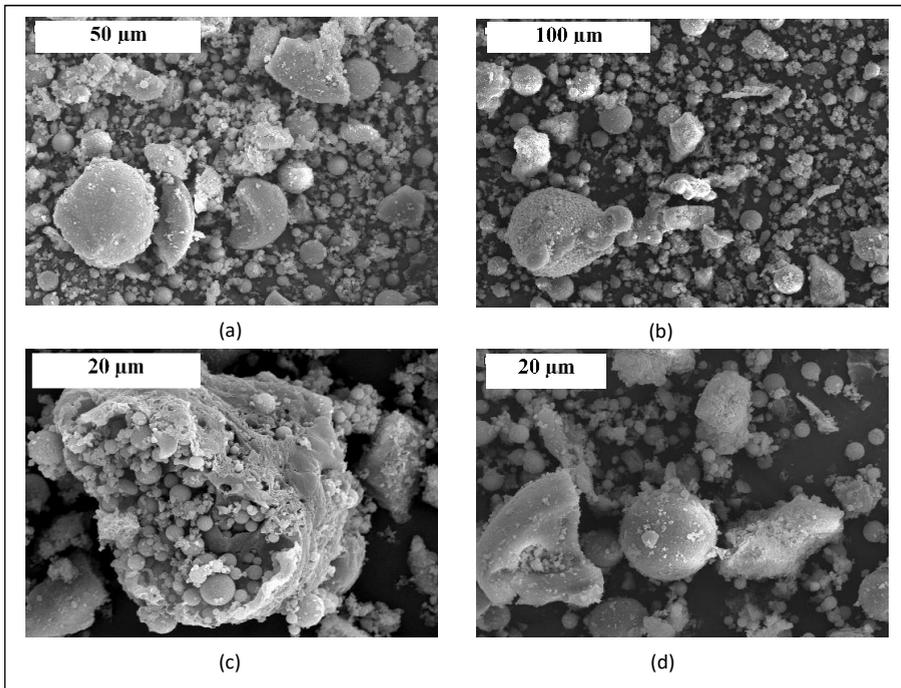


Figura 4.1.8. Micrografías de mezclas FCC-CV. (a) CV sin moler con FCC molido; (b, c y d) CV molida con FCC molido.

En general se observa que las partículas de las puzolanas presentes en menor cantidad, pueden ser cubiertas por partículas pequeñas de la misma puzolana o de otra puzolana, para el caso de las mezclas, esta condición variará de acuerdo con la proporción de la mezcla; cuando se tienen porcentajes altos de sustitución por CV, las partículas de catalizador y humo de sílice siempre estarán rodeadas de cenizas de diferentes formas y tamaños que pueden modificar su interacción con el cemento hidratado retardando su actividad puzolánica, además, debido al alto porcentaje de sustitución la cantidad de cemento es menor disminuyendo la portlandita disponible.

4.1.2. Fibra de vidrio álcali resistente

4.1.2.1. Composición química

La principal característica de la fibra de vidrio AR es su condición de álcali resistentes, cualidad generada por el óxido de zirconio presente en su estructura, en porcentajes que varían entre el 15 y 20% (tabla 4.1.3). En la figura 4.1.9 se aprecia el mapa generado con

la técnica SEM que permite realizar el microanálisis de un filamento de una fibra AR; se observa claramente la presencia de los componentes mayoritarios de la fibra: silicio, zirconio y sodio. Las micrográficas demuestran además como el silicio es el de mayor intensidad, seguido por el zirconio y el sodio, coincidiendo con los porcentajes expuestos en la composición química [6].

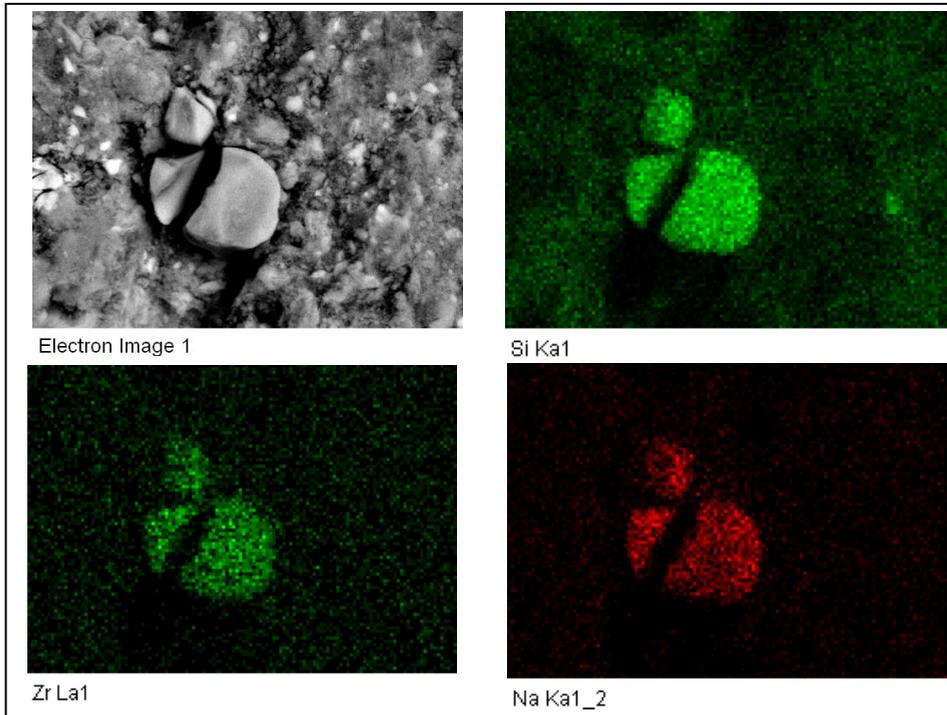


Figura 4.1.9. Micrografía de filamento de fibra AR en matriz de cemento y mapas de distribución de elementos químicos: silicio, zirconio y sodio.

Tabla 4.1.3. Composición química fibras AR (%). *Óxidos alcalinos, **Óxidos alcalinotérreos

SiO ₂	ZrO ₂	*(Na ₂ O, K ₂ O)	***(CaO, MgO)	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	F ₂
55-75	15-20	11-21	0-6	0-2	0-5	0-3	0-2

4.1.2.2. Morfología

La fibra AR está compuesta aproximadamente por 200 filamentos, cada uno con un diámetro que varía entre 14 y 20 μm (figura 4.1.10a), recubiertos por un ensimaje (figura 4.1.10b) de un compuesto orgánico que permite la formación de un haz de filamentos (fibra) y que brinda cualidades para resistir temporalmente la abrasión presente en el proceso de mezclado, evitando la dispersión del haz [6].

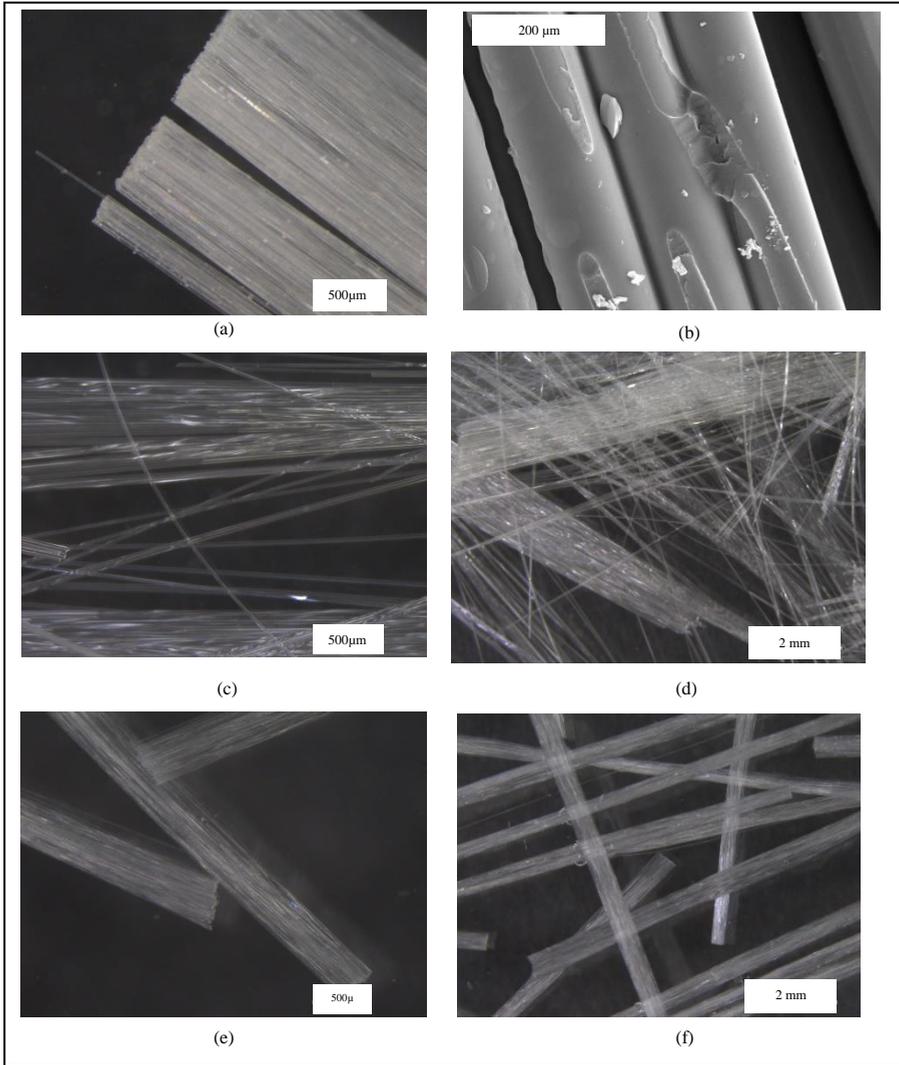


Figura 4.1.10. (a) filamentos fibra AR, (b) capa de ensimaje sobre fibras, (c, d) fibras dispersables AR-D, (e, f) fibras no dispersables AR-ND.

Caso contrario es el de las fibras AR dispersables, las cuales al entrar en contacto con el agua se dispersan rápidamente (figura 4.1.10 c y d), liberando los filamentos que la conforman, éstos se deterioran más fácil y rápidamente que el conjunto de filamentos unidos que conforman la fibra AR no dispersable (figura 4.1.10 e y f).

4.1.2.3. *Estado de la fibra después del proceso de amasado*

Se analizó el efecto generado sobre la fibra su interacción con el mortero, durante el tiempo de amasado determinado para la fabricación del GRC premezclado (30 segundos para adicionar la fibra y 45 segundos adicionales de amasado a velocidad lenta). Se observó si la fibra conservaba las características iniciales o si se había generado alguna modificación. El fabricante recomienda no exceder el tiempo de amasado del mortero con la fibra (minuto y medio), ya que puede influir en la integridad de las fibras, dando lugar a la separación de los filamentos de éstas afectando su comportamiento mecánico [7].

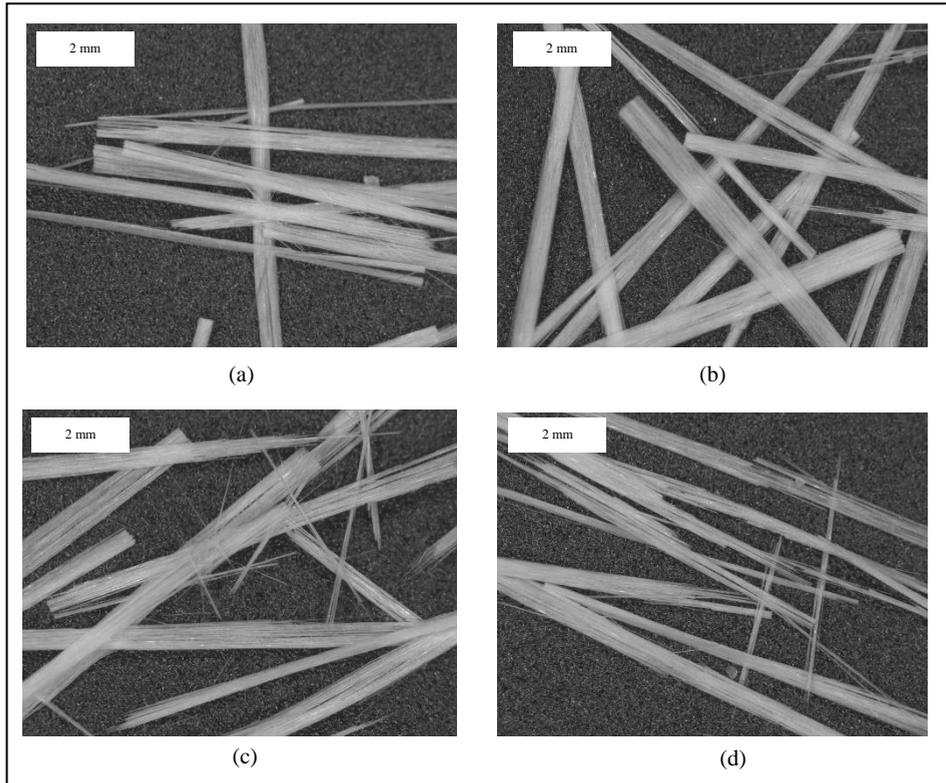


Figura 4.1.11. Fibras AR-ND después del proceso de amasado con árido (PA: 2 minutos 45 segundos). (a) PA+0, (b) PA+0.5min., (c) PA+1min., (d) PA+2min.

Se aprecia, en la figura 4.1.11, las fibras después de ser mezcladas con el árido utilizado para los morteros, como prueba para observar el grado de deterioro que se puede generar con el tiempo de amasado. Para el tiempo estándar de amasado, 2 minutos 45 segundos, no se observan alteraciones importantes en las fibras (figura 4.1.11a). Sin embargo, a medida que el tiempo de amasado se incrementa, se aprecia un proceso de separación y rotura de filamentos; después del medio minuto adicional (figura 4.1.11b), algunas fibras aumentan su grosor, indicio del inicio de separación de los filamentos. Al minuto

adicional de amasado se observan algunos filamentos desprendidos y el deterioro en los extremos de las fibras (figura 4.1.11c); finalmente, después de los dos minutos (figura 4.1.11d), se aprecia claramente el deterioro evidente de la estructura original de las fibras, las cuales reducen su sección, pierden filamentos y sufren cortes importantes.

4.1.3. Conclusiones

- La técnica de difracción de rayos X nos permite comprobar que el HS, CV y el FCC son materiales con grado importante de amorficidad, característica que favorece la reacción puzolánica.
- Al evaluar el estudio granulométrico se comprueba la efectividad tanto del proceso de molienda como el proceso de sonicación, para CV y humo de sílice respectivamente: han disminuido el tamaño de partícula incrementando la superficie específica, características que generan mejoras importantes en los morteros.
- Las pruebas de termogravimetría permiten establecer que las puzolanas estudiadas son materiales estables frente al aumento de la temperatura. Se presentan pequeñas pérdidas, para el caso del FCC debido a la humedad presente en la muestra; para la CV y el HS pérdidas entre los 600 y 700°C, correspondientes fundamentalmente a oxidaciones de carbón.
- Las micrografías de los materiales puzolánicos confirman el estado original de las puzolanas: partículas de diferentes tamaños y de formas esféricas, con un grado importante de porosidad, en especial el FCC. Después del proceso de molienda del FCC y la CV, se aprecian partículas de diversos tamaños y formas, en algunos casos conservan su estado original.
- Se aprecia como las partículas de humo de sílice densificado están conformadas por una aglomeración de partículas esféricas y de diversos tamaños, las cuales son parcialmente dispersas por el proceso de sonicación, de acuerdo con la granulometría realizada.
- El mapa realizado a un filamento de una fibra de vidrio AR, permite observar claramente la presencia de los componentes mayoritarios de la fibra de vidrio AR: silicio, sodio y zirconio, este último responsable de la condición de álcali resistencia de las fibras.
- Se ha demostrado que el proceso de amasado prolongado genera una gran cantidad de defectos en las fibras: separación de filamentos y roturas.

4.1.4. Bibliografía

1. Catálogo de residuos utilizables en la construcción. Ministerio de medio ambiente, Centro de estudios y experimentación de obras públicas, 2002, 81-101.

2. Norma UNE-EN 450:1995. “Cenizas volantes para hormigón. Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad”.
3. F. Amahjour. Estudio de la reactividad de las puzolanas artificiales: cenizas volantes y humo de sílice y su reutilización en ingeniería civil. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia. 2000.
4. J. Payá, J. Monzó, M.V. Borrachero, E. Peris-Mora, E. González-López. Modificación de las características de las cenizas volantes para mejorar las propiedades del hormigón. En: Congreso de materiales compuestos MATCOMP95, Sevilla, España. 1995, 565-570.
5. D. Martínez Velandia. Caracterización y reactividad de materiales puzolánicos: el humo de sílice y su estado de densificación. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia. 2006.
6. Cem-FIL reinforcement. Catálogo de fibras AR. Saint-Gobain, Vetrotex S.A., 2000.
7. C. León. “Efecto de la incorporación del residuo de catalizador FCC sobre el comportamiento de morteros de cemento reforzados con fibras AR. Diploma de estudios avanzados Universidad Politécnica de Valencia. 2005.

4.2. Conocimiento del GRC y adiciones activas. estudios preliminares sobre probetas 4x4x16cm

En este apartado se exponen los estudios preliminares sobre probetas 4x4x16cm de morteros de GRC, evaluando el comportamiento mecánico y el nivel de formación de productos de hidratación y su naturaleza de morteros con fibras AR fabricados con cemento Pórtland sustituido por CV en diferentes porcentajes y fibras álcali-resistentes (fibras AR) de 12mm de longitud. Se observan, como referencia para el estudio, morteros fabricados de sustitución con otra puzolana (FCC). Se realizó el proceso de envejecimiento sobre pastas sin fibras con igual relación agua/material cementante y los mismos porcentajes de sustitución, estudiándose la evolución de la reacción puzolánica e identificando los productos hidratados.

4.2.1. Propiedades mecánicas y comportamiento al envejecimiento

Se estudiaron probetas 4x4x16cm con el propósito de evaluar la evolución del comportamiento mecánico y las prestaciones de durabilidad al someter los morteros a un proceso de envejecimiento acelerado. Las características de los morteros estudiados son las siguientes:

- Cemento Pórtland tipo CEM I 52,5R. Para disminuir su estándar de resistencia a 42,5R, se adiciona un 25% en peso de filler calizo.
- Catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) y ceniza volante tipo F (CV) molida durante 20 minutos (CVm20min) y 40 minutos(CVm40min).
- Árido silíceo AFA80, con un módulo de finura de 3.1.
- Fibras de vidrio Cem–FIL AR de 12mm de longitud no dispersables. Contenido de fibra del 3% respecto al peso total del mortero.
- Superplastificante Melment L240.
- Relación agua/material cementante de 0,35, constante para todos los morteros, considerando el material cementante como suma de cemento más puzolana.
- Relación árido/material cementante de 0,67, constante para todos los morteros.

El curado de los morteros se realizó en cámara húmeda, durante 28 días sumergidos en agua; posteriormente fueron sometidos a un proceso de envejecimiento acelerado en agua termostaticada a una temperatura de 55°C, durante 7, 14, 21 y 28 días. Para el estudio de las propiedades mecánicas se incluyen en este estudio el modelo de análisis planteado por Xincheng Pu [9]. El autor plantea el análisis del comportamiento mecánico de morteros con diferentes adiciones mediante el uso de índices específicos de resistencia (ver figura 3.9 en apartado 3.2.8.2), con su aplicación se puede determinar el efecto puzolánico y el grado de ganancia de resistencia de los morteros; además, permiten diferenciar el aporte

a la resistencia por el efecto puzolánico y por la hidratación del cemento. En la tabla 4.2.1 se detalla la dosificación empleada en la fabricación de los morteros de GRC.

Tabla 4.2.1. Dosificación morteros de GRC fabricados (valores en gr).

Porcentaje de sustitución	Cemento CEM I 52.5R	Filler calizo	Sustitución puzolánica	Árido síliceo AFA80	Fibra AR ND 12 mm	Aditivo Melment L240	Agua de amasado
0%	769,1	256,4	0	683,7	62	20,5	354
25% CV	576,9	192,3	256,4	683,7	62	12,3	346,6
25% CVm20min	576,9	192,3	256,4	683,7	62	10,3	347,8
25% CVm40min	576,9	192,3	256,4	683,7	62	10,3	347,8
50% CV	384,6	128,2	512,8	683,7	62	5,1	350,9
50% CVm20min	384,6	128,2	512,8	683,7	62	5,1	350,9
50% CVm40min	384,6	128,2	512,8	683,7	62	5,1	350,9
10%FCC-25% CV	499,9	116,6	102,6 - 256,4	683,7	62	25,6	338,6
10%FCC-25% CVm20min	499,9	116,6	102,6 - 256,4	683,7	62	25,6	338,6
10%FCC-25% CVm40min	499,9	116,6	102,6 - 256,4	683,7	62	25,6	338,6
10%FCC-50% CV	307,7	102,6	102,6 - 512,8	683,7	62	10,3	347,8
10%FCC-50% CVm20min	307,7	102,6	102,6 - 512,8	683,7	62	10,3	347,8
10%FCC-50% CVm40min	307,7	102,6	102,6 - 512,8	683,7	62	10,3	347,8

4.2.1.1. Morteros con sustitución por CV

Las cenizas volantes generan efectos variados sobre los morteros, dependiendo de la forma, tamaño de las partículas y del porcentaje de sustitución; estos efectos pueden representar mejoras sobre los procesos de mezclado, puesta en obra, prestaciones mecánicas y durabilidad. A continuación, se estudian diferentes tipos de sustitución de cemento por CV en morteros que incluyen fibras AR como refuerzo, variando tanto la finura como la cantidad de la adición.

En la tabla 4.2.2 se aprecian valores de resistencias a flexión, para morteros con un 25% de sustitución por CV. Observamos que a 0 días de envejecimiento (28 días de curado), la resistencia a flexión del mortero con un 25%CV sin moler es prácticamente igual a la del control; pero se obtiene un incremento en la resistencia a flexión después de finalizar el curado en cámara húmeda, cuando la CV se somete al proceso de molienda durante 20 minutos (CVm20min), y es mayor, incluso, para un tiempo de molienda de 40 minutos (CVm40min). Es importante anotar que se obtienen resistencias iguales o mayores al control con una reducción importante del contenido de cemento. La resistencia del composite control (0% de sustitución) es muy elevada al finalizar el proceso de curado (28 días), con un valor de 16,9 MPa; sin embargo, a los 7 días de envejecimiento, el valor

cae drásticamente por debajo de los 12 MPa (valor habitual en morteros sin fibra con baja relación agua/cemento), lo que sugiere que la fibra se ha corroído y que su efecto mecánico es despreciable. Eso no ocurre con los composites con ceniza volante, para los que el valor de resistencia después de los 28 días de envejecimiento se encuentra en el intervalo 16-22 MPa.

Al iniciar el proceso de envejecimiento, el mortero con CV mantiene la resistencia incluso hasta los 28 días: ello se atribuye a que la reacción puzolánica a los 28 días de curado estaba parcialmente desarrollada y el tratamiento a 55°C ha promovido la continuación de ese proceso puzolánico. Para ambas CVm, las resistencias disminuyen al inicio del envejecimiento, pero se sostienen en el tiempo con valores iguales (molidas 20 minutos) o superiores (molidas 40 minutos) a los de morteros con CV sin moler: en estos casos, parece que la reacción puzolánica durante el curado (28 días) ha avanzado notablemente y se parte, antes del envejecimiento, de una matriz cementante más desarrollada.

Tabla 4.2.2. Resistencias a flexión (MPa) de morteros con 25% de sustitución por CV. (σ = desviación estándar; GG = ganancia de resistencia).

SUSTITUCIÓN CEMENTO POR PUZOLANA	días a 55°C	FLEXIÓN		
		Rf (MPa)	σ	GG
0%	0	16,9	1,9	1,0
	7	11,8	0,6	1,0
	14	12,9	1,3	1,0
	21	11,2	3,5	1,0
	28	11,4	0,3	1,0
25%CV	0	15,8	1,3	1,25
	7	16,4	3,1	1,85
	14	16,8	1,8	1,74
	21	15,13	1,0	1,81
	28	17,52	0,9	2,06
25%CVm20min	0	21,0	0,8	1,66
	7	20,4	1,4	2,3
	14	17,2	0,8	1,78
	21	14,1	0,4	1,69
	28	16,7	0,5	1,96
25%CVm 40min	0	23,9	0	1,88
	7	22,5	1,4	2,53
	14	19,9	0,9	2,06
	21	20,5	0,9	2,45
	28	21,8	0,2	2,56

En la figura 4.2.1, se observa que el grado de ganancia de los morteros con sustitución del 25% de CV es superior a la unidad, que corresponde al control; esto nos indica la

ganancia que se obtiene gracias al efecto puzolánico más el efecto partícula de la CV. Al finalizar los 28 días de curado en cámara húmeda se da inicio al envejecimiento, a partir de este momento los morteros con sustitución incrementan la ganancia y la mantienen incluso hasta los 28 días del proceso; todo esto es producto, por una parte, del desarrollo de la reacción de la CV con los productos de la hidratación después de los 28 días de curado, y, por otra parte, por el mantenimiento de las propiedades de la fibra. Otro aspecto importante es que con el proceso de molienda se incrementa la ganancia de resistencia, es decir, se aumenta la reactividad de la CV en especial para tiempos de 40 minutos, debido al aumento de la superficie específica de la ceniza.

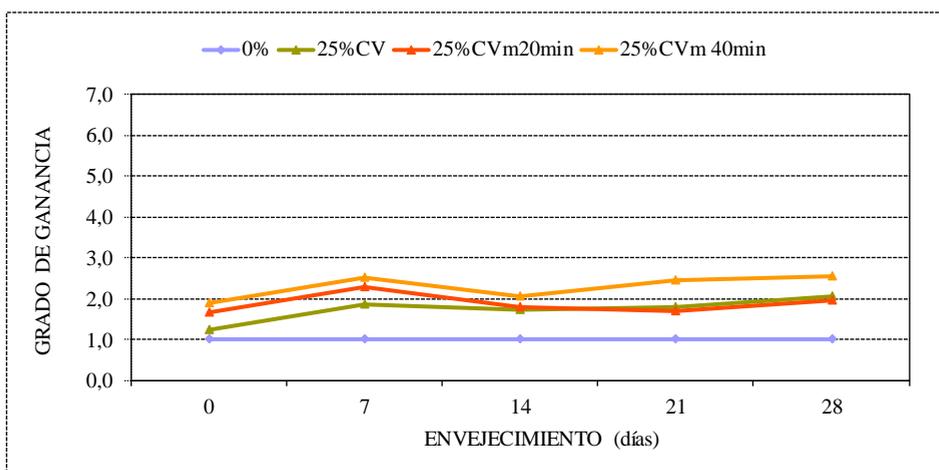


Figura 4.2.1. Grado de ganancia morteros con 25%CV de sustitución.

En la tabla 4.2.3 se muestran los datos para sustituciones de cemento por CV del 50%. Apreciamos que, a cero días de envejecimiento, el control es ligeramente superior en 2-4 MPa a los morteros con sustitución por CV. Sin embargo, al analizar el grado de ganancia de los morteros con una sustitución de 50%CV, se aprecian mejoras respecto al control del comportamiento a flexión. En todos los morteros con CV, al envejecer, se incrementa de forma notable las resistencias mecánicas, obteniéndose valores superiores a los 20 MPa después de los 28 días de envejecimiento. El grado de ganancia se incrementa notablemente, hasta valores entre 3,7 para CV y 4,6 para CVm 40 minutos (figura 4.2.2).

Si comparamos estos últimos resultados con los de la sustitución de 25%CV, podemos concluir que existe una respuesta común ante el envejecimiento, ya que las resistencias de los morteros aumentan respecto al control y se sostienen con el tiempo de envejecimiento. En este caso, los morteros con sustitución por un 50%CV, presentan un mejor comportamiento mecánico, se obtienen ganancias de resistencia mayores, hecho muy importante si se tiene en cuenta que la reducción en el contenido de cemento es del 50%, confirmando la elevada reacción de la CV durante el envejecimiento, especialmente

para el caso de la CVm40min. Por otra parte, cabe esperar que las fibras AR mantengan su integridad, dado los elevados valores que presentan los morteros al ensayo de flexión.

Tabla 4.2.3. Resistencias a flexión (MPa) de morteros con 50% de sustitución por CV.

(σ = desviación estándar; GG = ganancia de resistencia)

SUSTITUCIÓN CEMENTO POR PUZOLANA	días a 55°C	FLEXIÓN		
		Rf (MPa)	σ	GG
0%	0	16,9	1,9	1,0
	7	11,8	0,6	1,0
	14	12,9	1,3	1,0
	21	11,2	3,5	1,0
	28	11,4	0,3	1,0
50%CV	0	14,6	1,0	1,73
	7	13,8	2,1	2,33
	14	15,0	0,9	2,33
	21	15,4	0,6	2,77
	28	19,9	0,9	3,51
50%CVm20min	0	12,9	2,7	1,53
	7	14,2	5	2,4
	14	20,9	0,6	3,25
	21	19,7	0,1	3,54
	28	20,95	0	3,69
50%CVm40min	0	14,6	0,1	1,73
	7	17,4	0	2,94
	14	21,2	0,4	3,3
	21	22,7	0,7	4,08
	28	24,5	1,2	4,32

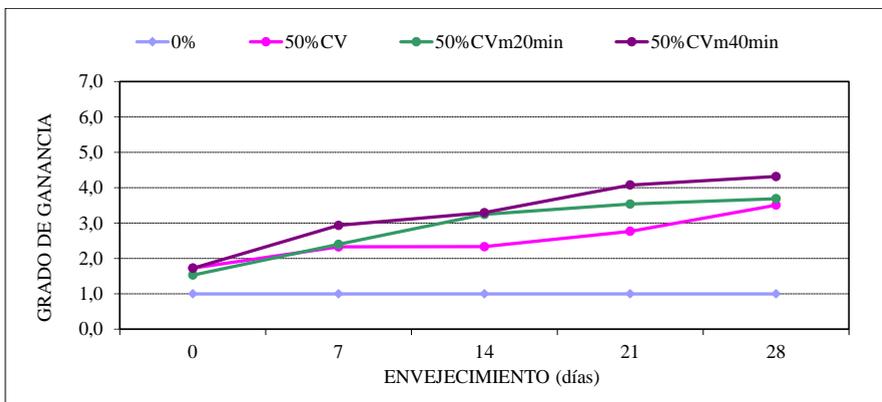


Figura 4.2.2. Grado de ganancia morteros con 50%CV de sustitución.

4.2.1.2. Morteros con sustitución por la mezcla CV-FCC

Se estudian morteros con sustitución de cemento por una mezcla de FCC y CV. El FCC es una puzolana que reacciona rápidamente, alrededor de los 10 días de curado [1], la CV, aunque reacciona a partir de los 28 días de curado tiene un efecto más prolongado en el tiempo; se busca, con la mezcla de estas dos puzolanas, que sus efectos sean complementarios y representen mejoras de las propiedades mecánicas de los morteros desde los primeros días.

En la tabla 4.2.4 se listan las resistencias y grados de ganancias para sustituciones de 10%FCC-25%CV. Se observa que las resistencias a flexión iniciales son, en general, mayores a las obtenidas cuando se tenía la sustitución sólo con CV; esto se debe a la contribución realizada por el FCC, el cual reacciona a tiempos cortos de curado, incrementando las resistencias antes del inicio del envejecimiento. Las mezclas que contienen CV molida presentan ganancias superiores en promedio 2,5 veces al control a lo largo del proceso de envejecimiento (figura 4.2.3).

Tabla 4.2.4. Resistencias a flexión (MPa) morteros con sustitución por mezcla 10%FCC-25%CV. (σ = desviación estándar; GG = ganancia de resistencia)

SUSTITUCIÓN CEMENTO POR PUZOLANA	días a 55°C	FLEXIÓN		
		Rf (MPa)	σ	GG
0%	0	16,9	1,9	1,0
	7	11,8	0,6	1,0
	14	12,9	1,3	1,0
	21	11,2	3,5	1,0
	28	11,4	0,3	1,0
10%FCC-25%CV	0	20,4	0,2	1,86
	7	23,4	1,2	3,04
	14	16,2	0,5	1,93
	21	13,8	1,6	1,91
	28	13,5	2,6	1,83
10%FCC- 25%CVm20min	0	22,1	2,0	2,01
	7	22,2	2,4	2,89
	14	20,6	0,3	2,47
	21	18,8	1,5	2,6
	28	19,5	1,0	2,65
10%FCC-25%CVm40min	0	21,0	1,2	1,91
	7	20,2	0,4	2,63
	14	21,6	0,1	2,59
	21	19,7	0,5	2,72
	28	21,6	2,7	2,92

La ganancia en la resistencia inicial es resultado de la reacción del FCC, que reacciona a edades tempranas, pero se puede ver retardada en la mezcla con la CV, que al estar presente en mayor cantidad, cubre la superficie del catalizador generando este efecto (ver figura 4.9 apartado 4.1.1.4., morfología de la CV y el FCC); se observa que la mezcla 10%FCC-25%CV es la que mayor grado de ganancia manifiesta a los 7 días de envejecimiento pero disminuye sus prestaciones con el tiempo, ya que la CV sin moler es la que menor reacción presenta, como se observó en el grupo de 25%CV estudiado anteriormente. Esto nos permite determinar que el incremento de la reactividad de la CV molida genera una acción conjunta inicial con la reacción del FCC que mejora las resistencias obtenidas en los primeros días de curado y envejecimiento, además, permite el sostenimiento de este comportamiento en el tiempo.

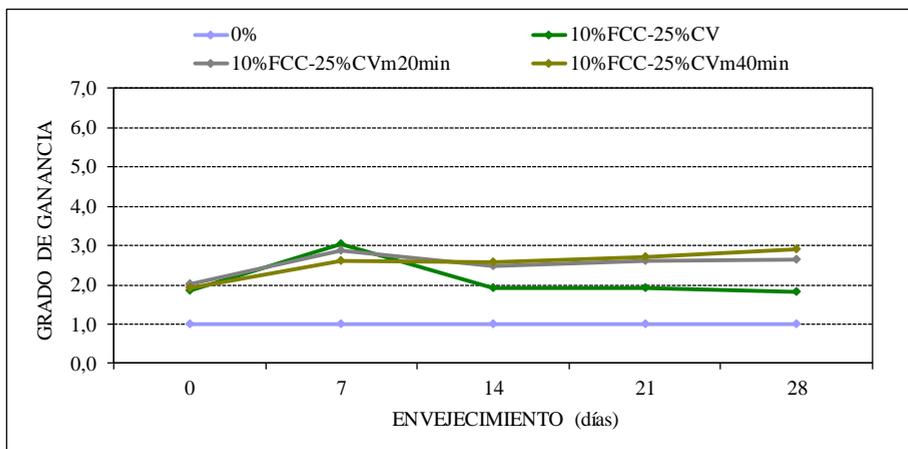


Figura 4.2.3. Grado de ganancia de morteros con sustitución por mezcla 10%FCC-25%CV.

De este modo, en los composites con 35% menos de cemento portland, a los 28 días de envejecimiento, las mezclas que contienen CV molida presentan valores de resistencia a flexión en el intervalo 19-22 MPa, valores que son semejantes, aunque algo inferiores, a los sistemas con 50% de CV. Ello sugiere que altos grados de sustitución son muy ventajosos con respecto al desarrollo de resistencia al envejecimiento.

Por todo lo anterior, se propone incrementar el grado de sustitución para este sistema binario de puzolanas. Así, cuando se sustituye un 60% de cemento, por la mezcla de las puzolanas 10%FCC-50%CV, la resistencia a los 28 días de curado (cero días de envejecimiento) es baja si se compara con el control. Ello significa que la reactividad del FCC no es suficiente para compensar la reducción del 60% de contenido de cemento. Pero al inicio del envejecimiento, se observa un incremento espectacular de las resistencias (tabla 4.2.5).

Tabla 4.2.5. Resistencias a flexión (MPa) de morteros con sustitución por mezcla 10%FCC-50%CV. (σ = desviación estándar; GG = ganancia de resistencia)

SUSTITUCIÓN CEMENTO POR PUZOLANA	días a 55°C	FLEXIÓN		
		Rf (MPa)	σ	GG
0%	0	16,9	1,9	1,0
	7	11,8	0,6	1,0
	14	12,9	1,3	1,0
	21	11,2	3,5	1,0
	28	11,4	0,3	1,0
10%FCC-50%CV	0	14,8	4,0	2,19
	7	22,1	0,5	4,67
	14	26,7	2,5	5,2
	21	27,9	1,1	6,25
	28	25,6	1,0	5,63
10%FCC-50%CVm20min	0	10,3	1,4	1,53
	7	30,5	4,6	6,43
	14	31,9	2,7	6,19
	21	26,7	1,4	5,99
	28	28,8	1,1	6,35
10%FCC-50%CVm40min	0	9,6	0,5	1,41
	7	27,3	0,9	5,77
	14	28,8	4,4	5,6
	21	22,8	1,4	5,11
	28	24,7	1,0	5,45

Los morteros con sustitución por la mezcla 10%FCC-50%CV, manifiestan un incremento drástico de la resistencia a flexión entre los 28 días de curado inicial y los primeros 7 días de envejecimiento; en general se observan grados de ganancia superiores a 4 veces el control (figura 4.2.4). Los valores después de 28 días de envejecimiento son superiores a los 24 MPa. De acuerdo con los resultados obtenidos, para los morteros con sustitución por mezcla 10%FCC-50%CV, se realizan las siguientes observaciones:

- El efecto puzolánico de la CVm permite que la resistencia se incremente al inicio del envejecimiento y se mantenga en el tiempo.
- La reacción del FCC, que se da generalmente en los primeros días de curado, se ve desplazada por estar mezclado con la CV presente en mayor cantidad.
- Se genera una acción conjunta entre las reacciones de la CV y el FCC, que se manifiesta en un incremento drástico de las resistencias en los primeros días del envejecimiento.
- Es evidente que en las muestras ensayadas se mejora notablemente la durabilidad frente al envejecimiento.

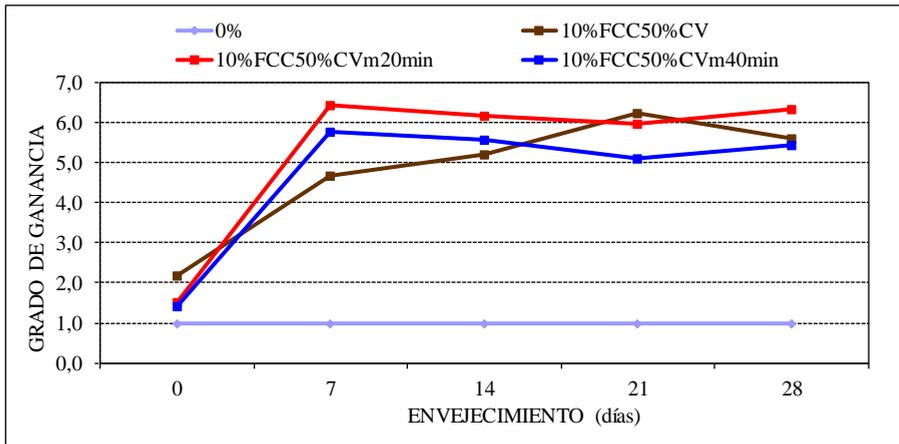


Figura 4.2.4. Grado de ganancia morteros con sustitución por mezcla 10%FCC-50%CV.

4.2.1.3. Morteros que presentan mejor comportamiento mecánico

Después de estudiar cada uno de los grupos planteados, a continuación, en las tablas 4.2.6 y 4.2.7 se describen los resultados de los morteros que mejor se comportan tanto a flexión como a compresión; se especifican los valores de los índices específicos de resistencia para evaluar el comportamiento para cada tipo de sustitución, siempre teniendo como referencia el mortero control de acuerdo con lo planteado en la tabla 3.9 del apartado 3.2.8.2; con su aplicación se puede determinar el grado de ganancia de resistencia de los morteros (GG), además, permiten diferenciar el grado de contribución a la resistencia por el efecto puzolánico (GCEP) y por la hidratación del cemento (GCH). En la tabla 4.2.6, observamos claramente al igual que se concluyó en el estudio de cada uno de los grupos, que los morteros seleccionados tienen valores de resistencias superiores al control y/o se mantienen durante el proceso de envejecimiento.

El mortero con sustitución por 25%CV molida 40 minutos, aunque presenta mayor grado de ganancia de resistencia por tener un porcentaje de sustitución menor, su comportamiento disminuye levemente con el envejecimiento. Se aprecia que los morteros con sustituciones de 50%CVm y su mezcla con el 10%FCC presentan las mejores resistencias durante el envejecimiento, antes de iniciar el envejecimiento los valores son bajos ya que la ganancia de resistencia sólo se debe en un 70% a la hidratación del cemento y en un 30% al efecto puzolánico, pero a partir de los 7 días de envejecimiento los valores de ganancia de resistencia se incrementan en el tiempo. Se observa que para las mezclas se da una importante ganancia de resistencia a los 7 días de envejecimiento, debido a la acción conjunta entre el FCC que retarda su reacción y la CV; las resistencias se mantienen durante el envejecimiento.

Tabla 4.2.6. Morteros que presentan mejor comportamiento a flexión.

SUSTITUCIÓN CEMENTO POR PUZOLANA	Días a 55°C	FLEXIÓN				
		Rf (MPa)	σ	GG	GCEP	GCH
					(%)	
0%	0	16,9	1,9	1	0	100
	7	11,8	0,6	1	0	100
	14	12,9	1,3	1	0	100
	21	11,2	3,5	1	0	100
	28	11,4	0,3	1	0	100
25% CVm 40min	0	23,9	0	1,88	46,9	53,1
	7	22,5	1,4	2,53	60,5	39,5
	14	19,9	0,9	2,06	51,6	48,4
	21	20,5	0,9	2,46	59,3	40,7
	28	21,8	0,2	2,56	60,9	39,1
10% FCC-25% CVm40min	0	21,0	1,2	1,91	47,7	52,3
	7	20,2	0,4	2,63	61,9	38,1
	14	21,6	0,1	2,59	61,3	38,7
	21	19,7	0,5	2,72	63,3	36,7
	28	21,6	2,7	2,92	65,8	34,2
50% CVm20min	0	12,9	2,7	1,53	34,6	65,4
	7	14,2	5	2,4	58,3	41,7
	14	20,9	0,6	3,25	69,2	30,8
	21	19,7	0,1	3,54	71,7	28,3
	28	21,0	0	3,69	72,9	27,1
50% CVm40min	0	14,6	0,1	1,73	42,0	58,0
	7	17,4	0	2,94	66,0	34,0
	14	21,2	0,4	3,3	69,7	30,3
	21	22,7	0,7	4,08	75,5	24,5
	28	24,5	1,2	4,32	76,8	23,2
10% FCC50% CVm20min	0	10,3	1,4	1,53	34,6	65,5
	7	30,5	4,6	6,44	84,5	15,5
	14	31,8	2,7	6,19	83,9	16,2
	21	26,7	1,4	5,99	83,3	16,7
	28	28,8	1,1	6,35	84,3	15,8
10% FCC50% CVm40min	0	9,6	0,5	1,41	29,2	70,8
	7	27,3	0,9	5,77	82,7	17,3
	14	28,8	4,4	5,6	82,1	17,9
	21	22,8	1,4	5,11	80,4	19,6
	28	24,7	1,0	5,45	81,7	18,3

Si estudiamos el efecto puzolánico, se observa que son las cenizas molidas las de mayor efecto puzolánico, el cual se incrementa un poco al molerlas 40 minutos; sin embargo, el efecto puzolánico más alto durante el envejecimiento es el de la mezcla de 10% FCC-50% CV molida 20 minutos, corroborando este hecho la acción conjunta de la reacción de las dos puzolanas. Se aprecia en la figura 4.2.5, que el grado de ganancia de las muestras estudiadas se puede dividir gráficamente en tres grupos:

- El primero, lo conforman los morteros con sustitución de 25%CV molida 40 minutos y su mezcla con 10%FCC, presentan ganancias mayores al control y para la CV llegan al doble durante todo el proceso de envejecimiento.
- El segundo, lo conforman las sustituciones de 50%CVm (molidas 20 minutos) antes de iniciar el envejecimiento con valores similares al control, pero luego incrementan progresivamente el grado de ganancia hasta valores cercanos a 4 veces mayores que el control; a partir de los 14 días de envejecimiento las cenizas molidas 40 minutos presentan aún mayores resistencias desde los 7 días de envejecimiento y lo mantienen durante el proceso.
- Las mezclas del catalizador gastado FCC con el 50%CVm, incrementan las ganancias de resistencia hasta más de 5 veces el control para los primeros 7 días de envejecimiento y se mantienen durante todo el proceso.

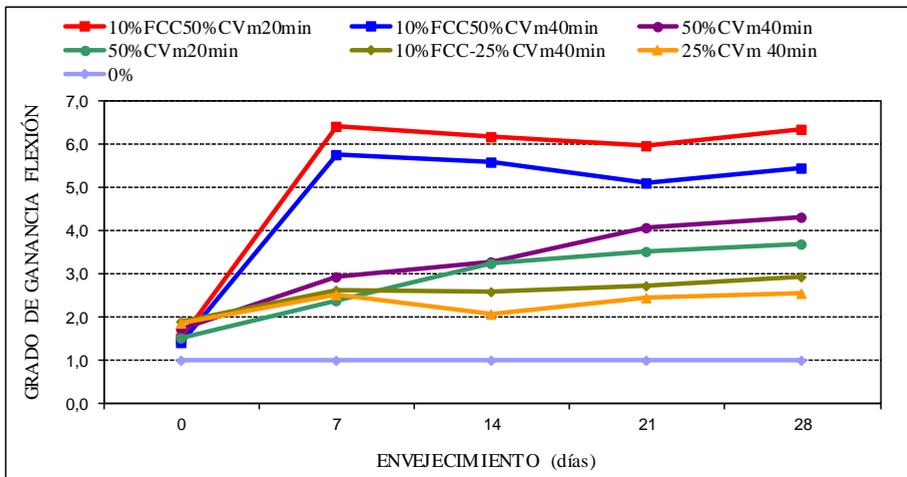


Figura 4.2.5. Grado de ganancia de morteros con mejor comportamiento a flexión.

En la figura 4.2.6 se observa el grado de contribución a la resistencia de algunos de los morteros, las resistencias obtenidas por el mortero control se deben en su totalidad a la hidratación del cemento; en cambio, para productos con porcentajes de sustitución altos, el grado de contribución del efecto puzolánico es mayor que el de la hidratación del cemento. De acuerdo con esto, los morteros que presentan sustitución disminuyen el grado de contribución por la hidratación del cemento y su resistencia dependerá en gran parte del efecto puzolánico de la adición. Para la mezcla 10%FCC y 50%CVm, se observa que un 80% de la resistencia a partir de los 7 días de envejecimiento se debe al efecto puzolánico de la mezcla; para los morteros con 50%CV molida 40 minutos la resistencia se debe a la contribución progresiva del efecto puzolánico llegando hasta a obtener aportes sobre el 75%; la mezcla de 10%FCC y 25%CVm incrementa su resistencia

notablemente hasta los 7 días de envejecimiento conservando el aporte del efecto puzolánico en un rango de 60 a 65%.

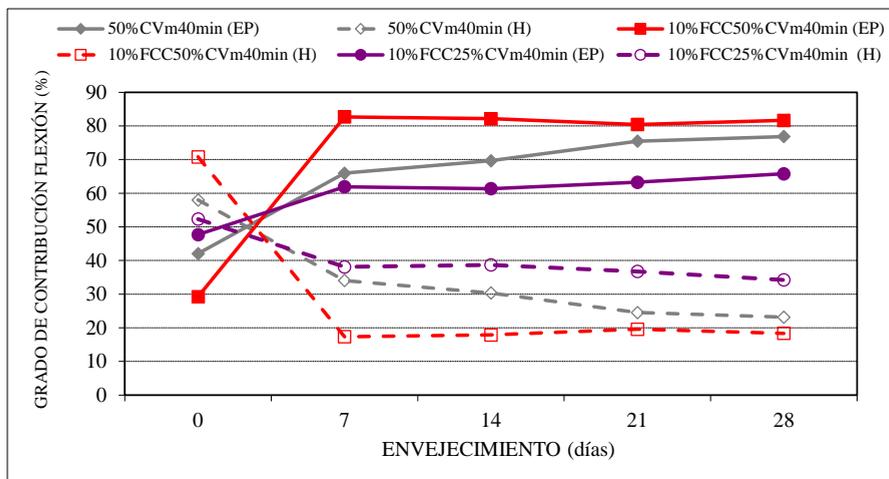


Figura 4.2.6. Grado de contribución a flexión de morteros con diferentes sustituciones: (EP) contribución por el efecto puzolánico, (H) contribución por la hidratación del cemento.

Respecto de la resistencia a compresión, en la tabla 4.2.7 se describe el comportamiento de los diferentes morteros. Se aprecia, en general, que las resistencias obtenidas por las diferentes sustituciones mejoran los valores obtenidos por el control. Las sustituciones por 50%CVm y su mezcla con el FCC, presentan valores bajos a cero días de envejecimiento, pero se incrementan durante el proceso superando el control, a pesar de la reducción importante en el contenido de cemento. Los mejores valores de resistencia a la compresión los presentan la sustitución por un 25%CVm y su mezcla con 10%FCC, superando al control incluso antes del inicio del envejecimiento y manteniendo estos valores durante todo el proceso.

Los morteros con sustitución por 25%CV molida 40 minutos y su mezcla con 10%FCC son los que mejor se comportan presentando resistencias mayores en un 20% que el control durante el proceso de envejecimiento. En todos los casos, el grado de ganancia es superior al control. Las sustituciones por 50%CVm y su mezcla con el 10%FCC, tienen valores de resistencia menores al control antes del envejecimiento, pero luego lo igualan (CV molida 20 minutos) o lo superan hasta en un 10% (CV molida 40 minutos, mezcla de FCC con CV molida 20 y 40 minutos).

En la figura 4.2.7 analizamos el grado de ganancia de las sustituciones, se observa que la mezcla 10%FCC-50%CVm presenta una ganancia de resistencia casi 3 veces mayor al control, seguidos por la sustitución de 50%CVm 2 veces mayor al control; esto se debe a que, aunque haya menor contenido de cemento para hidratar, la reacción puzolánica de

las cenizas es alta e iguala la contribución a la resistencia realizada por la hidratación del cemento.

Tabla 4.2.7. Morteros que presentan mejor comportamiento a compresión.

SUSTITUCIÓN CEMENTO POR PUZOLANA	Días a 55°C	COMPRESIÓN				
		Rc (MPa)	σ	GG	GCEP	GCH
					(%)	
0%	0	69,2	2,8	1,0	0,0	100,0
	7	84,2	3,0	1,0	0,0	100,0
	14	86,7	2,2	1,0	0,0	100,0
	21	88,3	3,4	1,0	0,0	100,0
	28	83,4	3,0	1,0	0,0	100,0
25%CVm 40min	0	91,0	2,4	1,75	43,0	57,0
	7	105,5	4,5	1,67	40,2	59,8
	14	106,9	3,6	1,64	39,1	60,9
	21	104,7	5,0	1,58	36,7	63,3
	28	110,9	4,6	1,77	43,6	56,4
10%FCC-25%CVm40min	0	90,0	2,8	2,0	50,0	50,0
	7	99,8	2,9	1,82	45,2	54,8
	14	106,6	3,1	1,89	47,1	52,9
	21	102,5	3,5	1,78	44,0	56,0
	28	97,1	2,8	1,79	44,2	55,8
50%CVm20min	0	57,4	2,0	1,66	39,7	60,3
	7	67,4	1,7	1,6	37,5	62,5
	14	91,9	1,4	2,12	52,8	47,2
	21	83,2	2,0	1,88	46,9	53,1
	28	82,1	2,7	1,97	49,3	50,7
50%CVm40min	0	60,2	1,6	1,74	42,6	57,4
	7	93,5	1,7	2,22	55,0	45,0
	14	92,2	1,9	2,13	53,0	47,0
	21	97,1	1,8	2,2	54,6	45,4
	28	98,3	1,7	2,36	57,6	42,4
10%FCC50%CVm20min	0	48,8	1,2	1,76	43,2	56,8
	7	86,7	4,63	2,57	61,2	38,8
	14	90,7	2,7	2,61	61,8	38,2
	21	92,0	1,4	2,6	61,6	38,4
	28	93,8	1,1	2,81	64,5	35,5
10%FCC50%CVm40min	0	50,6	1,1	1,83	45,3	54,7
	7	82,4	2,6	2,45	59,1	40,9
	14	84,1	3,3	2,42	58,7	41,3
	21	94,5	2,8	2,67	62,6	37,4
	28	95,7	2,7	2,87	65,2	34,8

Al estudiar el efecto puzolánico, se aprecia que la sustitución del 10%FCC-25%CVm y 50%CVm, son los que menor efecto presentan durante el proceso de envejecimiento; por el contrario, para las sustituciones de un 50%CVm y su mezcla con el FCC, el efecto

puzolánico se incrementa y se mantiene en el tiempo. Esto se debe a la actividad de la CV, presente durante el envejecimiento, y su combinación con la acción puzolánica del FCC al inicio de éste; además, hay que tener en cuenta el mayor porcentaje de sustitución de cemento por puzolana (figura 4.2.8). Cuando se trata de la mezcla del 10%FCC-50%CVm, después de los 7 días de envejecimiento la contribución del efecto puzolánico es del 60%. La incorporación de CV en morteros de cemento Pórtland, activa la hidratación del cemento a tiempos cortos produciendo beneficios sobre las resistencias, además, el efecto puzolánico genera ganancias adicionales mayores a las del control a tiempos largos [2].

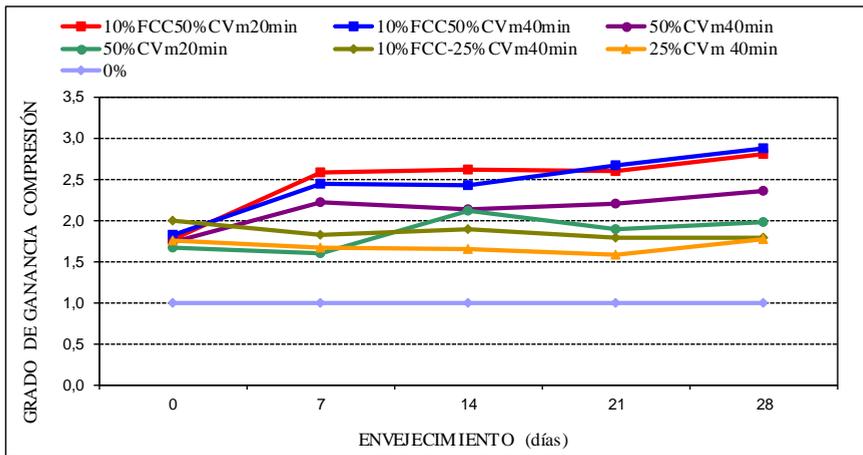


Figura 4.2.7. Grado de ganancia de morteros con mejor comportamiento a compresión.

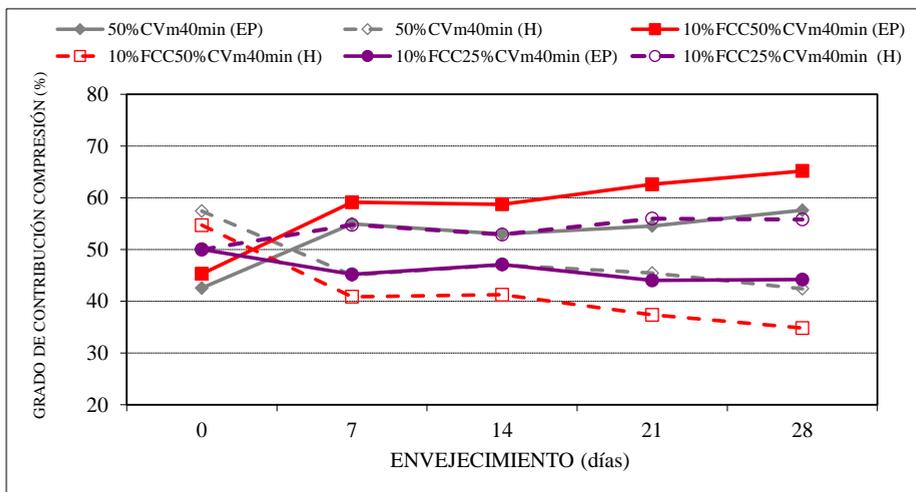


Figura 4.2.8. Grado de contribución a compresión de morteros con diferentes sustituciones: (EP) contribución por el efecto puzolánico, (H) contribución por la hidratación del cemento.

4.2.1.4. Morteros sometidos a varias cargas

Para la determinación de la resistencia mecánica a flexión de probetas sometidas a varias cargas, se registra el valor de carga máxima necesaria para fracturar la probeta denominada A, correspondiente al módulo de rotura (figura 4.2.9a); luego de la primera caída de resistencia se procede a cargar de nuevo la probeta en dos oportunidades denominadas B y C (figura 4.2.9 b y c). Este proceso nos entrega evidencia sobre la capacidad disponible en el compuesto luego de sufrir la rotura para soportar esfuerzos adicionales, que, aunque son menores que el esfuerzo máximo obtenido, indican el comportamiento tenaz del compuesto gracias al trabajo de las fibras antes de romperse o deslizarse en su totalidad.



Figura 4.2.9. Fotografías probeta sometidas a varias cargas.

Los morteros con sustitución del 50% CVm y su mezcla con el 10%FCC son los que presentan mejor comportamiento a flexión con el envejecimiento, generalmente a 28 días de curado se obtienen valores menores que los del control, pero con el tiempo de envejecimiento se incrementan y se mantienen. En la figura 4.2.10 se representa el comportamiento a flexión de los morteros sometidos a varias cargas en función del tiempo de envejecimiento. Si evaluamos el módulo de rotura (valor A, máxima resistencia a flexión), y los valores de resistencia posteriores a la rotura en dos cargas consecutivas a la anterior (B y C, valores máximos consecutivos de resistencia), observamos que el control, 25%CVm40min y su mezcla con el 10%FCC son los que mejor se comportan a los 28 días de curado; por el contrario, al inicio del envejecimiento a 55°C, para la CVm y su mezcla con el FCC, y con el tiempo de envejecimiento superan al control en resistencia y se sostienen, tanto para la primera rotura como para cargas posteriores a ella.

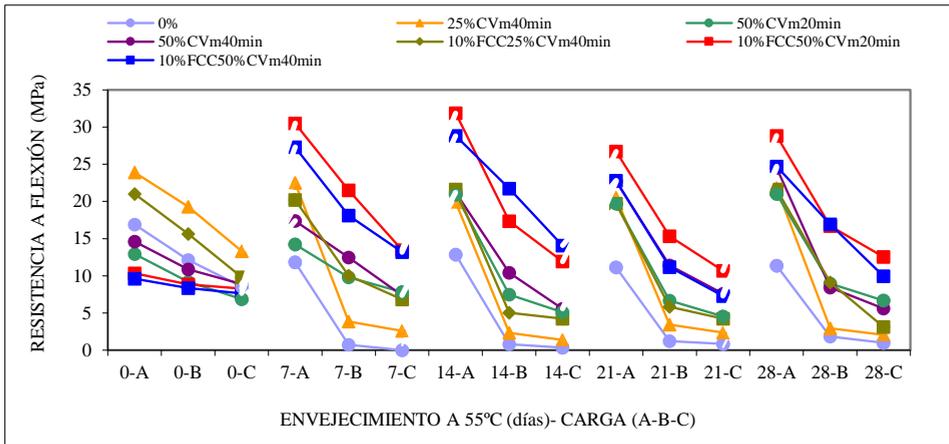


Figura 4.2.10. Comportamiento a flexión de los morteros sometidos a varias cargas, en función del tiempo de envejecimiento.

Los morteros con sustitución puzolánica, a diferencia del mortero control, presentan valores de resistencia importantes después de ser generada la primera rotura del mortero. Este comportamiento nos indica que estos materiales pueden presentar índices de tenacidad adecuados después de ser envejecidos; es decir, se incrementa la capacidad de absorción de la energía generada por los esfuerzos de flexión aplicados, dando lugar a morteros más dúctiles ((figura 4.2.10)). Este comportamiento es más acusado en los morteros con sustitución por CVm y su mezcla con el FCC. A los 7 días de envejecimiento, los valores de rotura B y C para el control son despreciables, lo que significa que la primera rotura A, ha sido frágil. En el otro extremo, para los composites 10%FCC-50%CVm se observa que la tercera rotura C está por encima de 13 MPa una vez iniciado el envejecimiento.

El comportamiento tenaz de los morteros puzolánicos se puede presentar debido a la distribución tridimensional de las fibras y a la adecuada unión entre la fibra y la matriz cementante; esta última favorecida por los productos de hidratación generados, evitando la presencia excesiva de portlandita entre las fibras [7]. A estos factores habría que añadir la menor agresividad del medio alcalino durante el proceso de envejecimiento por la reacción de las puzolanas con la portlandita generada por el cemento, evitando el deterioro de las fibras [8]. Un 3% de fibras presente en la matriz representa un contenido alto, esto permite que después del agrietamiento de la matriz, el compuesto resista cargas menores a la de la primera rotura (comportamiento dúctil); además, las fibras resistirán estas cargas por más tiempo (comportamiento tenaz) [9]. Obviamente, es necesario llevar a cabo un estudio microestructural que confirme este comportamiento mecánico, lo cual analizaremos en el siguiente apartado.

4.2.2. Estudio de la microestructura

Los morteros de cemento Pórtland son materiales heterogéneos, especialmente cuando se realizan sustituciones; por este motivo, las fibras se ven afectadas en el tiempo de formas diferentes, se pueden formar capas con productos de hidratación: portlandita, etringita e hidrogel de silicatos cálcicos hidratados, entre otros [10]. Los investigadores sugieren que pueden suceder diversos ataques sobre la fibra (ver apartados 2.1.4.6 sobre las limitaciones del GRC y 2.4 sobre los antecedentes de morteros de GRC y adiciones activas), que pueden significar modificaciones de su estructura y, por consiguiente, reducción de las propiedades mecánicas de los morteros. A continuación, se observan fotografías obtenidas por microscopía electrónica que nos permiten evaluar la interacción entre la fibra y la matriz durante procesos de envejecimiento.

La figura 4.2.11 nos muestra fibras en morteros control que han estado sometidos a envejecimiento durante 7 y 28 días; se observa el deterioro de la superficie de la fibra (deterioro del ensimaje) posiblemente por el alto grado de alcalinidad de la matriz, generando la hidroxilación del vidrio y la disolución y pérdida de masa de la fibra en forma de pequeños hoyuelos que con el tiempo se conectan entre si incrementando la zona deteriorada.

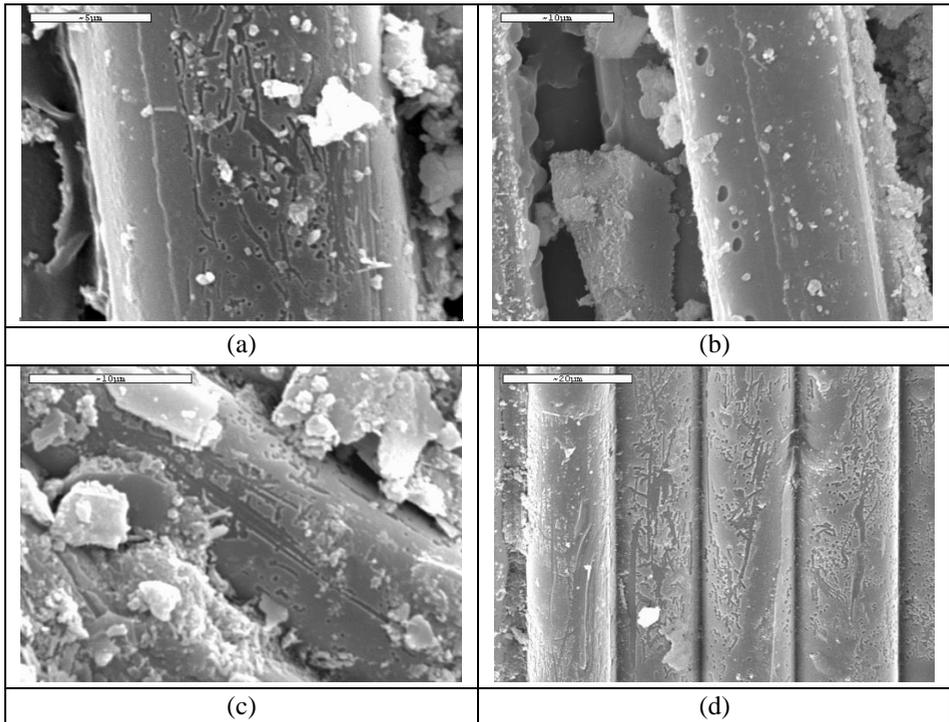


Figura 4.2.11. (a y b) Mortero control 7d 55°C, (c-d) mortero control 28d 55°C.

En la figura 4.2.12, apreciamos fibras en morteros con una sustitución del 25%CV y 25%CVm. A diferencia del mortero control, a los 7 días de envejecimiento no se aprecia ataque sobre la fibra y sólo se observa la formación de capas compuestas por productos de hidratación.

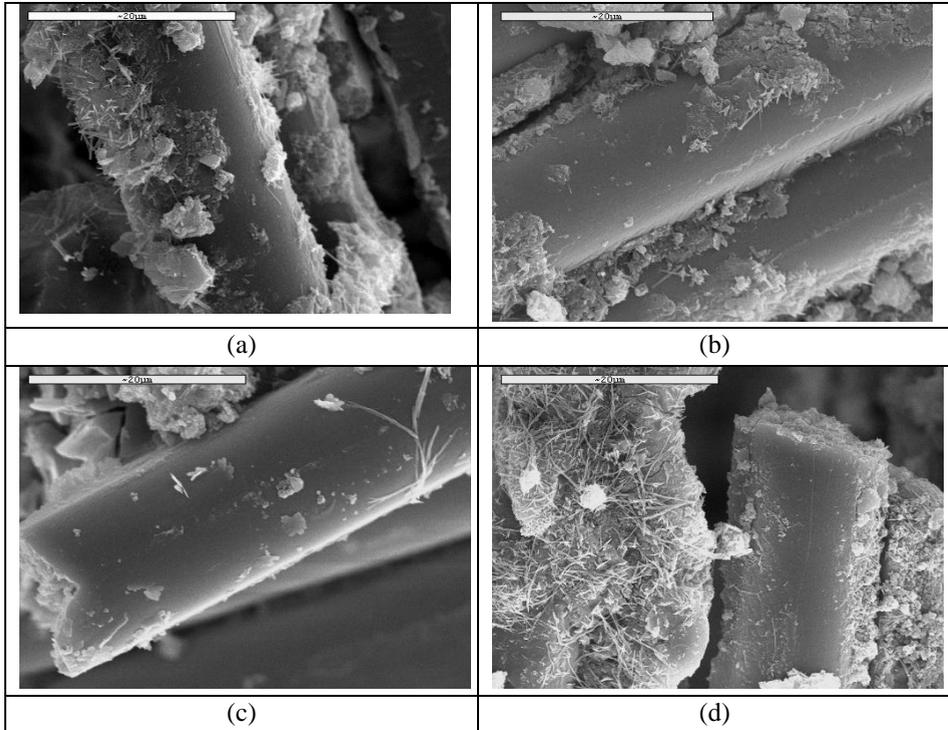


Figura 4.2.12. (a) Mortero 25%CV 7d55°C, (b) mortero 25%CVm20min 7d55°C, (c) mortero 25%CVm40min 7d55°C, (d) mortero 25%CVm40min 28d55°C.

La figura 4.2.13 presenta fibras en morteros con sustitución del 50% por CV de diferentes tipos: las fibras se encuentran en buen estado, no se observan deterioros superficiales ni pérdida de material. En general, hay presencia de productos de hidratación sobre la fibra y sus alrededores, se trata en su mayoría de materiales amorfos (puede tratarse de silicatos y aluminatos cálcicos hidratados) y de CV en su estado original esférico. Las fibras están cubiertas por una capa densa de productos hidratados, además, se observa el inicio de la formación de esta capa como sugiere Yilmaz [12] (ver apartado 2.4). El autor propone que esta capa se caracteriza por una estructura estable inicial en forma de “espagueti” y luego en forma de hueco corto rígido a manera de tubos de “macarrones”, esto último a un año de envejecimiento a 55°C (figura 4.2.13 a y b). Esta capa que puede ser formada por los productos de reacción del cemento y vidrio, es la responsable del endurecimiento de la interfase matriz-fibra y del incremento de la resistencia a flexión, se observó, en nuestro caso, a sólo 7 días de envejecimiento.

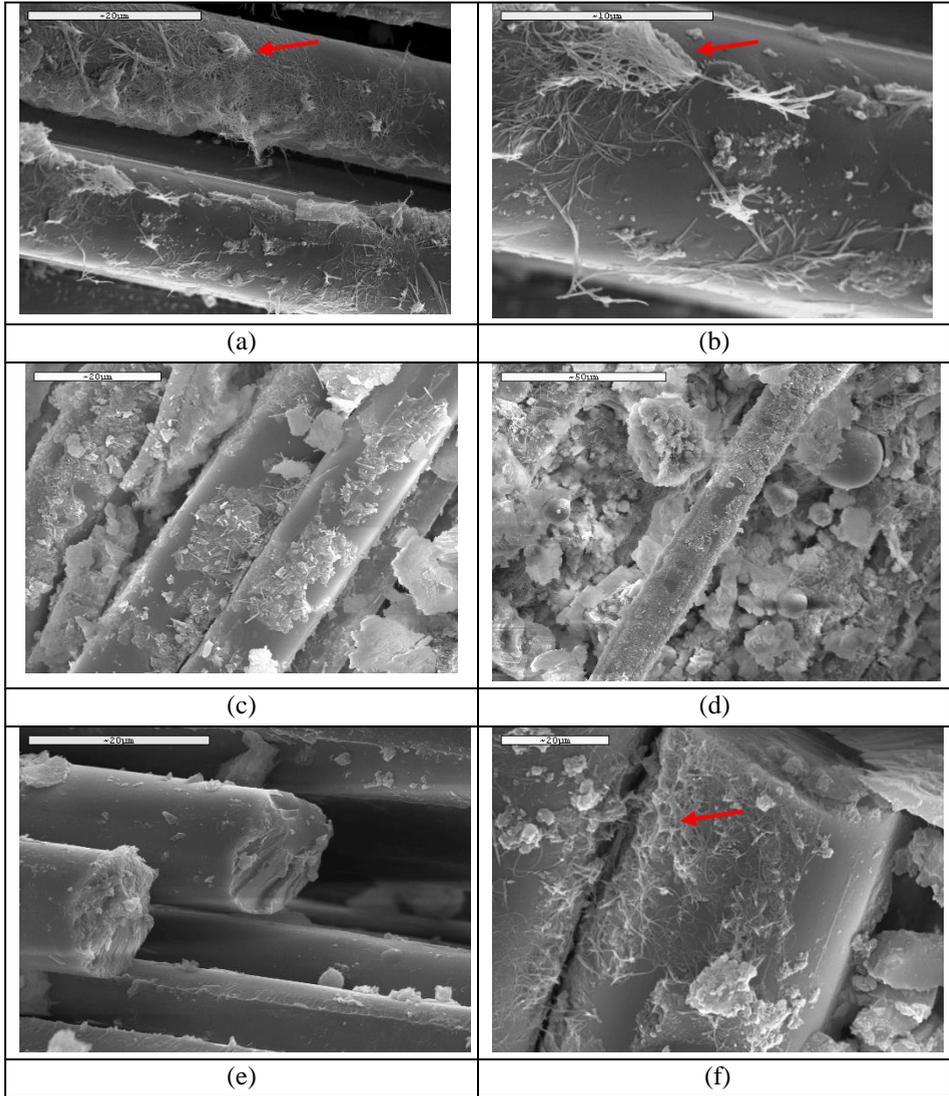


Figura 4.2.13. (a, b) Mortero 50%CV 7d 55°C, (c-d) mortero 50%CVm20min 7d 55°C, (e) mortero 50%CVm40min 7d 55°C, (f) mortero 50%CVm40min 28d 55°C.

Para el caso de las mezclas de 10%FCC y CV (figura 4.2.14), al igual que el caso anterior, la fibra no presenta ningún tipo de ataque, se encuentra con productos hidratados adheridos o a su alrededor; sólo se observa también el inicio de formación de capas bajo el mecanismo descrito anteriormente propuesto por Yilmaz [10, 11, 12, 13], en las probetas donde el porcentaje de sustitución por CV es menor (25%) y en el mayor tiempo de envejecimiento.

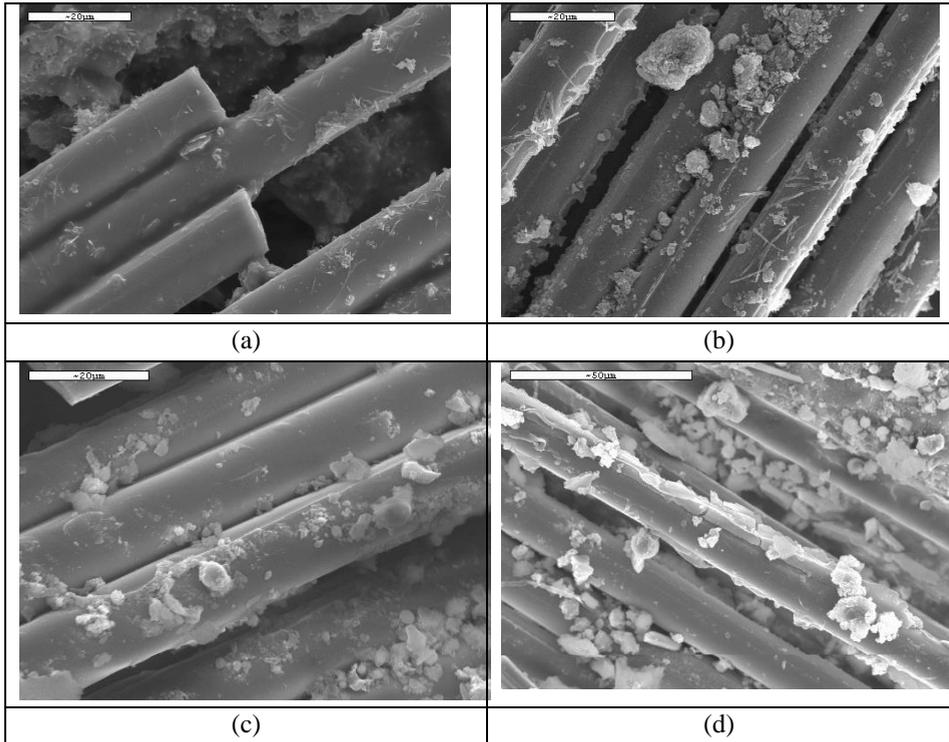


Figura 4.2.14. (a) Mortero 10%FCC-25%CV 7d 55°C, (b) mortero 10%FCC-25%CV 28d 55°C, (c) mortero 10%FCC-50%CVm40min 7d 55°C, (d) mortero 10%FCC-50%CVm20min 28d 55°C.

4.2.3. Evolución de la actividad puzolánica

El objetivo de estudiar las pastas mediante la técnica de termogravimetría es determinar la cantidad de productos de hidratación formados, como consecuencia de la reacción de hidratación y la reacción puzolánica. La rutina de ensayo comprendió un intervalo de temperatura de 35 a 600°C, durante el cual se puede visualizar la pérdida de masa más importante, la debida a la deshidroxilación de la portlandita a las temperaturas entre los 515 y 580°C, la cual nos permite determinar la cantidad de hidróxido cálcico presente en la matriz y la cantidad de cal fijada por las puzolanas durante la reacción puzolánica. La reacción puzolánica se da con el hidróxido cálcico o portlandita liberada durante la hidratación del cemento (procedente de la hidratación de los silicatos tricálcicos y bicálcicos); se trata de una reacción ácido-base, el reactivo alcalino y el ácido corresponden al hidróxido cálcico y a la puzolana respectivamente [14].

En la reacción puzolánica se combinan los óxidos ácidos (Al_2O_3 y SiO_2) con el hidróxido cálcico, generando hidratos con carácter cementante e hidráulico. De esta manera, se deben tener en cuenta dos reacciones, la primera es la hidratación del cemento, hidratación de los silicatos bicálcico (C_2S) y tricálcico (C_3S) formando el gel silicato

cálcico hidratado (C-S-H) y el hidróxido cálcico (CH); la segunda es la reacción del hidróxido cálcico resultante de la hidratación del cemento, el cual reacciona con los componentes de la puzolana formando silicatos, aluminatos y silico-aluminatos cálcicos hidratados (C-S-H, C-A-H y C-S-AH) [14]. Las características de las pastas estudiadas son las siguientes:

- Cemento Pórtland tipo CEM I 52,5R, para disminuir su estándar de resistencia a 42,5R, se adiciona un 25% en peso de filler calizo con un porcentaje de pureza mayor al 80%.
- Ceniza volante molida (CVm20min, CVm40min) y sin moler (CV) y catalizador de craqueo catalítico molido (FCC) en los mismos porcentajes usados para la fabricación de los morteros con fibras AR.
- Relación agua/material cementante de 0,35, constante para todas las pastas.

Se representan gráficamente las curvas DTG, correspondientes a las pastas control, 25%CVm 40min, 50%CV molida 20 y 40 minutos y su mezcla con el catalizador (figura 4.2.15). Para todas las muestras analizadas tanto durante el curado a 20°C (7 y 28 días) como en el envejecimiento a 55°C (7 y 28 días), se aprecian tres áreas (A, B, C), en las cuales se ubican los picos característicos resultado de la hidratación del cemento y de la reacción con las puzolanas:

- En el área A entre los 100 y 190°C, se identifican los picos correspondientes a la deshidratación de la etringita, los silicatos y aluminatos cálcicos hidratados, en la mayoría de los casos los picos se solapan e incrementan con el envejecimiento.
- En el área B entre los 190 y 250°C, se identifica el pico de la deshidratación de los silicoaluminatos cálcicos hidratados. Se observa claramente la presencia de silicoaluminatos cálcicos hidratados durante el curado a 20°C, posteriormente en el envejecimiento estos productos manifiestan la tendencia a desaparecer o a presentar valores muy pequeños, siendo este fenómeno común tanto al control como a las pastas con puzolana.
- El área C entre 515 y 580°C, se observa el pico correspondiente a la deshidroxilación del hidróxido cálcico. Se manifiesta claramente en las pastas control, pero también para 25%CV inclusive durante el envejecimiento, aunque en menor proporción. Es en pastas con CV molida donde se observa una modificación clara de la presencia del pico; de esta manera para las muestras con un 25%CVm y su combinación con el FCC, sólo al final del envejecimiento se observa una disminución notable del pico; para las pastas con 50%CV molida el pico prácticamente ya ha desaparecido en el comienzo del envejecimiento a 7

días y en el caso de la mezcla de ésta con el FCC, a los 28 días de curado ya no se observa pico alguno y la fijación de cal fue prácticamente cuantitativa.

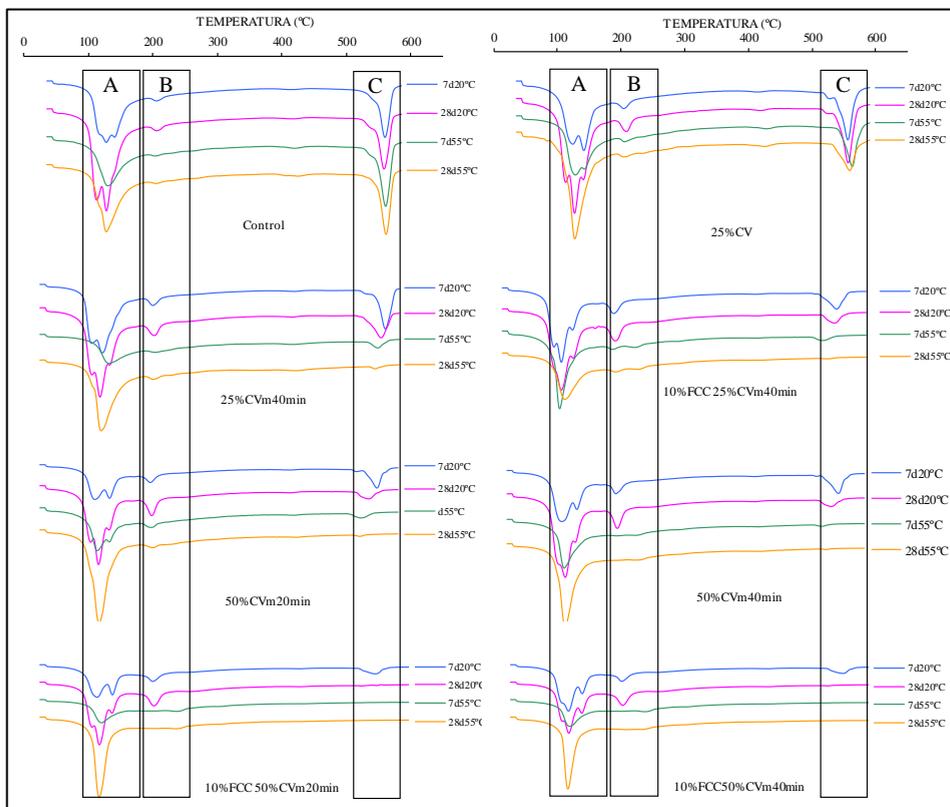


Figura 4.2.15. Representaciones curvas DTG para diferentes sustituciones y tiempos de curado (20°C) y tiempos de envejecimiento (55°C).

En la tabla 4.2.8 se indican los porcentajes obtenidos de hidróxido cálcico y cal fijada para las pastas estudiadas, calculados como se indica en el epígrafe 3.2.5.

En la figura 4.2.16 se observan los porcentajes de fijación de cal tanto para la pasta control como para las pastas con sustitución por CV y CVm. Las pastas con sustitución por 25 y 50%CV sin moler, presentan los valores más negativos de fijación de cal durante el curado a 20°C. En el proceso de envejecimiento obtienen valores de 25 y 70% respectivamente. Las pastas con sustitución por un 25%CVm a los 7 días de curado presentan valores negativos de fijación, pero a los 28 días se obtienen porcentajes de fijación cerca del 20%. Este hecho confirma la activación de la CV con el proceso de molienda, la cual generalmente reacciona después de los 28 días de curado, en este caso la ceniza inicia su reacción después de los primeros 7 días de curado.

Tabla 4.2.8. Porcentajes hidróxido cálcico y cal fijada para pastas con sustitución puzolánica.

SUSTITUCIÓN	CURADO A 20°C				ENVEJECIMIENTO A 55°C			
	7 días		28 días		7 días		28 días	
	Ca (OH) ₂	Cal fijada	Ca(OH) ₂	Cal fijada	Ca (OH) ₂	Cal fijada	Ca(OH) ₂	Cal fijada
0%	9,03	0,00	9,69	0,00	11,29	0,00	10,19	0,00
25%CV	8,85	-30,65	8,91	-22,57	6,85	19,10	5,69	25,62
25%CVm20min	7,92	-16,89	5,49	24,47	3,45	59,30	1,35	82,39
25%CVm40min	7,83	-15,5	5,80	20,27	1,50	82,33	0,81	89,45
50%CV	7,89	-74,75	6,63	-36,87	2,62	53,65	1,40	72,61
50%CVm20min	4,74	-4,85	2,54	47,49	1,48	73,82	0,64	87,47
50%CVm40min	4,26	5,74	1,98	59,14	0,42	92,60	0,23	95,57
10%FCC25%CV	5,60	4,69	3,52	44,07	1,59	78,36	0,90	86,42
10%FCC25%CVm20min	5,02	14,47	2,93	53,46	1,12	84,69	0,95	85,70
10%FCC25%CVm40min	4,91	16,38	2,59	58,9	1,34	81,79	0,40	93,98
10%FCC50%CV	3,15	12,94	0,68	82,33	0,53	88,30	0,36	91,17
10%FCC50%CVm20min	2,45	32,22	0,43	88,80	0,60	86,69	0,09	97,74
10%FCC50%CVm40min	2,27	37,16	0,39	89,82	0,39	91,27	0,12	97,01

De las pastas con sustitución por un 50% de CVm, la que está molida por 20 minutos no presentan valores de fijación a los 7 días de curado, en cambio la molida 40 minutos ya inicia el proceso de fijación; para los 28 días, se obtienen valores de fijación entre el 50 y 60%. La evolución es constante, demostrando para los 7 días de envejecimiento valores muy importantes de fijación de cal: la CV molida 20 minutos obtiene porcentajes sobre el 70% llegando para los 28 días de envejecimiento cerca del 90%. La CV molida 40 minutos a los 7 días de envejecimiento supera el 90% de fijación, conservando este comportamiento hasta el final del envejecimiento.

Según Amahjour, “Los valores negativos de cal fijada a tiempos cortos, se atribuyen a que la CV es inactiva a esa edad; sin embargo, sí influye sobre la velocidad de hidratación del cemento, originando un aumento en la cal liberada por el mismo” [2]. Esta condición se conserva para la ceniza en su estado natural y aumenta con la cantidad de CV, pero se modifica al encontrarse molida y en mayores cantidades, ya que a edades cortas la CV molida está activa e inicia la fijación de cal.

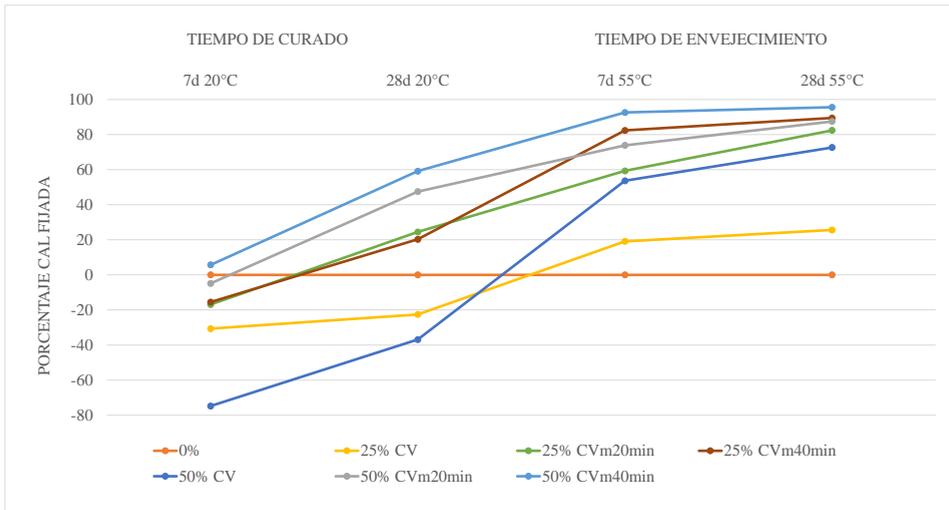


Figura 4.2.16. Porcentaje de cal fijada para pasta con sustitución por CV.

En la figura 4.2.17 se observa el porcentaje de cal fijada para las pastas con sustitución por mezclas de FCC y CV:

- En ningún caso se obtienen valores negativos de fijación de cal; esto se debe a la reacción rápida del FCC. Se aprecia que a los 7 días de envejecimiento las mezclas han fijado entre el 75 y el 85% de cal, mientras que, a los 28 días de envejecimiento, se incrementa el intervalo de fijación, entre el 87 y el 98%.
- Se observa que la fijación que se obtiene a los 28 días de curado es muy importante; se logran valores entre el 40 y 60% para las mezclas de FCC con un contenido del 25% de ceniza.
- Es aún más importante la cantidad de cal fijada por las mezclas de FCC-CVm las cuales a los 28 días de curado ya han fijado el 80% en promedio de la cal presente en la matriz.

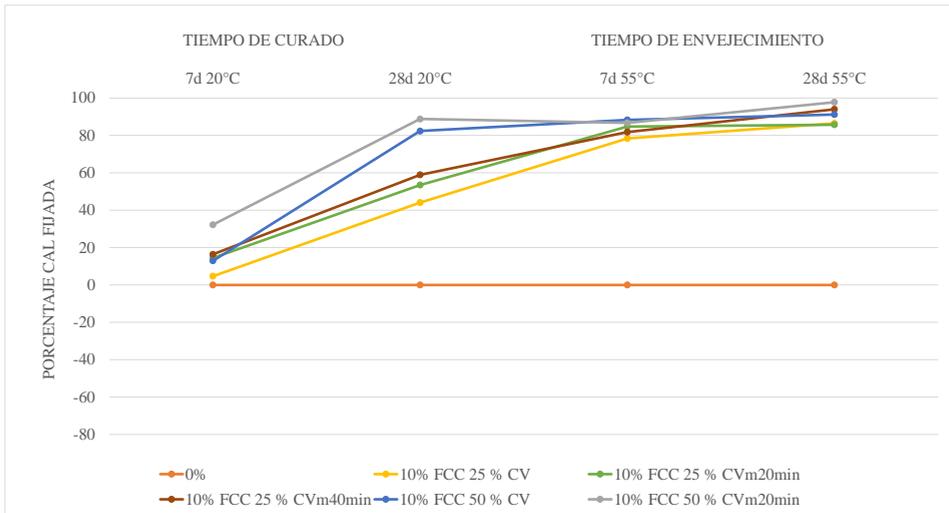


Figura 4.2.17. Porcentaje de cal fijada para pasta con sustitución por CV y FCC.

Finalmente, se analizaron fotografías de pastas control y con sustitución de 50%CVm, envejecidas durante 28 días a 55°C (figura 4.2.18), se observó lo siguiente:

- En las figuras 4.2.18 a y b se aprecia una superposición de capas correspondiente a productos hidratados, en la primera se observan productos con una estructura amorfa (silicatos cálcicos hidratados) y en la segunda cristales de hidróxido cálcico.
- Se observan CV cubiertas por productos hidratados de naturaleza amorfa formando una capa superficial; además, se aprecian cristales de etringita incrustados sobre la ceniza (figura 4.2.18c).
- En la figura 4.2.18d, se aprecia una zona de productos hidratados de carácter amorfo que cubren la superficie de las CV, además se observa el espacio dejado por una ceniza y en su interior, una clara invasión de productos de la reacción puzolánica.
- En las figuras 4.2.18 e y f, se presenta la estructura general de una pasta con CV, se observan en el costado derecho cenizas incrustadas en la matriz compuesta y con una coraza formada por los productos de la hidratación. Se pueden identificar diferentes estructuras correspondientes a productos hidratados, en la figura 4.2.18f se aprecia una ampliación de la anterior micrografía, en los sectores donde se identifican productos amorfos (zona 1) y cristales de etringita (zona 2).

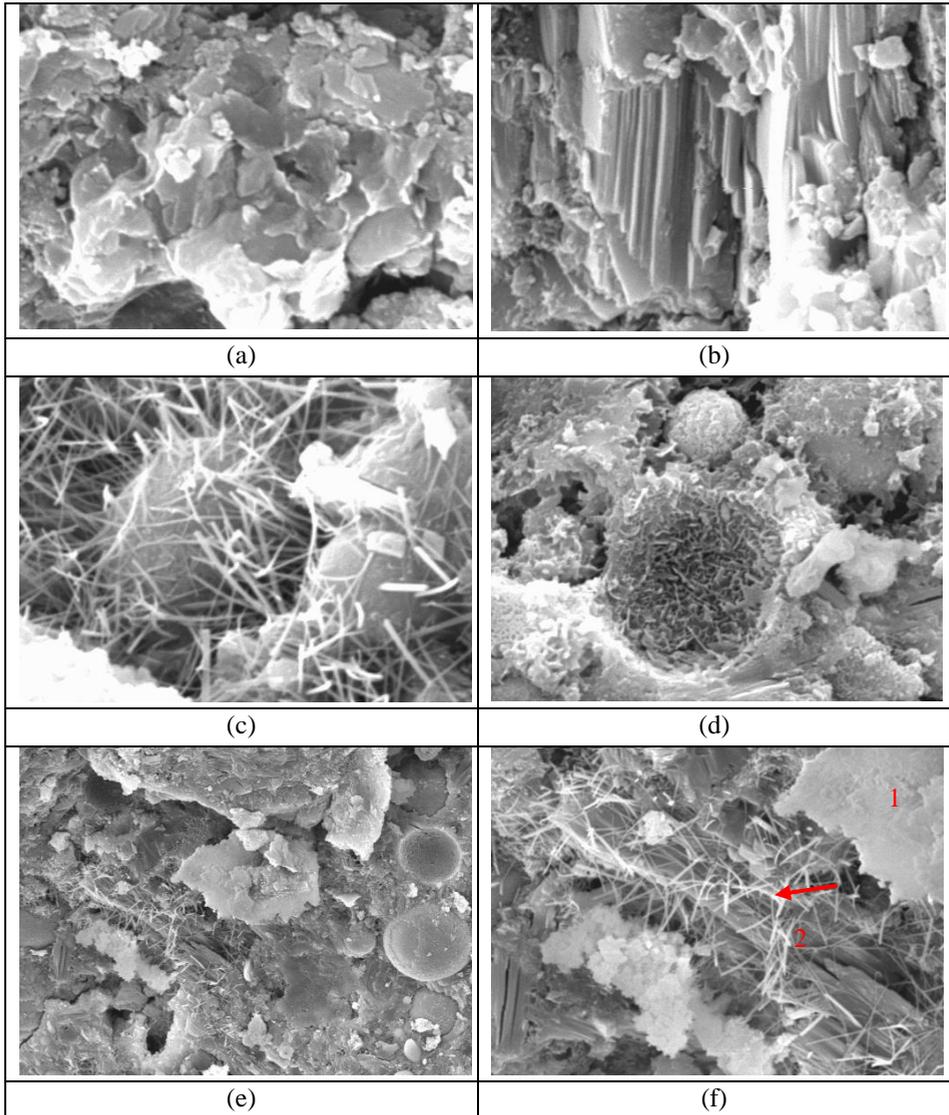


Figura 4.2.18. Pastas envejecidas: (a, b) Control, (c-d-e-f) 50%CVm20min 28 días a 55°C.

4.2.4. Conclusiones

4.2.4.1. Propiedades mecánicas y envejecimiento

La ganancia en la resistencia inicial de los morteros se debe a dos factores muy importantes; el primero es que el FCC reacciona a tiempos cortos y con una alta actividad puzolánica, el segundo es la incorporación de CV en morteros de cemento Pórtland, que activa la hidratación del cemento a tiempos cortos produciendo beneficios sobre las

resistencias. Son varios los factores que se deben tener en cuenta, para explicar el comportamiento mecánico de los morteros durante el proceso de envejecimiento:

- La continuación del proceso de hidratación del cemento, que debido a la baja relación agua/cemento, hace que la hidratación sea incompleta durante el proceso de curado a 20°C.
- El efecto puzolánico de la CV permite que la resistencia se mantenga en el tiempo, incluso al someter los morteros a procesos de envejecimiento; este efecto se incrementa cuando la ceniza se encuentra molida y en porcentajes altos de sustitución, ya que incrementa su superficie específica y contribuye a la formación de una matriz más densa.
- La reacción del catalizador se da generalmente en los primeros días de curado, pero se ve desplazada al realizar la mezcla con la CV presente en mayor cantidad, especialmente cuando ésta se encuentra en estado molido; las partículas de CV se adhieren a la superficie del FCC ocasionando un desplazamiento de la reacción del FCC.
- Se genera una acción conjunta entre las reacciones de la CV y FCC, que se manifiesta en un incremento drástico de las resistencias en los primeros días del envejecimiento.
- Cuando se sustituye parte del cemento por CV, las resistencias son bajas y menores que el control, pero aumentan gradualmente durante el tiempo de la experiencia. Para el caso de la CV el efecto puzolánico se incrementa con la edad y con mayores dosificaciones.

Cabe resaltar que los mejores valores son los de las sustituciones de 50% de CVm y sus mezclas con el 10%FCC. Los morteros en general presentan una mejora gradual de las resistencias hasta los 7 días de envejecimiento, lo que está de acuerdo con la producción de más productos conglomerantes por reacción puzolánica; este comportamiento se sostiene con altas resistencias durante el resto del proceso de envejecimiento.

Los valores del módulo de rotura a flexión y los valores de carga posteriores demuestran que las sustituciones por 50%CVm y su mezcla con el FCC, favorecen la tenacidad de los morteros. Dicha conservación debe estar directamente relacionada con el incremento de los productos cementantes y sobre todo por la conservación de las características de las fibras: escasa alteración por disolución de la matriz de vidrio y del ensimaje.

4.2.4.2. Estudio de la microestructura

Sobre el estudio realizado a las diferentes muestras, mediante el análisis por microscopía electrónica, se puede concluir:

- En general, se confirma la heterogeneidad de la matriz de cemento Pórtland, por la variedad y morfología de los productos hidratados observados, inclusive en presencia de la fibra. Se aprecia que, al incluir la CV en porcentajes de sustitución altos, la matriz es más densa y con mayoría de productos amorfos, y algunos casos con presencia de CV en su estado original.
- Las fibras presentan una respuesta diferente dependiendo de la composición de la matriz: para el mortero control, se observa el deterioro superficial y la pérdida de masa de la fibra; por el contrario, para los morteros con sustitución por CV y su mezcla con FCC, la fibra permanece prácticamente intacta con el tiempo de envejecimiento.

En resumen, se ha demostrado que existe una correlación entre el deterioro de las fibras observado por SEM y la caída de la resistencia a flexión. Mientras, por otro lado, las matrices ricas en CV/FCC protegen las fibras y se produce un incremento de la resistencia a flexión por la reacción puzolánica.

4.2.4.3. Evolución de la actividad puzolánica

De acuerdo con las observaciones realizadas se puede concluir:

- La actividad puzolánica de las sustituciones por CVm y su mezcla con el FCC, a pesar de reaccionar a intensidades y edades diferentes, permiten la reducción de la portlandita presente por los procesos de hidratación del cemento habiéndose consumido prácticamente de forma total a los 28 días de envejecimiento.
- Se pone de manifiesto la importancia del proceso de molienda para incrementar la actividad puzolánica de la CV, la reacción de la ceniza se aumenta y se adelanta en el tiempo; generalmente ya se da a los 28 días de curado.
- Otro aspecto importante a tener en cuenta es la cantidad de la sustitución; siempre las pastas con un 50% de sustitución presentan valores mayores de fijación de cal.
- *“Los valores negativos de cal fijada a tiempos cortos, se atribuyen a que la CV es inactiva a esa edad; sin embargo, sí influye sobre la velocidad de hidratación del cemento, originando un aumento en la cal liberada por el mismo comparado al mortero control”* [2]. Esta condición se conserva para la ceniza en su estado natural y aumenta con la cantidad de CV, pero se modifica al encontrarse molida y en mayores cantidades, ya que, a edades cortas, la CV molida está activa e inicia la fijación de cal.

- Se comprueba la acción conjunta del FCC y la CV, primero el FCC inicia su actividad puzolánica en los primeros días del curado y la continua incluso después de los 28 días, coincidiendo con el adelanto de la actividad puzolánica de la CV que se da antes de los 28 días de curado. Esta doble actividad es la que permite la obtención de las resistencias mecánicas altas en los primeros días de envejecimiento y su mantenimiento en el tiempo.
- Se observa en las curvas de DTG, que la presencia de productos hidratados (silicatos y aluminatos cálcicos), se incrementa con el envejecimiento; sin embargo, los silico-aluminatos cálcicos hidratados al igual que el hidróxido cálcico se reducen hasta desaparecer al final del envejecimiento. Estas observaciones permiten tener una idea clara de su existencia y su relación con la fijación de cal por las puzolanas.

Se concluye que la fijación completa del hidróxido cálcico permite obtener matrices no agresivas durante el tratamiento de envejecimiento y ello se traduce en mejora o al menos mantenimiento de las prestaciones a flexión.

4.2.5. Bibliografía

1. J. Payá, M.V. Borrachero, J. Monzo, M. Bonilla, C. León, L. Soriano. “Morteros de cemento compuestos con fibras AR y puzolana procedente de catalizadores FCC usados: resultados preliminares”. V Congreso Nacional de Materiales Compuestos MATCOMP2003, Zaragoza, España.3003: 865-872.
2. F. Amahjour. “Estudio de la reactividad de las puzolanas artificiales: cenizas volantes y humo de sílice y su reutilización en ingeniería civil”. Tesis doctoral, 2000, Universidad Politécnica de Valencia.
3. K. Hwang, T. Noguchi, F. Tomosawa. “Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete”. Cement and Concrete Research. 2004; 34: 2269-2276.
4. X. Pu. “Investigation on pozzolanic effect of mineral additives in cement and concrete by specific strength index”. Cement and Concrete Research.1999; 29: 951-955.
5. Y. Zhang, W. Sun, L. Shang and G. Pan. “Effect of high content of fly ash on the properties of glass fiber reinforced cementitious composites”. Cement and Concrete Research. 1997; 27 (12): 1885-1891.
6. A. Wang, C. Zhang, W. Sun. “Fly ash effects: I. The morphological effect of fly ash”. Cement and Concrete Research. 2003; 33: 2023-2029.
7. P. Purnell, N.R. Short, C.L. Page, A.J. Majumdar. “Microstructural observations in new matrix glass fibre reinforced cement”. Cement and Concrete Research. 2000: 1747-1753.

8. A.H.H Waeslisch, H. Moertel, V. Rudert. Optimisation and glass fibre reinforcement of mortars with very fine fillers. En: Composites Materials in Concrete Construction. Proceedings of the International Seminar Held at the University of Dundee Dundee, Escocia. 2002, 324-331
9. J.C. Anderson, K.D. Leaver, R.D. Rawlings, J.M. Alexander. "Materials science". Editorial Limusa, 2ª edición. 1998.
10. V.T. Yilmaz and F.P. Glasser. "Reaction of alkali-resistant glass fibres with cement. Part 1. Review, assessment and microscopy". Glass Technology. 1991; 32 (3).
11. V.T. Yilmaz, F.P. Glasser. "Reaction of alkali-resistant glass fibres with cement. Part 2. Durability in cement matrices conditioned with silica fume". Glass Technology. 1991; 32 (4).
12. V.T. Yilmaz, E.E. Lachowski and F.P. Glasser. "Chemical and microstructural changes at alkali-resistant glass fiber-cement interfaces". J.Am. Ceram. Soc.1991; 74 (12): 3054-3060.
13. V.T. Yilmaz. "Chemical attack on alkali-resistant glass fibres in a hydrating cement matrix: characterization of corrosion products". Journal of Non-Crystalline Solids. 1992; 151: 236-244.
14. N.R: Short, C.L. Page. "Preliminary investigation into the supercritical carbonation of cement pastes". Journal of Materials Science. 2001; 36: 35-41.

4.3. GRC Premezclado: mezcla de fibras y envejecimiento acelerado

En este apartado se presentan los estudios realizados sobre morteros de GRC premezclado con diferentes tipos de fibras AR y las mezclas de dichos tipos, además para los casos que demuestran mejor comportamiento mecánico, se estudia el efecto que se genera en el compuesto por la sustitución de cemento por ceniza volante. Las características mecánicas de los compuestos dependen de las propiedades de la fibra y del grado de transmisión de la carga aplicada a la fibra a través de la fase matriz. En el caso de compuestos con fibras discontinuas, durante el proceso de transmisión de carga cobra importancia la resistencia de la interfase entre la matriz y la fibra.

Con la inclusión de las fibras de vidrio álcali-resistentes se busca generar un material compuesto que permita favorecer el comportamiento mecánico del mortero, confiriéndole mejoras especialmente en las resistencias a flexión, tracción e impacto. Con la sustitución parcial del cemento por puzolanas se trata de mejorar, además de sus características mecánicas, las características físicas y químicas de la matriz cementante, lo cual representa un incremento en la durabilidad del compuesto. Al sustituir parte del cemento por la ceniza volante, puzolana que reacciona a tiempos largos con el hidróxido cálcico, se pretende generar una mayor cantidad de productos hidratados y disminuir el porcentaje de portlandita presente alrededor de las fibras, lo cual contribuye a alterar la naturaleza de la matriz y, en especial, de la interfase fibra-matriz. Se fabricaron 6 probetas 1x5x22.5cm a partir de tableros de GRC premezclado, compuestos por los siguientes materiales:

- ✘ Cemento Pórtland tipo CEM I 52,5R; para disminuir su estándar de resistencia a 42,5R, se adiciona un 25% en peso de filler calizo.
- ✘ Ceniza volante tipo F según la clasificación ASTM C-618 molida durante 20 minutos (CVm).
- ✘ Árido silíceo AFA80, con un módulo de finura de 3,1.
- ✘ Fibras de vidrio de diferentes características: fibras de vidrio álcali resistentes (AR) dispersables en medio acuoso (D) de 6 y 12mm y no dispersables (ND) de 6, 12 y 24mm; fibras de vidrio E no dispersables de 12mm. En todos los casos el contenido de fibra fue del 3% respecto al peso total del mortero.
- ✘ Superplastificante Melment L240.
- ✘ Relación agua/material cementante de 0,35, constante para todos los morteros.
- ✘ Relación árido/material cementante de 0,67, constante para todos los morteros.

Las probetas de 1x5x22.5cm se elaboraron de acuerdo con la norma UNE-EN 1170-5 [1], el curado de los morteros se realizó en cámara húmeda, dejándolas durante 28 días

sumergidas en agua; adicionalmente, las dosificaciones seleccionadas fueron sometidas a un proceso de envejecimiento controlado por inmersión en agua a 55°C. En la tabla 4.3.1 se detalla la dosificación empleada en la fabricación de los morteros de GRC.

Tabla 4.3.1. Dosificación morteros de GRC fabricados (valores en gr).

Porcentaje de sustitución	Cemento CEM I 52.5R	Filler calizo	Sustitución puzolánica	Árido síliceo AFA80	Fibra de vidrio	Aditivo Melment L240	Agua de amasado
0%	1153,7	384,6	0	1025,5	93	15,4	529,8
60% CVm40min	461,5	153,8	923	1025,5	93	12,3	531,6

4.3.1. Propiedades mecánicas de GRC con mezcla de diferentes tipos de fibras

Se han evaluado las propiedades mecánicas de morteros de GRC, composites formados por morteros de cemento Pórtland reforzados con fibras de vidrio AR, a los 28 días de curado, con fibras de vidrio de diferentes características y sus mezclas: fibras de vidrio AR dispersables en medio acuoso (D) de 6 y 12mm y no dispersables (ND) de 6, 12 y 24mm y fibras de vidrio E no dispersables de 12mm. La característica de dispersabilidad o no en medio acuoso que pueden presentar las fibras, se refiere a la propiedad que les brinda el ensimaje (ver tabla 2.2, epígrafe 2.1.3.1), que tiene por función generar una fina película encargada de revestir y agrupar los cientos de filamentos que componen las fibras, de acuerdo con tipo de fibra, su aplicación y disposición comercial. Con el ensimaje se brinda cohesión a los filamentos cuando la fibra entra en contacto con un medio acuoso como puede ser el agua de amasado (fibras ND), o por el contrario se puede presentar cohesión de los filamentos sólo en estado seco, característica que pierde la fibra al entrar en contacto con el medio acuoso (fibras D) permitiendo la dispersión completa de los filamentos.

Las características mecánicas de los materiales compuestos dependen de las propiedades de la fibra y del grado de transmisión de la carga aplicada a la fibra a través de la matriz. En el proceso de fisuración de la matriz y su posterior fractura, las fisuras interactúan con microfibras y agregados para su propagación; dependiendo del volumen y tipo de fibra y agregados finos, este proceso puede ser más tortuoso y se incrementa con la reducción de la relación agua/cemento, aumentando la densidad de árido en la matriz y generando un espaciamiento menor entre las partículas de agregado [4].

El motivo más común para la inclusión de las fibras en morteros y hormigones es el incremento de la tenacidad bajo cargas de flexión y tensión. Tan pronto como la carga es aplicada, pequeñas y discontinuas microfisuras se desarrollan a través del material: las fibras cortas (6mm D-ND) son las encargadas de retardar la unión de las microfisuras para formar fisuras más grandes; la primera macro fisura coincide con el pico de carga y

con la visualización de la fisura; posterior a esto, el esfuerzo se concentra en la apertura de la fisura y es en este momento donde las fibras medias o largas (12 y 24mm D-ND) funcionan como puentes localizados; la carga posterior al pico se prolonga incrementando la tenacidad, hasta que la fibra falla por “pull out” (sale de la matriz) o se rompe [5].

En general, es aceptado que para morteros comerciales de GRC premezclados, se obtienen valores de resistencia a flexión máxima (MOR – módulo de rotura) entre 10 y 14 MPa y módulo de elasticidad entre 10 y 20 GPa [4]. Si observamos en la tabla 4.3.2 los resultados obtenidos para compuestos de GRC con diferentes tipos de fibras a 28 días de curado, se confirma la magnitud de estas propiedades excepto la de algunos casos donde se utilizan fibras dispersables (D); además, se destacan los siguientes aspectos generales:

- Se confirma el incremento de la resistencia a la flexión y grado de tenacidad en los compuestos estudiados comparados con el mortero sin fibras (prototipo 1), el cual obtiene una resistencia a la flexión buena (7,34 MPa) debido a la baja relación agua/material cementante; la tenacidad, de 0,04 J, demuestra que se trata de un compuesto con una rotura frágil.
- La resistencia a flexión de los compuestos reforzados con diferentes fibras se encuentra entre 8,83 y 14,46 MPa, la tenacidad entre los 0,21 y 1,55 J, superando claramente al mortero sin fibra.
- El comportamiento mecánico más bajo lo obtuvo el compuesto reforzado con fibra AR D de 6mm (8,83MPa – 0,21J), el mejor comportamiento lo obtuvo el compuesto reforzado con la mezcla de fibras AR 6mm50%ND - 12mm50%ND (14,46MPa – 1,55J), incluso superando al compuesto convencional reforzado con fibras AR de 12 mm ND.
- Los compuestos con fibra E de 12mm (prototipo 6) presentan propiedades inferiores al compuesto convencional con fibras AR de 12mm ND (prototipo 5), la diferencia es notoria si se evalúa la tenacidad, esto comprueba la mejora del comportamiento mecánico [2]. La fibra E ND fue el primer refuerzo utilizado para el GRC, luego fue reemplazada por la fibra AR ND, llama la atención que existe un comportamiento similar entre los compuestos reforzados con fibra E de 12 mm ND y AR de 12mm, pero dispersable (prototipo 4).
- La resistencia a la flexión y la tenacidad de los morteros con fibra dispersable en medio acuoso (D) para las diferentes longitudes de fibra estudiadas, es inferior a las de los compuestos similares con fibras ND (prototipos 2 a 7); las fibras al entrar en contacto con el agua se dispersan, condición que dificulta el proceso de amasado y compactación, además, los filamentos por separado no presentan las mismas propiedades que el conjunto de la fibra dentro de la matriz.

- Para todos los compuestos el valor del módulo de elasticidad se encuentra en el rango especificado por el fabricante para el material (10-20 GPa), destacándose los reforzados con fibras AR de 12mm D, fibras E 12 mm ND y las mezclas de fibras de 6 y 12 mm D y ND.

Tabla 4.3.2. Propiedades mecánicas mortero de GRC curados a 20°C con diferentes longitudes y tipos de fibra: fibra de vidrio álcali resistente (AR), fibra vidrio E (E), dispersables en agua (D) y no dispersables (ND)

N°	DESCRIPCIÓN MORTERO % Y TIPOS DE FIBRA	MOR		Tenacidad		Módulo elasticidad	
		MPa	σ	J	σ	GPa	σ
1	SIN FIBRA	7,34	0,43	0,04	0,01	19,74	1,65
2	FIBRA AR / 6mm / D	8,83	0,89	0,21	0,04	15,27	1,32
3	FIBRA AR / 6mm / ND	10,25	1,33	1,06	0,48	16,74	2,72
4	FIBRA AR / 12mm / D	10,54	1,58	0,26	0,09	21,86	3,92
5	FIBRA AR / 12mm / ND	13,52	1,12	1,21	0,49	12,90	2,45
6	FIBRA E / 12mm / ND	10,38	1,64	0,21	0,08	19,43	8,29
7	FIBRA AR / 24mm / ND	12,12	1,87	0,80	0,25	17,98	1,39
8	FIBRA AR / 6mm / 50%D - 50%ND	9,37	1,39	0,37	0,18	19,38	1,69
9	FIBRA AR / 6mm / 60%D - 40%ND	10,06	1,0	0,41	0,14	19,02	1,19
10	FIBRA AR / 6mm / 40%D - 60%ND	10,53	1,63	0,48	0,13	18,64	2,93
11	FIBRA AR / 6mm50%ND - 12mm50%ND	14,46	1,04	1,55	0,37	18,14	3,28
12	FIBRA AR / 6mm40%ND - 12mm60%ND	13,82	0,55	1,29	0,26	18,32	3,81
13	FIBRA AR / 6mm60%ND - 12mm40%ND	10,67	2,09	0,98	0,15	16,59	1,76
14	FIBRA AR / 6mm50%D - 12mm50%ND	10,77	0,82	0,36	0,08	19,91	1,14
15	FIBRA AR / 6mm60%D - 12mm40%ND	9,5	1,61	0,29	0,05	16,86	6,46
16	FIBRA AR / 6mm40%D - 12mm60%ND	11,19	0,69	0,44	0,22	19,10	2,53
17	FIBRA AR / 12mm / 50%D-50%ND	9,02	1,41	0,33	0,16	12,54	5,04
18	FIBRA AR / 12mm / 40%D-60%ND	10,84	1,15	0,55	0,12	19,05	1,06
19	FIBRA AR / 12mm / 60%D-40%ND	9,09	1,56	0,32	0,07	14,61	1,74
20	FIBRA AR / 12mm50%ND - 24mm50%ND	12,79	1,67	0,75	0,19	16,41	1,76
21	FIBRA AR / 12mm40%ND - 24mm60%ND	11,23	1,6	0,62	0,35	17,61	2,64
22	FIBRA AR / 12mm60%ND - 24mm40%ND	13,69	1,62	1,09	0,37	16,13	3,66
23	FIBRA AR / 12mm50%D - 24mm50%ND	10,12	1,21	0,36	0,17	17,78	0,78
24	FIBRA AR / 12mm40%D - 24mm60%ND	12,99	2,33	0,67	0,18	18,44	1,81
25	FIBRA AR / 12mm60%D - 24mm40%ND	10,34	0,99	0,36	0,06	19,15	2,62

Para la evaluación del comportamiento de los compuestos, se continua con el análisis de los resultados obtenidos, haciendo énfasis en la resistencia a flexión y la tenacidad de los diferentes compuestos estudiados, teniendo en cuenta el porcentaje proporcional de fibras, su tipo y longitud y su condición de dispersabilidad; además se complementa el

análisis con la observación de las curvas carga vs desplazamiento y el estudio de la microestructura mediante microscopía.

En la figura 4.3.1 se aprecian las propiedades mecánicas de compuestos con fibras de 6mm, variando desde pura fibra D (prototipo 2) hasta pura fibra ND (prototipo 3), estudiando el porcentaje creciente de fibra ND (prototipos 8-10). Se destaca la resistencia a la flexión cercana a los 10 MPa para los compuestos reforzados con fibra ND y las mezclas de fibras D y ND, todos ellos superiores al compuesto con fibras D (R_f 8,83 MPa); además, se aprecia un incremento notorio del módulo de elasticidad con valores cercanos a 19 GPa, comportamiento superior al obtenido por los compuestos reforzados sólo con fibras D o ND (15,27 y 16,24 GPa respectivamente). De lo anterior se deduce que la mezcla de fibras D y ND conserva el comportamiento a flexión y favorece notablemente la rigidez de los compuestos. Caso contrario si se evalúa la tenacidad, los prototipos con fibras D y la mezcla de fibras D y ND presentan un comportamiento frágil comparado con el compuesto que contiene sólo fibras ND que demuestra más tenacidad, esto es evidencia de que el conjunto de filamentos que conforma la fibra es más eficaz como refuerzo y genera el efecto puente para contener las fisuras, que múltiples filamentos dispersos en la matriz [5, 6].

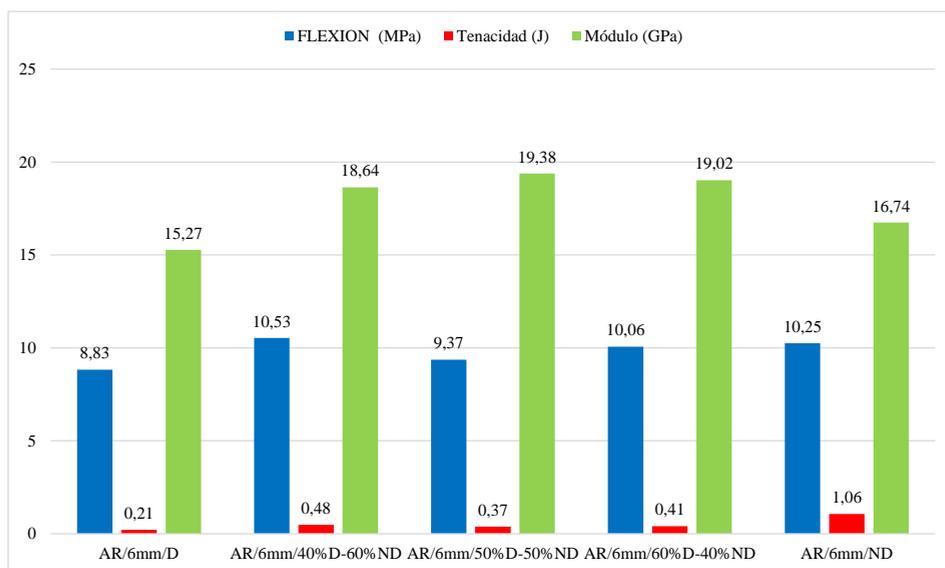


Figura 4.3.1. Propiedades mecánicas de morteros GRC con proporción variable de fibra de vidrio AR de 6 mm, D y ND.

Esto se aprecia con mayor claridad en la figura 4.3.2, los datos que se muestran corresponden a la gráfica carga desplazamiento de una probeta para cada tipo de compuesto, el cual tiene 6probetas de las cuales se obtiene la media para cada propiedad. Para las gráficas comparativas de curvas, se registra la gráfica completa de la probeta más

cercana al comportamiento medio, por este motivo se observan desplazamientos entre ellas y diferentes localizaciones del tramo elástico. El compuesto reforzado por fibras D presenta una rotura abrupta después del punto de carga máxima o módulo de rotura (MOR), condición que indica la fragilidad del compuesto durante la rotura y la menor capacidad para realizar el trabajo de pull out o extracción de la fibra, que termina rompiéndose, generando valores bajos de tenacidad. Caso contrario los compuestos reforzados con mezcla de fibras D y ND, en donde no se da la rotura frágil y se observa un aporte a la tenacidad por la extracción de las fibras; este fenómeno es más notorio en el compuesto reforzado solamente por fibras ND, en el cual la rotura tiene un comportamiento tenaz logrando un trabajo prolongado del conjunto de fibras.

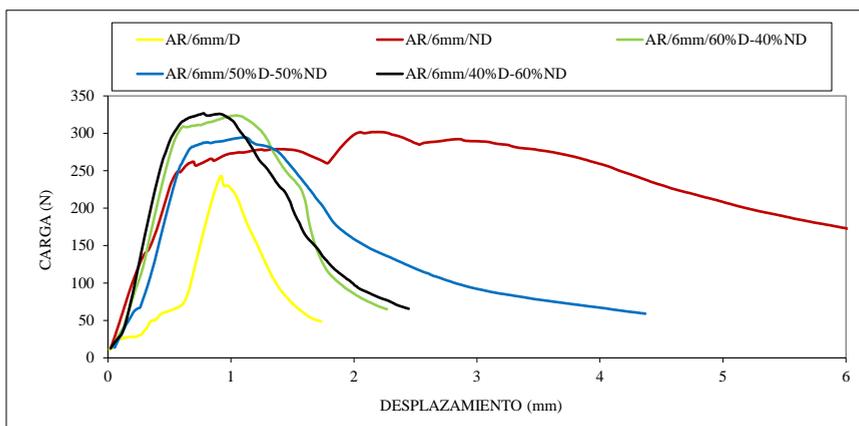


Figura 4.3.2. Curva carga (Newtons) vs desplazamiento (milímetros) de morteros GRC con proporción variable de fibra de vidrio AR de 6 mm, D y ND.

En la figura 4.3.3 se muestran las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados con fibras de 12 mm. Los compuestos reforzados por fibras E ND, AR-D y su mezcla con AR ND presentan resistencias a la flexión entre los 9 y 11 MPa. Se destaca el compuesto reforzado solamente con fibra de vidrio AR ND con el valor más elevado de resistencia 13,52 MPa. Para las mezclas de fibras D y ND, el valor más bajo de resistencia lo presenta el prototipo con mayor cantidad de fibra D, comportamiento que se modifica incrementando de forma importante la resistencia y la tenacidad cuando se aumenta el porcentaje de fibra ND de 40 a 60%. De lo anterior se deduce que la mezcla de fibras D y ND de 12 mm no favorece la resistencia a la flexión de los compuestos. Además, se aprecia un incremento notorio del módulo de elasticidad para los compuestos con fibras E, D y su mezcla con ND, con valores que superan entre 7 y 9 GPa a los obtenidos por el compuesto con fibra AR. Caso contrario si se evalúa la tenacidad, el prototipo con fibra AR ND obtiene los valores más altos, para las mezclas el mejor comportamiento se presenta para el compuesto que contiene mayor cantidad de fibra AR ND (60%).

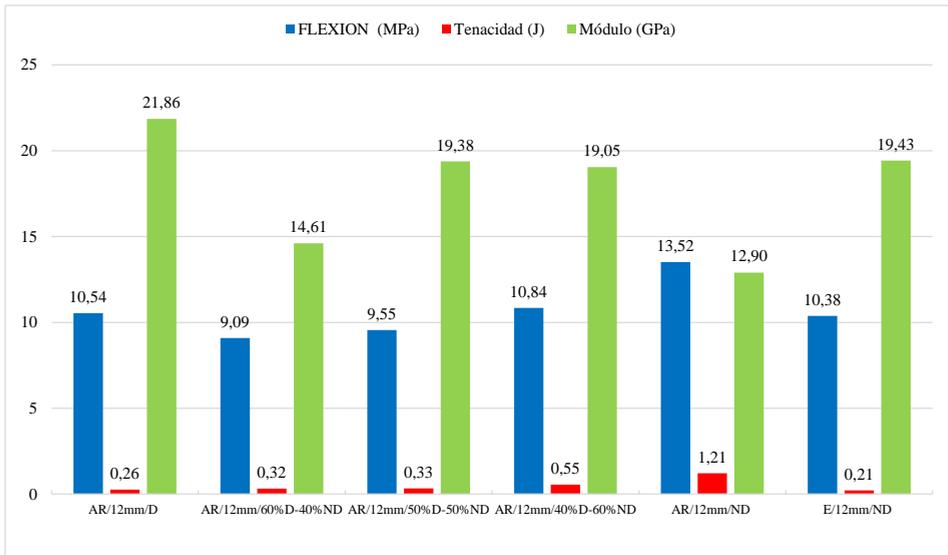


Figura 4.3.3. Propiedades mecánicas de morteros GRC con porcentaje variable de fibra de vidrio AR y E de 12mm, D y ND.

En la figura 4.3.4 se evalúa con mayor claridad el comportamiento tenaz de los compuestos. Primero se observa como el compuesto reforzado por fibras E presenta una rotura abrupta después del punto de carga máxima o módulo de rotura (MOR), condición que indica la fragilidad y la menor capacidad para realizar el trabajo de pull out o extracción de la fibra la cual termina rompiéndose, generando valores bajos de tenacidad. Los compuestos reforzados con mezcla de fibras D y ND no son frágiles, se observa un aporte a la tenacidad por la extracción de las fibras; este fenómeno se incrementa notablemente en el compuesto reforzado por fibras ND, en el cual la rotura tiene un comportamiento tenaz logrando un trabajo prolongado del conjunto de fibras.

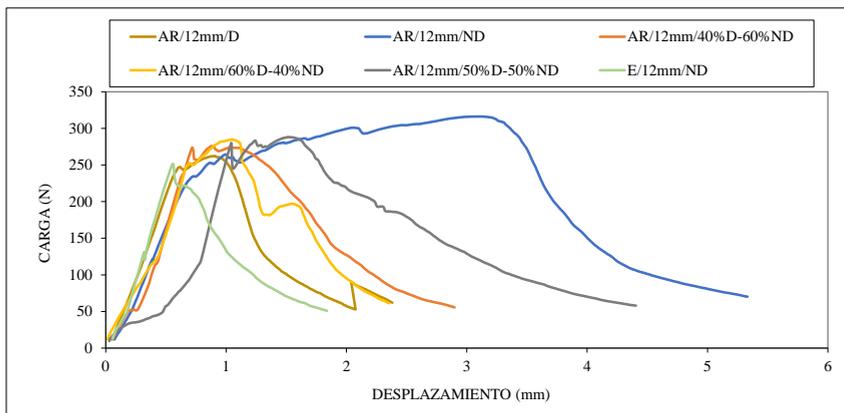


Figura 4.3.4. Curva carga (Newtons) vs desplazamiento (milímetros) de morteros GRC con proporción variable de fibra de vidrio AR y E de 12mm, D y ND.

En la figura 4.3.5 se aprecia la zona de fractura de compuestos con fibras D y ND. En las imágenes 4.3.5 a y b correspondiente a las fibras D apenas se pueden observar algunos filamentos que en su mayoría se han roto durante la fractura, para las fibras ND de 6 y 12 mm (imágenes 4.3.5 c y d respectivamente) se puede ver un número mayor de fibras extraídas de la matriz, coincidiendo con el mejor comportamiento mecánico en especial a lo referido a la tenacidad del compuesto.

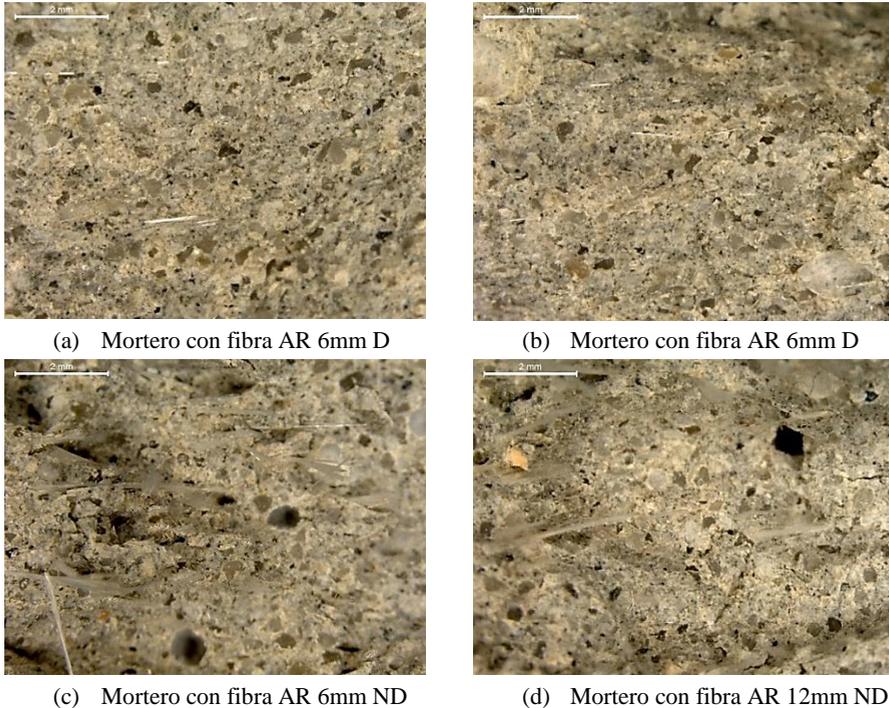


Figura 4.3.5. Fotografías microscopio óptico de la zona de fractura de morteros GRC.

Continuando con el análisis del comportamiento mecánico de los compuestos de GRC, en la figura 4.3.6 se estudian compuestos reforzados con fibras de diferentes longitudes. Los compuestos reforzados por fibras E ND, AR 6mm ND y AR 12mm D presentan resistencias a la flexión entorno a los 10 MPa ubicándose por debajo de la referencia comercial del GRC. Se destacan el compuesto reforzado con fibra de vidrio AR 12mm ND con el valor más elevado de resistencia 13,52 MPa (GRC convencional) y el reforzado por fibras de AR 24mm ND (12,12 MPa). De acuerdo con estos resultados, se puede decir que la longitud de la fibra tiene una relación directa con la resistencia a flexión del compuesto, para el caso de las fibras de 24 mm que obtienen una resistencia ligeramente inferior al compuesto convencional, esta disminución puede ser debida a dos factores; primero la dificultad para la elaboración de la mezcla; segundo, es posible que no sea

necesario para este tipo de compuestos una fibra de esta longitud ya que primero sucede la rotura de la fibra antes que la extracción total de la misma.

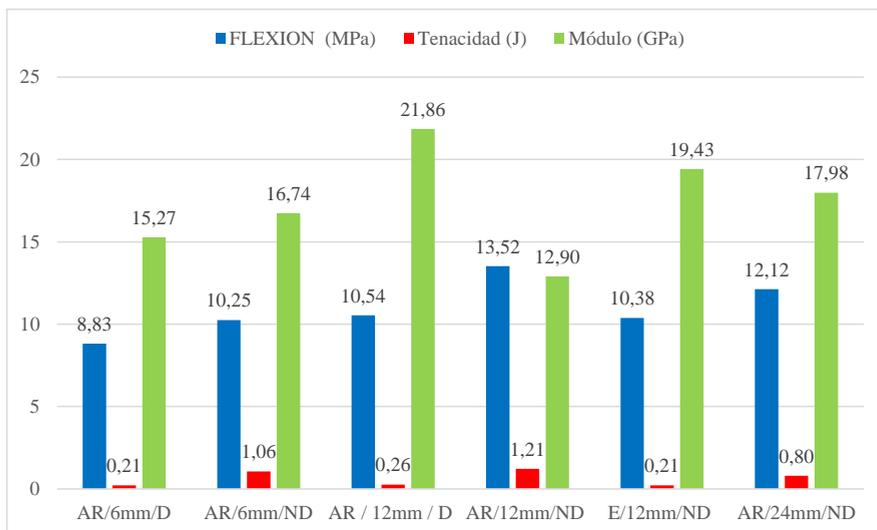


Figura 4.3.6. Propiedades mecánicas de morteros GRC con tamaño creciente de la longitud de fibra de vidrio álcali resistente (AR) y E, dispersable en agua (D) y no dispersable (ND) a 28 días de curado a 20°C.

Si evaluamos el efecto de la dispersabilidad de las fibras, se puede decir que los compuestos reforzados con fibras ND obtienen mayores resistencias, condición que coincide con los mejores resultados de tenacidad. Al estudiar la tenacidad se destacan de manera importante los compuestos con fibras AR ND de 6 y 12 mm, y en una proporción menor los reforzados con fibras AR ND de 24 mm; por el contrario, los compuestos con fibras AR D de 6 y 12mm, presentan un comportamiento similar al obtenido por la fibra E ND, ligeramente superior al compuesto sin refuerzo y muy inferior a los que tienen refuerzo con fibras AR ND. Se confirma la acción eficaz como refuerzo del conjunto de filamentos agrupados en las fibras AR ND, opuesto al comportamiento de las fibras D que permiten la dispersión de muchos filamentos en la matriz que trabajan de forma individual [7]. Al evaluar los resultados para el módulo de elasticidad se puede observar que todos los compuestos presentan valores importantes, incluso superiores al compuesto reforzado con fibras AR 12 mm ND (12,9 GPa), demostrando el incremento de la rigidez de los compuestos; se destaca de forma notoria el elevado módulo obtenido por el compuesto reforzado con fibras de AR 12mm D con valor de 21,86 GPa superando el rango del producto comercial (entre 10 y 20 GPa).

Si evaluamos con mayor detalle el grado de tenacidad de los compuestos (figura 4.3.7), se observa de nuevo la rotura abrupta del compuesto reforzado por fibras E, demostrando su fragilidad luego de la rotura, comportamiento similar para el compuesto reforzado por

fibras de AR 6 mm D. Un segundo grupo lo componen los compuestos reforzados con fibras AR 12mm D y AR 24mm ND, los cuales no presentan una rotura frágil, se observa un aporte a la tenacidad por la extracción de las fibras; este fenómeno se incrementa notablemente en el compuesto reforzado por fibras ND. El tercer grupo conformado por el refuerzo con fibras AR ND de 6 y 12mm, obtienen un comportamiento excepcional presentando un comportamiento tenaz luego de la rotura logrando un trabajo prolongado del conjunto de fibras, las cuales exhiben un proceso de “pull out” o extracción muy importante.

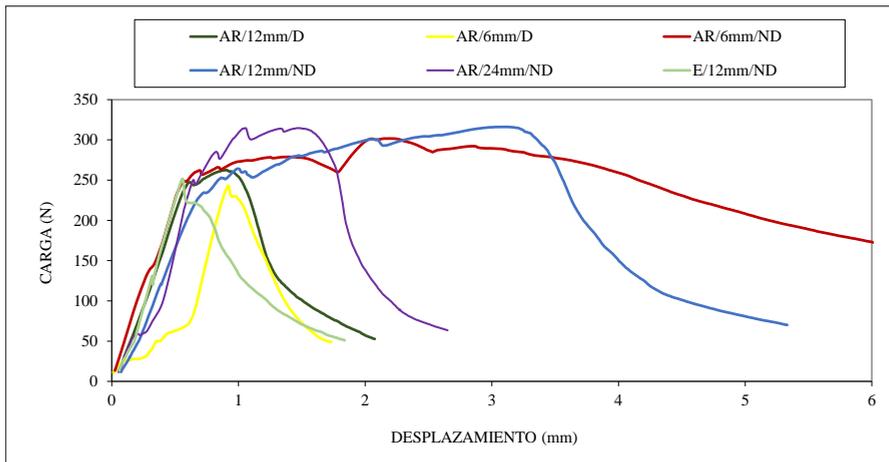


Figura 4.3.7. Curva carga (Newtons) vs desplazamiento (milímetros) de morteros GRC con tamaño creciente de la longitud de fibra de vidrio álcali resistente (AR) y E, dispersable en agua (D) y no dispersable (ND) a 28 días de curado a 20°C.

En la figura 4.3.8 se aprecia la zona de fractura de compuestos con fibras D y ND para longitudes de 6, 12 y 24 mm. Si se comparan las imágenes 4.3.10 a y b, correspondientes a fibras D y ND de 6 mm respectivamente, para el caso de las D se identifican pocas fibras extraídas de la matriz, caso contrario las fibras ND que demuestran múltiples fibras en forma de ramillete de filamentos después de ser extraídos de la matriz; esta evidencia coincide con el mejor comportamiento mecánico de la matriz con fibras ND de 6 mm. En las imágenes 4.3.8 c y d se presenta la zona de fractura de matrices con fibras ND de 12 y 24 mm, para estos casos se identifica una situación similar a la matriz con fibras ND de 6mm, fibras extraídas y no cortadas coincidiendo con el mejor comportamiento mecánico.

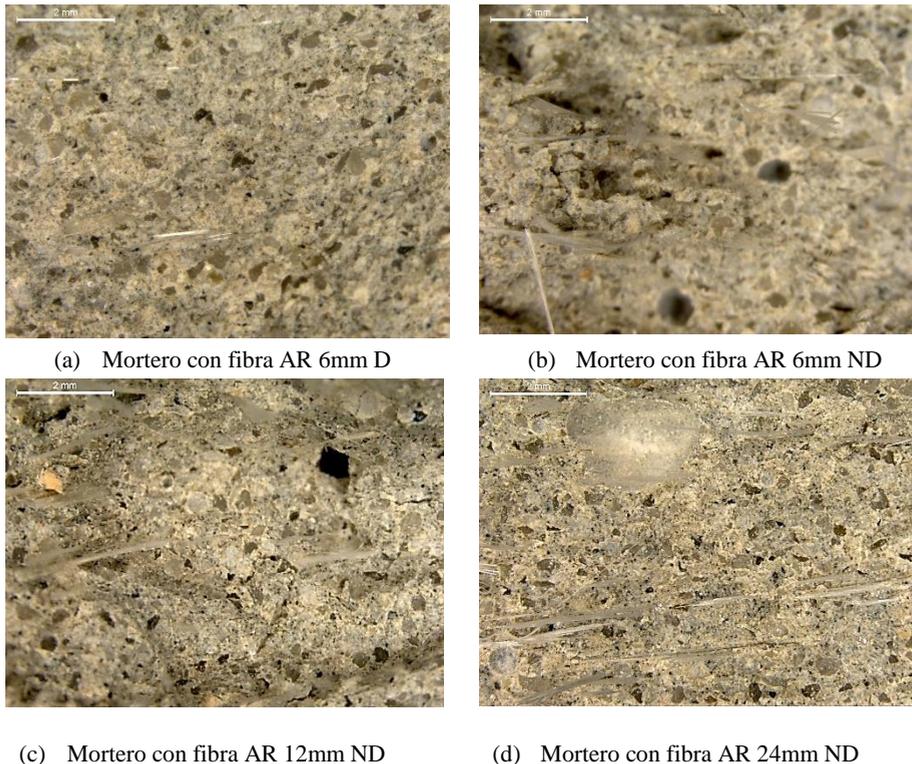


Figura 4.3.8. Fotografías microscopio óptico zona de fractura de morteros GRC con fibras AR D y ND de 6mm y ND de 12 y 24 mm.

En la figura 4.3.9 se evalúa el comportamiento mecánico de los compuestos de GRC para diferentes tamaños de fibra y sus mezclas. Los compuestos reforzados por las mezclas fibras AR 6mm 50%D-50%ND, AR 12mm 50%D-50%ND, AR 6mm 50%D – 12mm 50%ND y AR 12mm 50%D – 24mm ND, presentan resistencias a la flexión entre 9 y 11 MPa, seguidas por el compuesto reforzado por la mezcla fibras AR 12mm 50%ND - 24mm 50%ND, ubicándose por debajo de la referencia comercial del GRC. Se destaca el compuesto reforzado con la mezcla fibra AR 6mm 50% ND - 12mm 50% ND con el valor más elevado de resistencia (14,46 MPa) de todos los compuestos estudiados. Se confirman los resultados obtenidos para el grupo de compuestos anteriormente estudiado, la presencia de fibras ND genera un mejor comportamiento mecánico relacionado con el trabajo en conjunto de los filamentos de la fibra. Al evaluar los resultados para el módulo de elasticidad se puede observar que todos los compuestos presentan valores en el rango esperado (10 a 20 GPa), incluso superando al compuesto reforzado convencional con fibras 12 mm AR ND (12,9 GPa), demostrando el incremento de la rigidez de los compuestos.

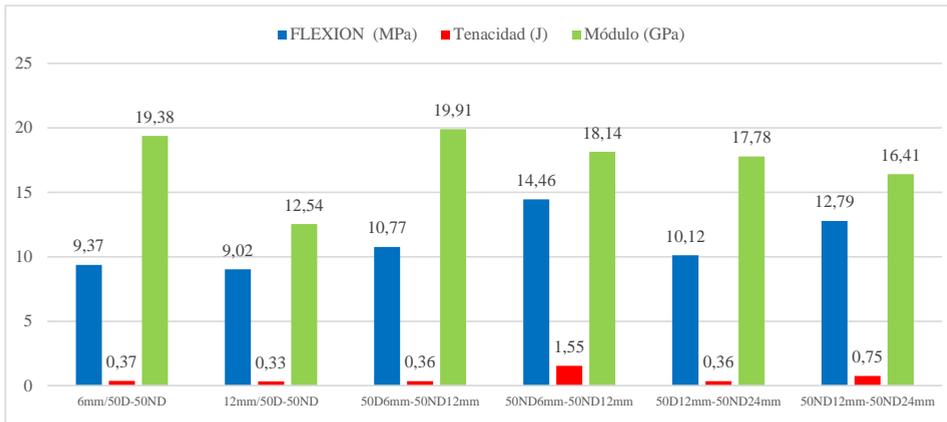


Figura 4.3.9. Propiedades mecánicas de morteros GRC con tamaño creciente de longitud y mezcla de fibras álcali resistente (AR), dispersable en agua (D) y no dispersable (ND) a 28 días de curado a 20°C.

En la figura 4.3.10 se aprecia la zona de fractura compuestos con mezcla de fibras D y ND para longitudes de 12 y 24 mm. La imagen 4.3.10a corresponde a la mezcla de fibras AR de 12mm (D y ND), se identifican fibras extraídas en la parte superior y algunos filamentos dispersos en la matriz que en su mayoría deben estar cortados, factor que coincide con las bajas prestaciones mecánicas para este compuesto. Por el caso contrario la imagen 4.3.10b presenta la mezcla de fibras AR 12mm 50%ND - 24mm 50%ND, en la cual se observan múltiples filamentos que debido a su extracción de la matriz beneficiaron las propiedades mecánicas del compuesto.



(a) Mortero con mezcla de fibras AR 12mm 50%D-50%ND



(b) Mortero con mezcla de fibras AR ND 12mm y 24mm

Figura 4.3.10. Fotografías microscopio óptico zona de fractura de morteros GRC con mezcla de fibras AR D y ND de 12 y mezcla fibras AR ND de 12 y 24 mm.

En la figura 4.3.11 se presenta la curva carga vs desplazamiento. En este caso no se observa la rotura abrupta en los compuestos estudiados, en general se observa una fractura dúctil para todas las mezclas estudiadas y luego de la rotura logran un proceso de pull out

o extracción muy importante. Esto es consecuencia de la presencia de al menos una fracción de fibras de tipo ND. Se destacan de forma notable los compuestos reforzados por la mezcla de fibras AR de 6 -12 mm y la mezcla de 12 – 24 mm, los cuales demuestran un alto grado de tenacidad.

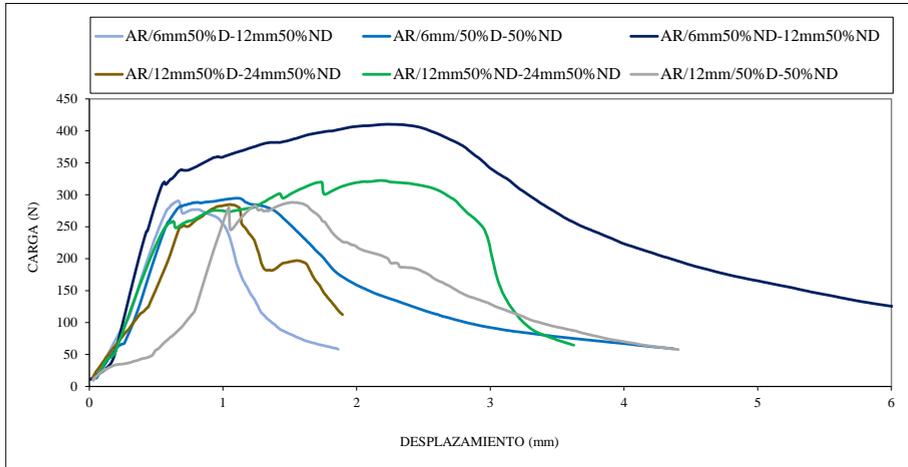


Figura 4.3.11. Curva carga (Newtons) vs desplazamiento (milímetros) de morteros GRC con tamaño creciente de longitud y mezcla de fibras de vidrio álcali resistente (AR), dispersable en agua (D) y no dispersable (ND) a 28 días de curado a 20°C.

4.3.2 Efecto del Envejecimiento sobre compuestos de GRC con mezcla de fibras

Después del estudio realizado sobre morteros de GRC premezclado con diferentes tipos de fibras AR y su mezcla, se seleccionan los compuestos que demuestran mejor comportamiento mecánico para someterlos a envejecimiento acelerado y así evaluar su respuesta (en el capítulo 4.2 se determinó que los compuestos de GRC sufren un deterioro importante de las propiedades mecánicas con el envejecimiento).

En la figura 4.3.12 se muestra la resistencia a flexión de los morteros seleccionados debido a su mejor comportamiento; los valores de la izquierda durante el curado presentan resistencias a flexión similares, destacándose levemente el mortero con la mezcla AR 6mm 50%ND – 12mm 50%ND. Después de 28 días de envejecimiento (derecha) las resistencias de todos los morteros presentan una pérdida aproximada de 3 MPa, destacándose nuevamente el mortero con la mezcla de fibras al 50%.

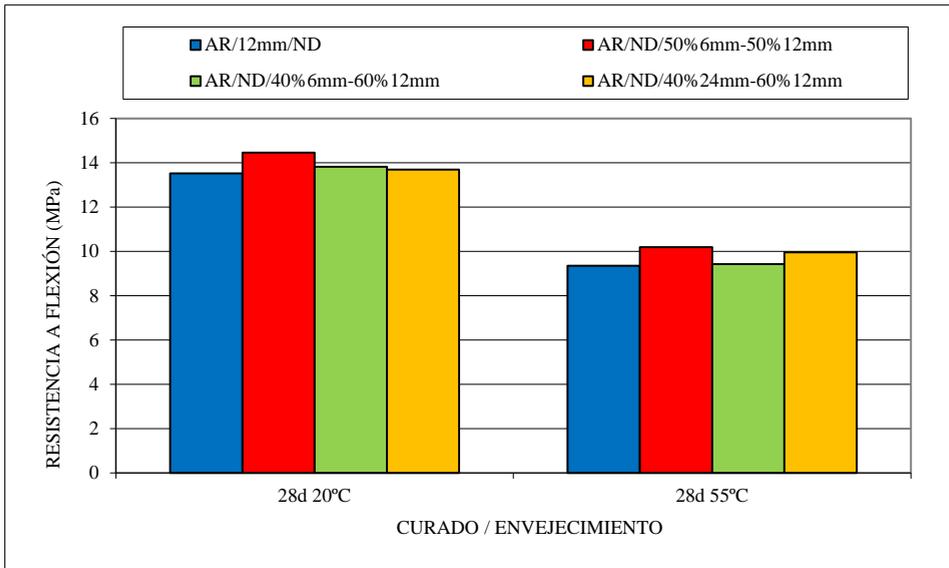


Figura 4.3.12. Resistencia a flexión morteros GRC seleccionados con fibras de 6 – 12 y 24 mm no dispersables (ND): antes y después de envejecimiento.

En la figura 4.3.13 se aprecia la tenacidad de los morteros seleccionados debido a su mejor comportamiento antes del envejecimiento. Se destacan de manera importante los compuestos con mezcla de fibras de 6 y 12mm, especialmente la mezcla al 50%. En cambio, los compuestos con fibra de 12mm y su mezcla con la de 24mm presentan magnitudes importantes pero menores. Estos resultados ponen de manifiesto la importante aportación que hacen las fibras de 6mm especialmente para mejorar la tenacidad antes del envejecimiento. El trabajo realizado por cada fibra durante el agrietamiento incrementará la absorción de energía aumentando la tenacidad, cuando el volumen de fibras y su distribución es adecuado; después del agrietamiento de la matriz, el compuesto puede resistir, debido a la acción de las fibras, cargas menores a la de rotura (se generará un comportamiento dúctil), o pueden resistir cargas mayores (se generará un comportamiento tenaz) [4] [7].

Estas cualidades se ven disminuidas de forma importante con el proceso de envejecimiento, la pérdida de tenacidad del compuesto se hace evidente para todas las dosificaciones si se comparan valores antes y después del envejecimiento. Aunque las fibras AR son ricas en óxido de circonio, el pH básico de la matriz de cemento Portland y la frecuente acumulación de hidróxido cálcico en los espacios entre las fibras, son factores que modifican la superficie de la fibra, su composición y la interfase fibra matriz, todo esto unido a temperaturas y humedades altas, hacen que la durabilidad de este tipo de compuestos disminuya. Es evidente que la mezcla de fibras no mejora el comportamiento frente al envejecimiento.

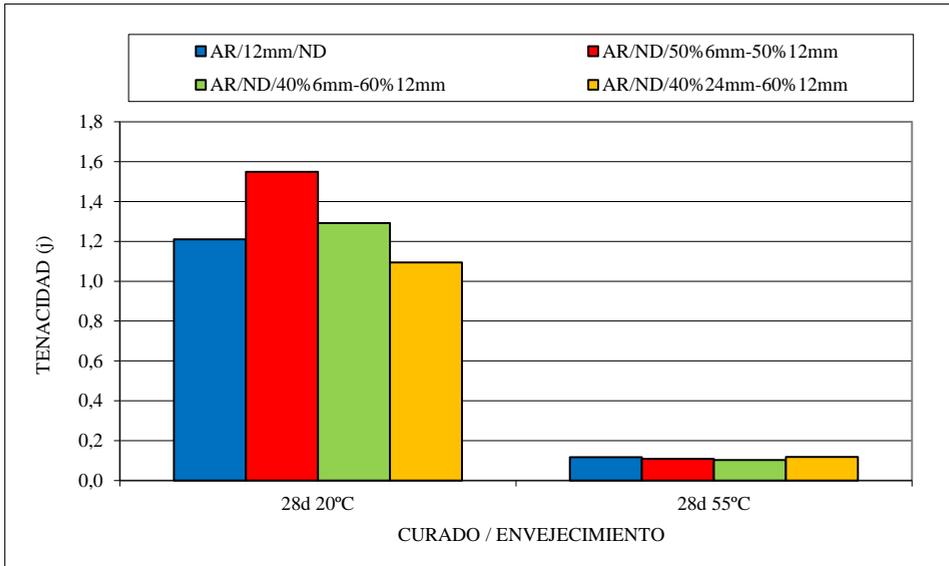


Figura 4.3.13. Tenacidad morteros de GRC seleccionados con mezclas de fibras de 6, 12 y 24 mm no dispersables (ND).

En la figura 4.3.14 se confirma mediante la curva carga vs desplazamiento el comportamiento mecánico, tanto resistencia a la flexión como tenacidad para los compuestos seleccionados. Para el tiempo de curado se observa una fractura dúctil para todas las mezclas estudiadas y luego de la rotura logran un proceso de pull out o extracción importante; se aprecia en el gráfico el mayor trabajo realizado para la extracción de las fibras en el compuesto con la mezcla de fibras AR 6mm 50%ND – 12mm 50%ND, es evidente el mayor aporte a la tenacidad de las fibras más cortas de 6mm que permiten la absorción de energía antes y después de la fractura. Por el contrario, se observa como después del envejecimiento se presenta una reducción del valor máximo de carga que corresponde al módulo de rotura y se presenta una rotura abrupta en los compuestos estudiados evidencia de la fragilidad del compuesto.

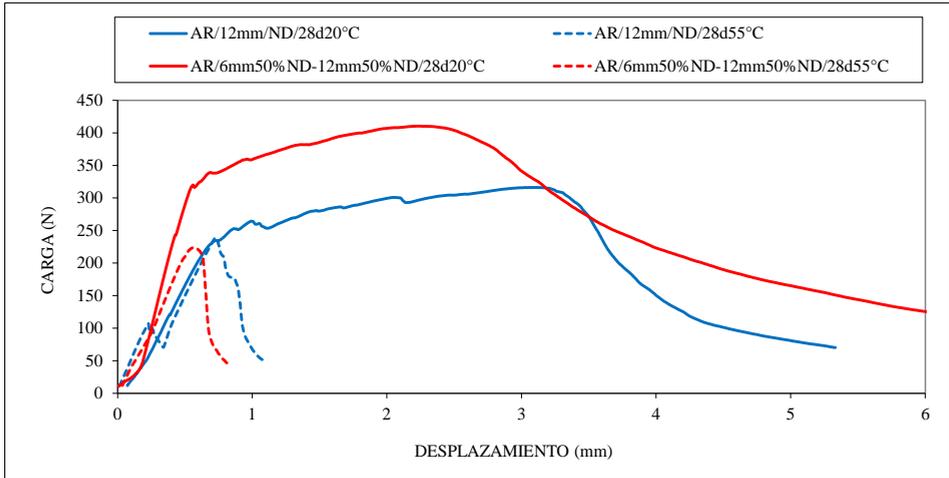


Figura 4.3.14. Curva carga (Newtons) vs desplazamiento (milímetros) de morteros GRC seleccionados con fibras de 6 – 12 y 24 mm no dispersables (ND), antes y después del envejecimiento.

En la figura 4.3.15a se presentan morteros con fibras AR ND después de ser envejecidos, se observa que las fibras sufren un nivel importante de deterioro; en la figura 4.3.15b se aprecia la presencia de portlandita entre los filamentos (cristales incrustados) y la corrosión de los filamentos (huecos o ampollas sobre la superficie). Estos factores generan la pérdida de propiedades de la fibra y su posterior rotura, evitando la absorción de energía y la mejora de resistencias.

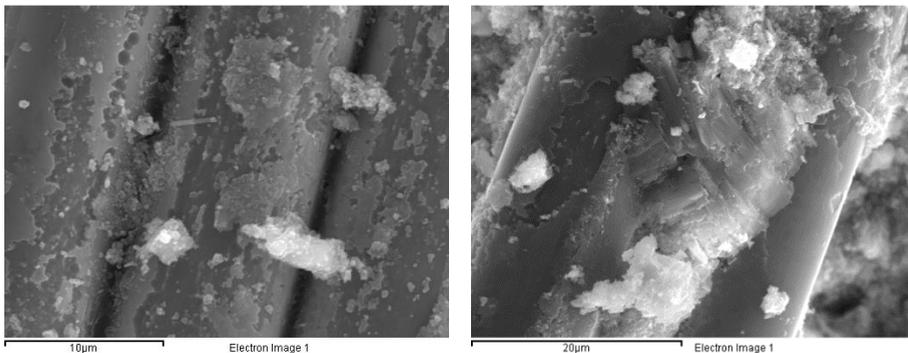


Figura 4.3.15. Fibras en morteros con fibras AR ND envejecido en agua 28 días a 55°C.

La combinación de fibras puede mejorar ligeramente las propiedades del GRC antes de envejecer, en especial de las fibras cortas para el grado de tenacidad en la mezcla de fibras AR 6mm 50%ND – 12mm 50%ND, pero con el envejecimiento no se logra evitar la caída

de la flexión ni la baja de tenacidad. El siguiente paso es averiguar si las adiciones minerales pueden contribuir positivamente a esta causa.

4.3.3. Morteros con diferentes fibras y adición de CV

Los materiales compuestos, como se ha comentado anteriormente, son elementos fabricados con el objeto de mejorar las propiedades que cada uno de sus componentes presentan por separado, o bien generar o activar características no aprovechadas para un mejor comportamiento. Con la sustitución parcial del cemento por puzolanas activas en los morteros de GRC, se busca mejorar las propiedades de la matriz cementante, para evitar el deterioro de la fibra álcali resistente, incrementando así la durabilidad de los elementos fabricados con morteros de GRC. Al sustituir parte del cemento por la ceniza volante “CV”, que es una puzolana que reacciona a tiempos largos con el hidróxido cálcico [8], se pretende generar una mayor cantidad de silicatos, aluminatos y silicoaluminatos cálcicos hidratados, y disminuir el porcentaje de portlandita presente alrededor de las fibras, la cual contribuye a alterar su naturaleza; también se reduce el calor de hidratación de la mezcla cementante evitando así problemas por fenómenos térmicos; y se incrementa además la trabajabilidad de la mezcla debido al efecto lubricante de la CV, por estar formada por partículas en su mayor parte esféricas, compactas y lisas [9].

Las propiedades aportadas por la CV aún se ven incrementadas por el tratamiento de molienda de estas (CV molida durante 20 minutos), incrementando su superficie específica; todas estas características permiten mejorar el estado de la interfase fibra matriz cementante [8]. El deterioro de las propiedades depende en gran medida de la composición de la matriz, con la adición de ceniza volante la fibra permanece en buenas condiciones después del envejecimiento, favoreciendo además de sus características mecánicas, Los morteros con sustitución de cemento por ceniza volante tienen resistencias a flexión menores que el GRC convencional (control) luego de 28 días de curado al ser sometidos a procesos de envejecimiento, el control disminuye sus propiedades mecánicas, en cambio los morteros con sustitución mejoran.

La combinación de fibras puede mejorar ligeramente las propiedades del GRC, pero con el envejecimiento no se logra evitar la caída en la resistencia a flexión y la tenacidad. En el apartado anterior se evaluó el comportamiento mecánico de compuestos con diferentes tipos de fibras a 28 días de curado, el mejor comportamiento lo obtuvo el compuesto reforzado con la mezcla de fibras AR 6mm 50%ND – 12mm 50%ND (R_f 14,46MPa - Ten. 1,55J), incluso superando al compuesto convencional reforzado con fibras AR de 12 mm ND. El trabajo siguiente consiste en estudiar si las adiciones minerales activas, en este caso la ceniza volante molida durante 40 minutos y con un porcentaje de sustitución

del 60% de cemento (CVm), que puede contribuir positivamente en la mejora del comportamiento mecánico de los compuestos después del envejecimiento.

En la figura 4.3.16 se muestra el comportamiento mecánico de los morteros de GRC sin y con CVm, con fibras AR-ND de 12mm y su mezcla con fibras AR-ND de 6mm, a los 28 días de curado y después del tratamiento de envejecimiento a 55°C. Después del curado, los valores de resistencia de los morteros puzolánicos son significativamente menores que los obtenidos por los morteros sin sustitución, debido a la menor cantidad de cemento presente por la sustitución por CVm. La resistencia a flexión obtenida por los morteros con sustitución por un 60%CVm después del proceso de envejecimiento es mayor que la que presentan los morteros sin sustitución. Este hecho es notorio ya que a mayores edades se facilita la creación de productos hidratados provenientes de la reacción de la CVm con el hidróxido cálcico presente en la matriz (parte de él, situado entre las fibras).

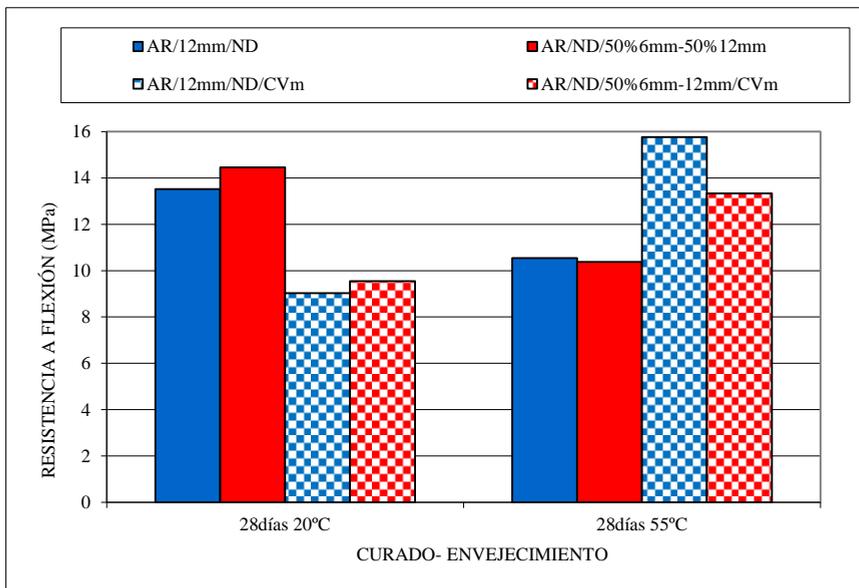


Figura 4.3.16. Resistencia a flexión de morteros de GRC con fibras ND de 12mm y la mezcla 6-12 mm, sin y con sustitución por CVm, antes y después del envejecimiento.

Se aprecia en la figura 4.3.17 la tenacidad de los compuestos de GRC con sustitución por CVm. Al final del curado (valores de la izquierda) los compuestos con fibra AR 12mm ND de con y sin CVm, presentan valores menores a los compuestos con mezcla de fibras AR 6mm 50%ND – 12mm 50%ND con y sin CVm, diferencia notoria para el mortero con fibra AR-ND de 12mm y CVm debido a la sustitución puzolánica. Es importante resaltar el efecto que se genera en el mortero con mezcla de fibras AR y CVm, este compuesto se ve favorecido por la interacción entre la matriz cementante y las fibras de

6mm, las cuales pueden actuar como microfibras que generan puentes más efectivos sobre las microfisuras, provocando un grado de tenacidad incluso levemente superior al compuesto sin CVm [6].

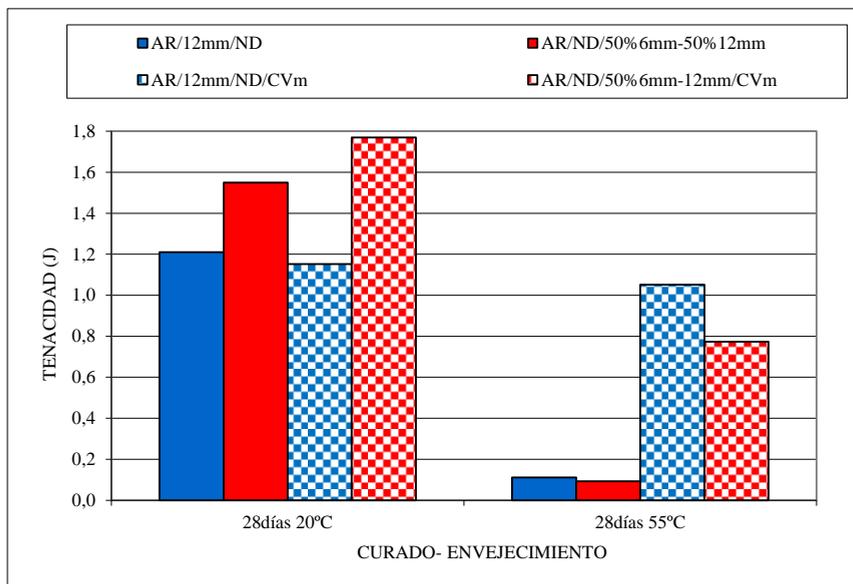


Figura 4.3.17. Tenacidad de morteros de GRC con fibras ND de 12mm y la mezcla 6-12 mm, sin y con sustitución por CVm.

Por otra parte, el comportamiento después del proceso de envejecimiento cambia notablemente, los compuestos que no contienen puzolanas disminuyen su tenacidad a valores cercanos al cero. En cambio, los morteros puzolánicos, aunque disminuyen, siguen manteniendo valores importantes. Cabe resaltar que se presenta una disminución de la tenacidad para el mortero con mezcla de fibras AR-ND y CVm respecto del mortero con fibra AR-ND de 12mm y CVm.

En la figura 4.3.18 se confirma mediante la curva carga vs desplazamiento el comportamiento mecánico, tanto la resistencia a la flexión como tenacidad para los compuestos seleccionados. Para el tiempo de curado se observa una fractura dúctil de los compuestos y luego de la rotura logran un proceso de pull out o extracción importante, en especial para el compuesto con sustitución puzolánica se aprecia el mayor trabajo realizado para la extracción de las fibras, aunque el valor obtenido para la carga máxima es menor debido a la sustitución del cemento por ceniza volante. Después del envejecimiento se presenta una rotura abrupta en el compuesto sin sustitución lo cual demuestra su gran fragilidad; contrario a esto se observa un incremento del valor máximo de carga para el compuesto puzolánico superando incluso la resistencia del compuesto;

además, se aprecia una rotura frágil de los compuestos, aunque luego de la rotura se aprecia un trabajo y extracción de las fibras similar para ambos compuestos.

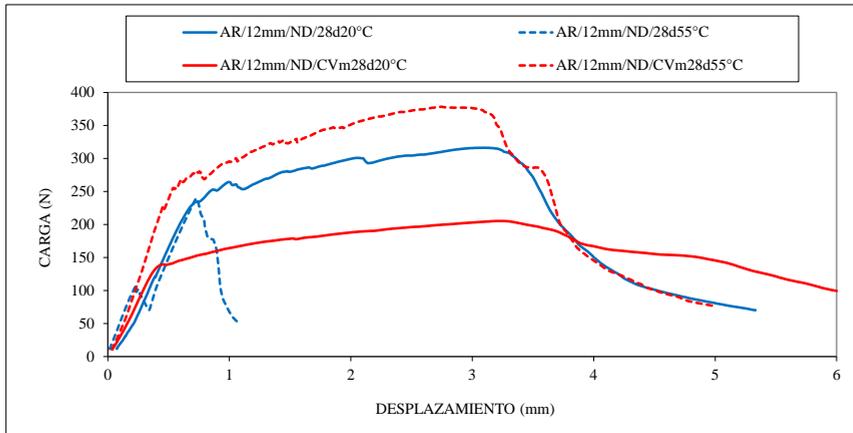


Figura 4.3.18. Curva carga (Newtons) vs desplazamiento (milímetros) de morteros GRC con fibras ND de 12mm con sustitución por CVm envejecidos en agua 28 días a 55°C.

En la figura 4.3.19, se aprecian fotografías de los morteros con sustitución por CVm después del envejecimiento. La fibra se encuentra en buen estado y no presenta perforaciones o deterioro; sobre la superficie de los filamentos se observan gran cantidad de productos hidratados, responsables de la mejora de la interfase matriz-fibra y del buen estado de los filamentos de la fibra.

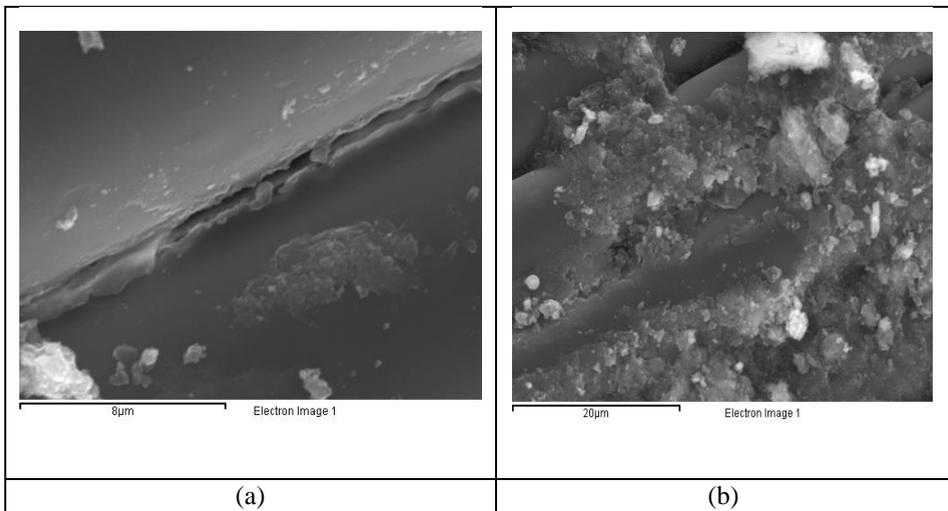


Figura 4.3.19. Morteros de GRC con fibras ND de 12mm (a) y la mezcla 6-12 mm (b) con sustitución de cemento por CVm, después del envejecimiento durante 28 días a 55°C.

4.3.4. Conclusiones

4.3.4.1. Propiedades mecánicas y envejecimiento

- Se confirma la diferencia significativa en la resistencia a flexión y el grado de tenacidad, entre el mortero sin fibras y el mortero de GRC con fibras de 12mm, el cual presenta un incremento considerable en las propiedades mecánicas.
- Se aprecia la pérdida de propiedades del mortero fabricado con fibra E-ND de 12mm respecto al mortero con fibra AR-ND de 12mm, esto es debido al deterioro que sufre la fibra E en el ambiente alcalino de la matriz cementante.
- Se observa una disminución importante de las propiedades para las diferentes longitudes de fibra cuando se trata de las fibras dispersables (D).
- En general para todos los morteros, el valor del módulo de elasticidad se encuentra en el rango especificado por el fabricante para el material (10-20 GPa), además se aprecia un incremento importante de la tenacidad al utilizar fibras de 6mm ND solas o en mezclas con fibras de 12mm ND.
- Los morteros con mezcla de fibras AR-ND de diferentes longitudes, durante el curado, presentan resistencias a flexión similares. Si evaluamos el grado de tenacidad, destacan de manera importante los compuestos con mezcla de fibras de 6 y 12mm. Estas cualidades se ven disminuidas apreciablemente con el proceso de envejecimiento.
- La combinación de fibras puede mejorar ligeramente las propiedades del GRC antes de envejecer, es por eso por lo que las mejores propiedades las presentan los morteros con mezcla de fibras de 6 - 12 mm y 12 - 24 mm, aunque con el envejecimiento no se logra evitar la caída en la resistencia a flexión ni la baja tenacidad.

4.3.4.2. Morteros con diferentes fibras y adición de CV

- El efecto puzolánico de la CVm, permite que la resistencia a flexión mejore con el tiempo, incluso al someter los morteros a procesos de envejecimiento. La CVm, al estar molida aumenta su superficie específica y contribuye a la formación de una matriz más densa, por la generación de productos hidratados provenientes de la combinación con el hidróxido cálcico presente entre las fibras, favoreciendo notablemente el buen estado de la fibra después de 28 días de envejecimiento a 55°C.
- Si evaluamos la tenacidad de los morteros de GRC, los compuestos que no contienen puzolanas disminuyen su tenacidad a valores cercanos al cero, con el envejecimiento; en cambio los morteros puzolánicos siguen manteniendo valores significativos.

- Es importante resaltar el efecto que se genera al final del curado en el mortero con mezcla de fibras AR y CVm, el compuesto se ve favorecido por la interacción entre la matriz cementante y las fibras de 6mm, las cuales pueden actuar como microfibras que generan puentes más efectivos sobre las microfisuras, provocando un grado de tenacidad incluso levemente superior que el compuesto sin CVm; este efecto disminuye con el envejecimiento.
- En definitiva, la mezcla de fibras mejora el comportamiento mecánico de los compuestos, pero éste se ve afectado de forma importante con el envejecimiento. Contrario a esto, la mezcla de fibras con CVm, representa mejoras importantes para la resistencia a la flexión y, aunque en menor magnitud, para la tenacidad de los compuestos.

4.3.5. **Bibliografía**

1. Norma UNE-EN 1170-5: 1998. Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de la resistencia a flexión, método denominada ensayo completo a flexión.
2. P. Antequera, L. Jiménez, A. Miravete. *“Los Materiales Compuestos de Fibra de Vidrio”*. Secretariado de publicaciones, 2000, Universidad de Zaragoza.
3. *“Cem-FIL Reinforcement”*. Catálogo de fibras AR. Saint-Gobain, Vetrotex S.A.
4. C. P. Ostertag, CK. Yi. *“Crack/fiber interaction and crack growth resistance behavior in microfiber reinforced mortar specimens”*. Materials and structures, 40, 2007, 679-691.
5. J.S. Lawler, D. Zampini, S.P. Shah. *“Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load”*. ACI Materials Journal, vol. 99, nº 4, 2002, 379-385.
6. M. Butler, S. Hempel, V. Mechtcherine. *“Modelling of ageing effects on crack-bridging behaviour of AR-glass multifilament yarns embedded in cement-based matrix”*. Cement and Concrete Research, 41, 2011, 403-411.
7. P. Purnell, A.J. Buchanan, N.R. Short, C.L. Page, A.J. Majumbar. *“Determination of bond strength in glass fibre reinforced cement using petrography and image analysis”*. Journal of materials science, 35, 2000, 4653-4659.
8. F. Amahjour. *“Estudio de la reactividad de las puzolanas artificiales: cenizas volantes y humo de sílice y su reutilización en ingeniería civil”*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2000.

4.4. GRC Premezclado y Adiciones Activas: propiedades mecánicas y envejecimiento acelerado

En el apartado anterior se concluye que la combinación de fibras puede mejorar ligeramente las propiedades del GRC antes de envejecer, pero con el envejecimiento no se logra evitar la caída en la resistencia a flexión ni la baja tenacidad, comportamiento similar al que presenta el mortero de GRC con fibras AR de 12mm no dispersables (mortero que se toma como referencia del GRC comercial). En sentido contrario, cuando los compuestos por fibras AR de 12mm y su mezcla con fibras de 6mm son mezclados con un porcentaje importante de una adición mineral activa como la ceniza volante molida, se aprecia un incremento importante de la resistencia mecánica después del envejecimiento; por este motivo, el planteamiento que se desarrolla en este apartado consiste en estudiar si las adiciones minerales pueden contribuir positivamente en la mejora de las propiedades mecánicas de los compuestos de GRC premezclado, incluso después de ser sometidos a procesos de envejecimiento. Se fabricaron probetas 1x5x22.5cm de morteros de GRC premezclado, compuestas por los siguientes materiales:

- ✘ Cemento Pórtland tipo CEM I 52,5R, para disminuir su estándar de resistencia a 42,5R, se adiciona un 25% en peso de filler calizo.
- ✘ Ceniza volante tipo F según la clasificación ASTM C-618 molida durante 40 minutos (CVm) según características y procedimiento descrito en epígrafes 4.1.1.4 y 3.2.1 respectivamente.
- ✘ Humo de sílice sonicado (HSS) según características y procedimiento descrito en epígrafes 4.1.1.4 y 3.2.7 respectivamente.
- ✘ Árido silíceo AFA80, con un módulo de finura de 3,1.
- ✘ Fibras de vidrio álcali resistentes (AR) no dispersables en medio acuoso de 12mm. Contenido de fibra del 3% respecto al peso total del mortero.
- ✘ Superplastificante Melment L240.
- ✘ Relación agua/material cementante de 0,35, constante para todos los morteros.
- ✘ Relación árido/material cementante de 0,67, constante para todos los morteros.

En la tabla 4.4.1 se detalla la dosificación empleada en la fabricación de los morteros de GRC.

Tabla 4.4.1. Dosificación morteros de GRC fabricados (valores en gr).

Porcentaje sustitución	Cemento CEM I 52,5R	Filler calizo	Sustitución puzolánica	Árido silíceo AFA80	Fibra AR ND 12 mm	Aditivo Melment L240	Agua de amasado
0%	1153,7	384,6	0	1025,5	93	15,4	529,8
60% CVm40min	461,5	153,8	923	1025,5	93	12,3	531,6
10%HSS- 50% CVm40min	461,5	153,8	153,8-769,1	1025,5	93	20	527

Las probetas se elaboraron de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1170-5 [1], el curado de los morteros se realizó en cámara húmeda durante 28 días sumergidos en agua; luego las dosificaciones seleccionadas fueron sometidas a un proceso de envejecimiento controlado (sumergidas en agua a 55°C). En este caso se ha llegado a tiempos de envejecimiento de 70 días, equivalentes según algunos autores a 7000 días o 19,5 años (ver epígrafe 3.2.10). Para el análisis del comportamiento mecánico se inicia con el módulo de rotura (MOR) que corresponde a la resistencia máxima a flexión calculado de acuerdo con la expresión que se muestra en la tabla 4.4.2.

Tabla 4.4.2. Resistencia a flexión según norma UNE-EN 1170-5:1998.

MOR (MPa, N/mm ²)	$R_f \approx \frac{F_f * l}{(b * d^2)}$	<i>F_f</i> : Carga rotura (N) <i>l</i> : Distancia entre apoyos (mm) <i>b</i> : Ancho (mm) <i>d</i> : Espesor (mm)
----------------------------------	---	---

A partir de la curva carga vs desplazamiento (figura 4.4.1), se determinan las siguientes variables: módulo de elasticidad en MPa, correspondiente al tramo elástico de la curva; la carga correspondiente en el límite de proporcionalidad (LOP), punto aproximado donde se genera la primera fisura, donde el compuesto inicia el cambio de un comportamiento elástico a plástico; la carga correspondiente en el módulo de rotura (MOR), que representa el punto de carga máxima donde se genera la rotura de la probeta; la tenacidad, correspondiente a la energía en Julios (J) que absorbe un material hasta romperse, representada como el área bajo la curva carga-flecha hasta que la carga máxima disminuya en un 80%; finalmente, se extrae la flecha o desplazamiento generado durante la aplicación de la carga.

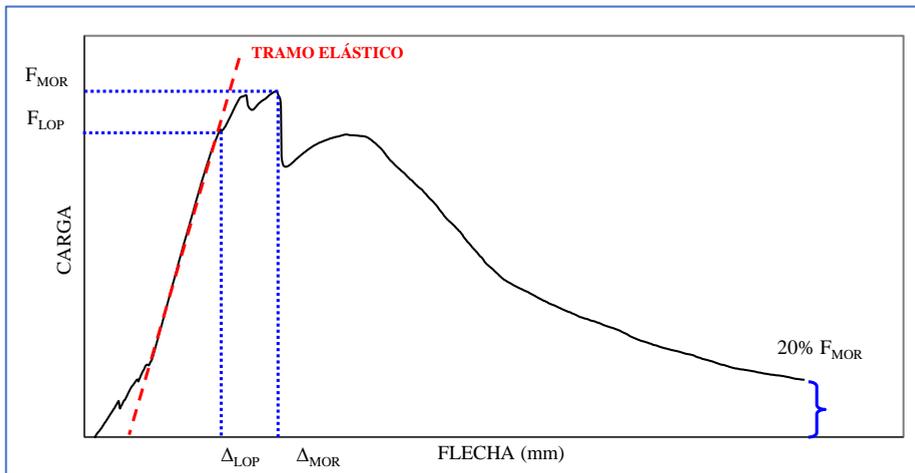


Figura 4.4.1. Curva Carga vs. Flecha (desplazamiento) [1].

Adicionalmente se propone el uso de índices específicos de resistencia (ver figura 3.9 en apartado 3.2.8.2) para determinar el efecto puzolánico y el grado de ganancia de resistencia de los morteros; además, permiten diferenciar el aporte a la resistencia por el efecto puzolánico y por la hidratación del cemento [2]. Para el estudio de la resistencia al impacto se utilizaron dos métodos de ensayo:

- El primer método fue utilizando el péndulo Izod, permite cuantificar un valor indicativo de la fragilidad o la resistencia a los choques del material ensayado en kJ/m^2 según la norma UNE-EN ISO 180:2001 [3].
- El segundo método consiste en sostener mediante un electroimán, una esfera de acero y dejarla caer sobre la cara superior de la probeta, la cual debe estar apoyada y correctamente nivelada sobre una cama de arena; se controla el número de impactos necesarios para producir la primera fisura en la cara inferior y la rotura, en este caso cuando se obtiene una fisura que atraviese completamente la superficie de la probeta y con una apertura mayor a 1mm.

4.4.1. Propiedades mecánicas

El gran número de materiales compuestos que existen en la actualidad, se han creado para obtener mejoras en la combinación de propiedades mecánicas tales como rigidez, tenacidad y resistencia a la tracción y flexión, en condiciones ambientales normales y a elevadas temperaturas. Las propiedades de los compuestos son función de las propiedades de las fases, de sus proporciones relativas y de la forma, tamaño, distribución y orientación de la fase dispersa. La fase dispersa presenta generalmente mayor dureza y resistencia que la matriz, las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la matriz, en nuestro caso estas partículas son las fibras; es decir, la matriz transfiere el esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga [4]. Sin embargo, temperaturas y humedades altas pueden afectar su comportamiento; el medio altamente alcalino y la frecuente acumulación de cristales hidróxido cálcico en los espacios entre las fibras son factores que contrarrestan las condiciones de durabilidad de este tipo de morteros, generalmente por el deterioro de las fibras [5].

Al sustituir parcialmente el cemento por puzolanas activas como la ceniza volante “CV”, se busca mejorar las propiedades de la matriz cementante evitando el deterioro de la fibra álcali resistente, incrementando así la durabilidad; se busca incrementar la cantidad de silicatos, aluminatos y silico aluminatos cálcicos hidratados y disminuir el porcentaje de portlandita presente alrededor de las fibras, para contribuir a la disminución de la alcalinidad de matriz [6]. Se utiliza CV molida ya que el proceso de molienda incrementa las propiedades aportadas por la CV a la matriz por el incremento de su superficie específica; todas estas características permiten mejorar el estado de la interfase fibra matriz cementante [7]. El porcentaje de sustitución de cemento por CV se fija en 60%.

Por otra parte, se conoce que la reactividad puzolánica de la CV se da a largo plazo dentro de la matriz cementante, de modo que puede ser interesante incluir alguna puzolana complementaria para compensar ese efecto.

Por ello, una opción es la combinación de la CV con humo de sílice (HS). Este HS suele presentar buena reactividad puzolánica a tiempos cortos, lo que favorece el desarrollo de la matriz cementante a edades tempranas de curado. Sin embargo, usualmente el HS comercial viene en forma densificada (HSD), lo cual reduce de forma significativa su reactividad. Es por ello por lo que se propone el uso del humo de sílice sonicado (HSS), producido a partir de la sonicación en medio acuoso del HSD. Se ha limitado el porcentaje del 10% de HSS con respecto al cemento de la mezcla control, de modo que la cantidad total de puzolana queda también en el 60%.

En la tabla 4.4.3 se presentan los resultados generales para cada propiedad y se especifican los prototipos estudiados. Se ha analizado el comportamiento de los tres tipos de composites (control, 60%CVm40min y 10%HSS-50%CVm40min) a temperatura ambiente (28 y 365 días de curado) y de los materiales envejecidos a 55°C previamente curados 28 días (28, 42, 56 y 70 días de envejecimiento).

Tabla 4.4.3. Propiedades mecánicas morteros de GRC curados a 20° y envejecidos a 55°C.

DESCRIPCIÓN MORTERO	Días		MOR		GG	GCEP %	GCH %	Tenacidad		Módulo elasticidad	
	20°C	55°C	MPa	σ				(J)	σ	(GPa)	σ
CONTROL	28	0	12,79	1,33	1	0	100	1,35	0,44	17,56	3,59
60%CVm40min	28	0	9,2	0,45	1,80	44,4	55,6	1,17	0,51	9,97	1,6
10%HSS-50%CVm40min	28	0	9,48	1,46	1,86	46	54	1,48	0,39	10,58	1,67
CONTROL	360	0	9,94	1,38	1	0	100	0,11	0,07	21,46	1,07
60%CVm40min	360	0	14,78	1,43	3,72	73,1	26,9	1,28	0,52	11,38	4,56
10%HSS-50%CVm40min	360	0	13,87	1,67	3,49	71,3	28,7	1,53	0,59	13,24	2,18
CONTROL	28	28	11,31	0,51	1	0	100	0,13	0,02	17,63	1,57
60%CVm40min	28	28	16,67	1,1	3,68	72,9	27,1	1,54	0,43	18,72	3,79
10%HSS-50%CVm40min	28	28	16,92	2,17	3,74	73,3	26,7	1,51	0,69	17,89	2,11
CONTROL	28	42	9,56	0,88	1	0	100	0,09	0,02	18,69	1,8
60%CVm40min	28	42	15,13	1,34	3,96	74,7	25,3	1,07	0,37	20,65	4,01
10%HSS-50%CVm40min	28	42	15,77	0,45	4,13	75,8	24,2	1,11	0,25	20,45	3,18
CONTROL	28	56	10,09	1,24	1	0	100	0,08	0,01	18,1	1,3
60%CVm40min	28	56	14,76	1,18	3,66	72,7	27,3	0,75	0,18	20,91	2,61
10%HSS-50%CVm40min	28	56	13,54	1,90	3,36	70,2	29,8	0,67	0,21	19,88	2,62
CONTROL	28	70	9,14	0,78	1	0	100	0,07	0,01	17,56	1,72
60%CVm40min	28	70	13,78	2,14	3,77	73,5	26,5	0,71	0,56	18,98	1,73
10%HSS-50%CVm40min	28	70	13,5	1,46	3,69	72,9	27,1	0,64	0,16	19,2	1,33

4.4.1.1. Módulo de rotura

Se estudia el comportamiento a flexión de los compuestos mediante la evaluación del módulo de rotura (MOR), el grado de ganancia y el grado de contribución tanto por la hidratación del cemento (GCH) como por efecto puzolánico (GCEP).

Si evaluamos la figura 4.4.2, observamos que al final de los 28 días de curado el compuesto control presenta valores superiores a los compuestos puzolánicos, sin embargo, este valor disminuye de 12,79 a 9,94 MPa luego de 360 días a 20°C; caso contrario los compuestos puzolánicos que a los 28 días de curado presentan valores de MOR inferiores al control, pero al cumplir los 360 días este valor se incrementa cerca de 4,5 MPa respecto al control. Una vez iniciado el proceso de envejecimiento, el control es ampliamente superado por los compuestos puzolánicos, hecho que se conserva durante todo el proceso de envejecimiento. Sin embargo, se presenta una disminución progresiva de las resistencias de los morteros puzolánicos a mayores edades de envejecimiento, aunque siempre hasta valores superiores al máximo obtenido por el mortero control (al final del curado).

En el caso de la combinación de las dos puzolanas, no existe una diferencia significativa con respecto a los composites que contienen 60% de CV. Aparentemente, no hay una ventaja adicional por el hecho de que el HSS sea más reactivo que la CV. Ello puede ser debido a que la mezcla que se prepara tiene un porcentaje muy elevado de sustitución, de modo que es baja la cantidad de portlandita liberada en la hidratación del cemento Portland.

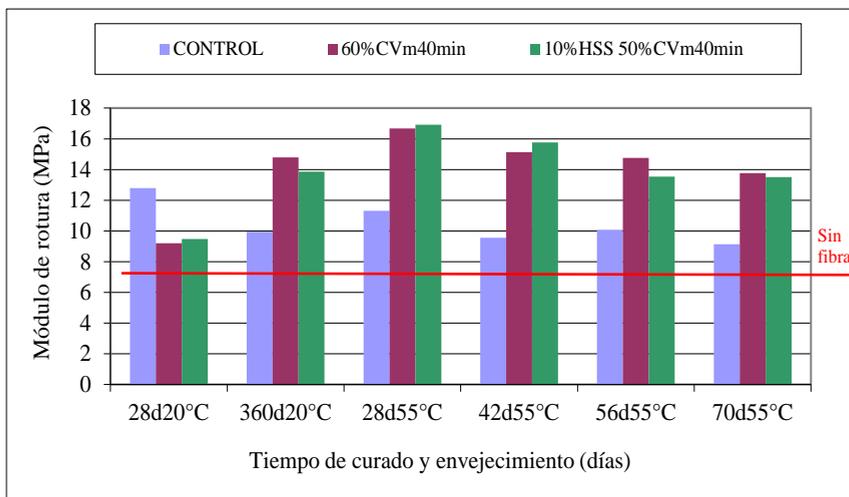


Figura 4.4.2. Módulo de rotura (MOR) compuestos de GRC curados a 20° y envejecidos a 55°C.

Si evaluamos el grado de ganancia (GG) de los morteros puzolánicos (figura 4.4.3), observamos cómo incluso desde el curado se obtienen valores superiores en más de un 50% aproximadamente que el control, esto debido al elevado porcentaje de sustitución de cemento Pórtland por los materiales puzolánicos descritos; valores que se incrementan de forma sorprendente con ganancias que pasan de 1,8 a 3,5 para los 360 días de curado.

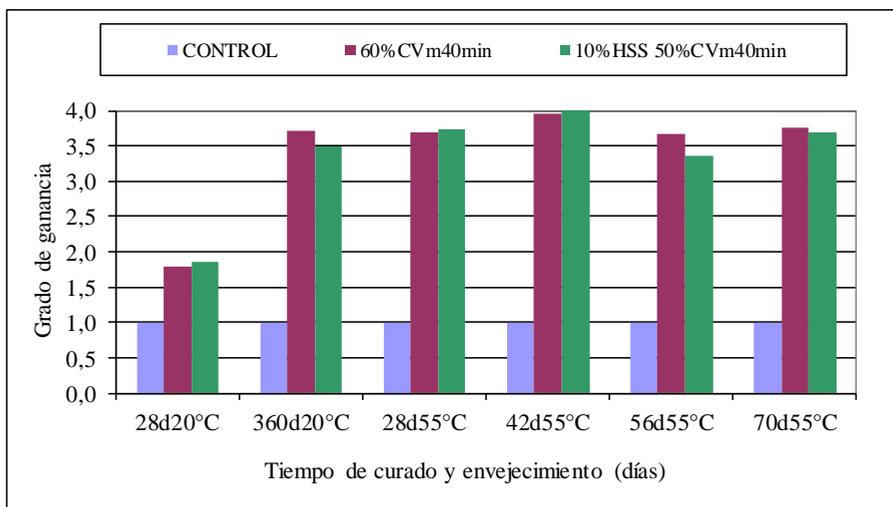


Figura 4.4.3. Grado de ganancia de compuestos de GRC curados a 20° y envejecidos en agua a 55°C.

Con el proceso de envejecimiento controlado durante 28 días, se conserva la ganancia de resistencia debido a la elevada actividad puzolánica presente en la matriz, inicialmente se observa una ligera diferencia entre el compuesto con CVm y el compuesto con la mezcla HSS-CVm, con el tiempo de envejecimiento el comportamiento se iguala y lo más importante, se sostiene en el tiempo incluso hasta los 70 días de proceso (equivalente a 7000 días o 19,5 años en condiciones de curado normales).

En la figura 4.4.4 se observa el grado de contribución a la resistencia de los morteros, las resistencias obtenidas por el mortero control se deben en su totalidad a la hidratación del cemento; en cambio, para los composites con puzolanas, el grado de contribución del efecto puzolánico es mayor que el de la hidratación del cemento. De acuerdo con esto, los morteros que presentan sustitución disminuyen el grado de contribución por la hidratación del cemento y su resistencia dependerá en gran parte del efecto puzolánico de la adición. Para tanto para el compuesto con CVm y la mezcla HSS-CVm, se observa para los 360 días de curado y para todo el tiempo de envejecimiento que más del 70% de la resistencia se debe al efecto puzolánico.

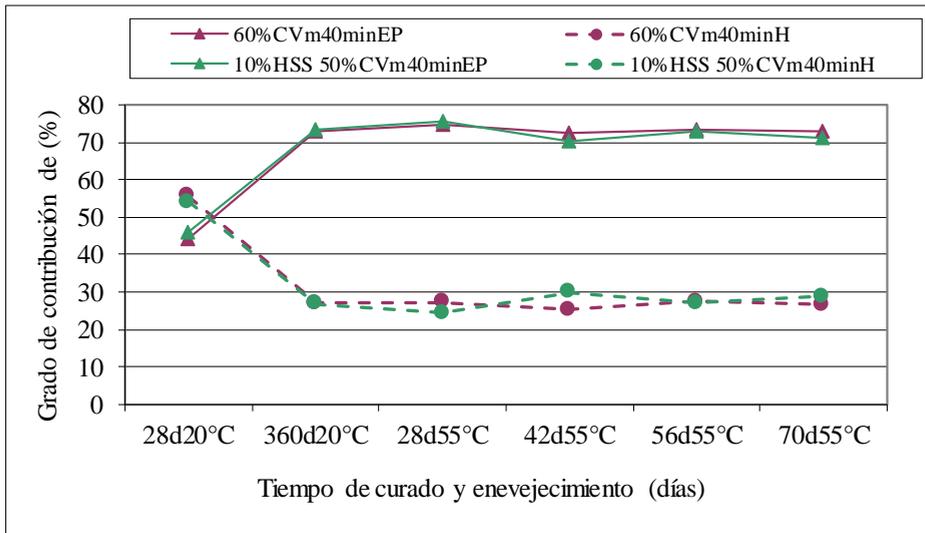


Figura 4.4.4. Grado de contribución del efecto pozzolánico (GCEP) y la hidratación del cemento (GCH) de compuestos de GRC curados a 20° y envejecidos a 55°C.

4.4.1.2. Módulo de elasticidad

En la figura 4.4.5, se observa como a los 28 días de curado el mortero control presenta valores cercanos a los 17,5 GPa, valor que se incrementa notablemente a los 360 días de curado ubicándose sobre los 21 GPa; por el contrario, para los morteros pozzolánicos se obtienen valores menores, tanto el compuesto con CVm como su mezcla con HSS obtienen un módulo a los 28 días cercano a los 10 GPa, propiedad que se ve incrementada para los 360 días de curado con valores de 11,38 y 13,24 respectivamente. Esta propiedad mejora con el tiempo de envejecimiento, período que permite que los compuestos pozzolánicos ganen en rigidez incluso superando levemente al control, el cual pierde propiedades al inicio del envejecimiento presentando un módulo de elasticidad cercano a los 17,5 GPa.

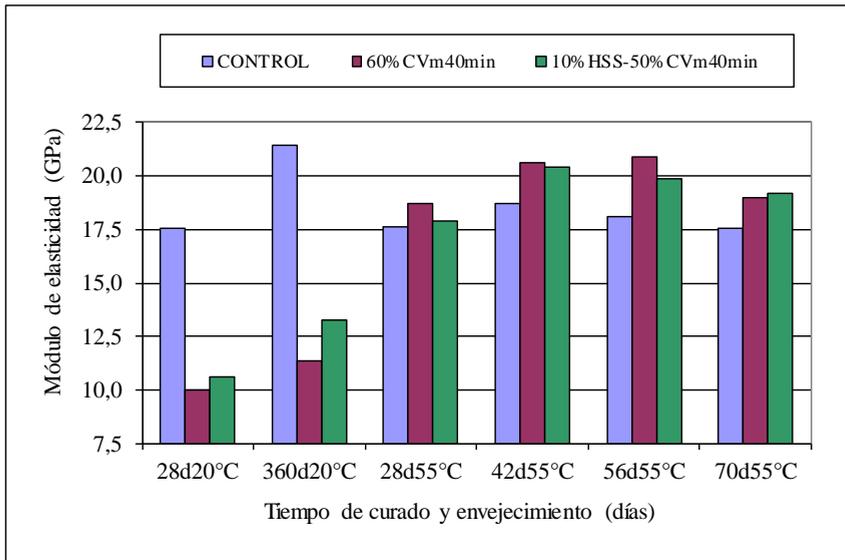


Figura 4.4.5. Módulo de elasticidad compuestos de GRC.

Las propiedades puzolánicas de la CVm y el HSS, la acción conjunta que ejerce la reacción de las puzolanas con la portlandita liberada durante la hidratación del cemento y de forma importante con la que se encuentra en la superficie de la fibra, permiten la formación de productos hidratados que benefician a la matriz cementante y fortalecen la interfase fibra-matriz; y al igual que las resistencias este comportamiento permite la obtención de valores de módulo altos en los primeros días de envejecimiento, pero más importante aún su mantenimiento en el tiempo.

En la imagen que se muestra en la figura 4.4.6 a y b se presenta la fibra AR en el compuesto control después del curado, en la 4.4.6 a se observa un deterioro superficial correspondiente a pérdida del ensimaje; además, se aprecia la acumulación de productos de hidratación entre los filamentos de la fibra correspondiente silicatos cálcicos hidratados (sitio de interés 1). La imagen 4.4.6 c y d corresponde al compuesto control después del envejecimiento, se observa una zona de ataque más grande en los filamentos de la fibra AR, es evidente que no se trata sólo de la pérdida de ensimaje sino de la pérdida de masa del filamento; se observa la acumulación de productos hidratados entre los filamentos, cristales de hidróxido cálcico (sitio de interés 2) y silicatos cálcicos hidratados (sitio de interés 3).

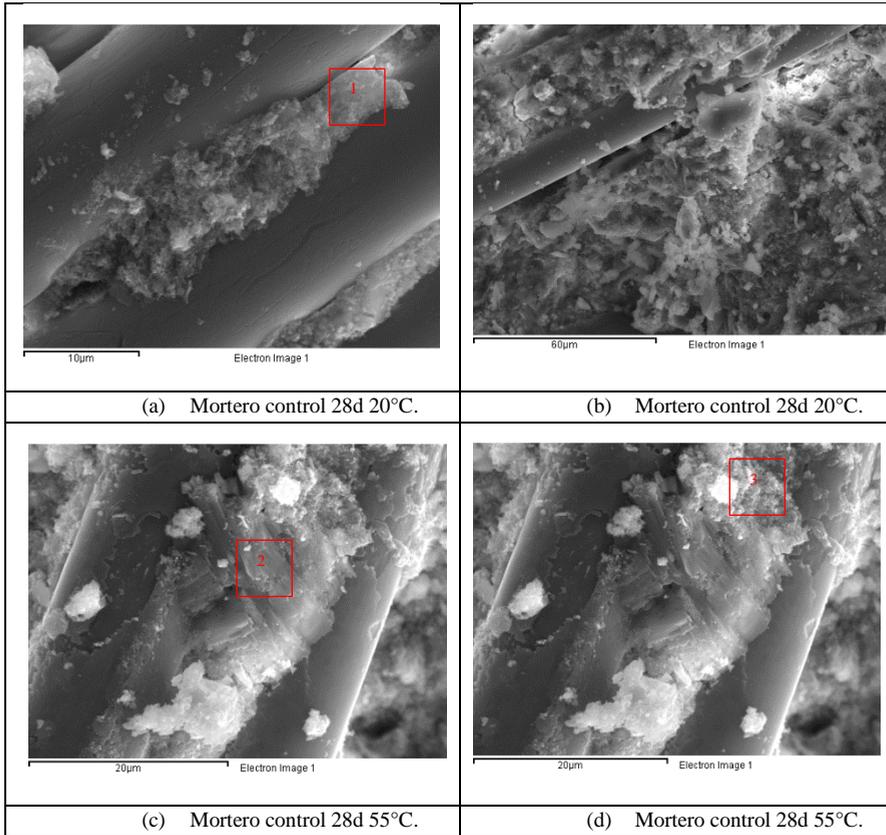


Figura 4.4.6. Imágenes de microscopio electrónico del compuesto control con y sin envejecimiento.

En la imagen que se muestra en la figura 4.4.7 se presentan fibras AR en compuestos puzolánicos envejecidos. En general, se aprecia un buen estado de las fibras. Se aprecia la acumulación de productos de hidratación en la superficie de los filamentos de la fibra en compuestos con CVm, correspondiente a silico aluminatos cálcicos hidratados (sitio de interés 1). Las imágenes 4.4.7 b y c corresponden al compuesto con HSS-CVm, se aprecia también la acumulación de productos de hidratación en la superficie de los filamentos de la fibra correspondiente silicatos cálcicos hidratados después del envejecimiento (sitios de interés 2 y 3). En estos casos la proporción de SiO_2 es mayor, probablemente porque se está incluyendo en el análisis parte de la fibra que está debajo de los productos de hidratación.

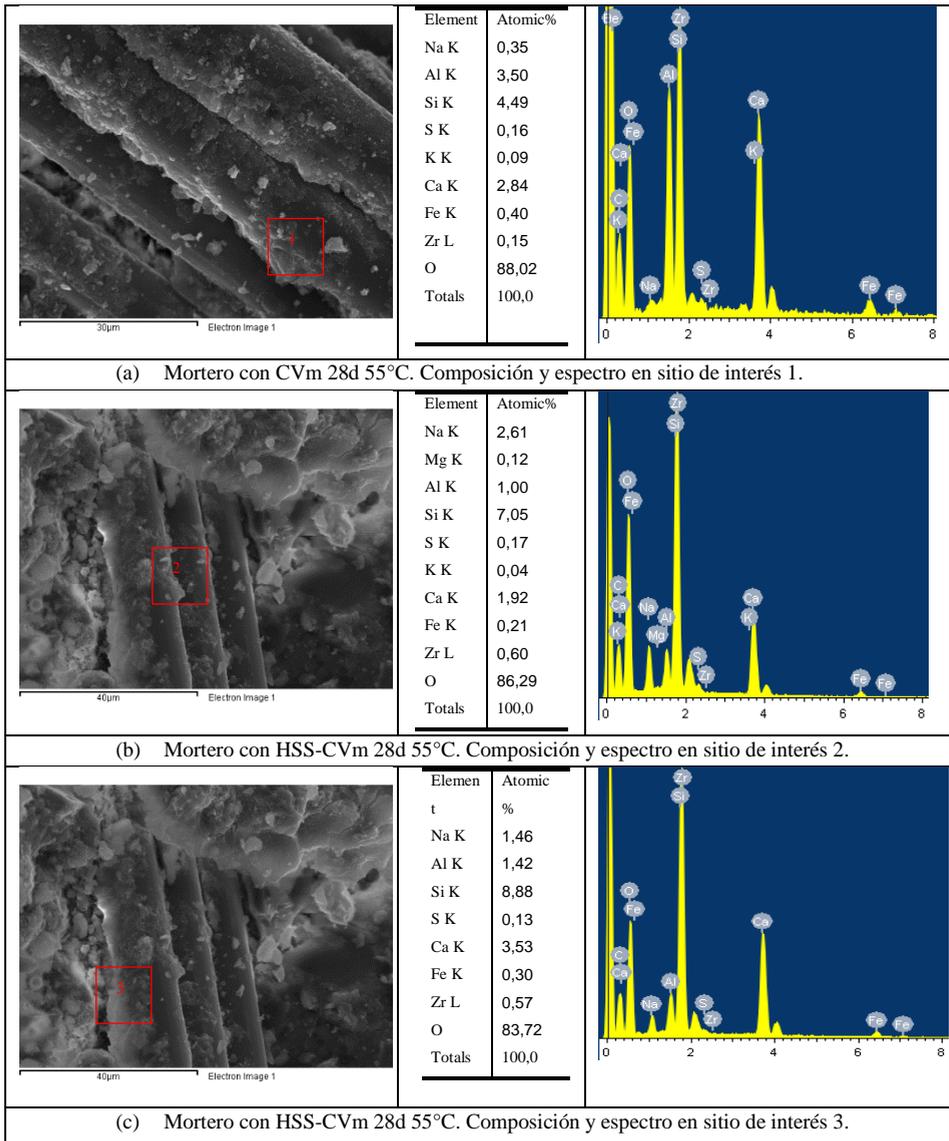


Figura 4.4.7. Imágenes de microscopio electrónico de los compuestos puzolánicos con envejecimiento.

4.4.1.3. Tenacidad

La tenacidad mide la capacidad de absorción de energía del compuesto, es una propiedad del material compuesto y su valor no sólo depende del volumen, longitud y tipo de fibra sino también de las características de la matriz [8]. Se representa en este estudio como el área bajo la curva carga-desplazamiento (figura 4.4.1), hasta un 20% del valor del módulo de rotura. De acuerdo con lo anterior, se aprecia en la figura 4.4.8 para los 28 días de

curado el compuesto control presenta valores importantes de tenacidad sólo superado por el compuesto puzolánico que contiene HSS-CVm. Para los 360 días de curado los compuestos puzolánicos incrementan levemente su tenacidad, pero se presenta un cambio notable por la drástica caída de tenacidad del control. Durante el envejecimiento a temperatura ambiente, el control disminuye su tenacidad a valores cercanos al cero (rotura frágil). En cambio, los morteros puzolánicos disminuyen su tenacidad sólo a partir de los 28 días de envejecimiento a 55°C, equivalente 8 años en condiciones de curado normal, pero manteniendo valores importantes siempre sobre el mortero control.

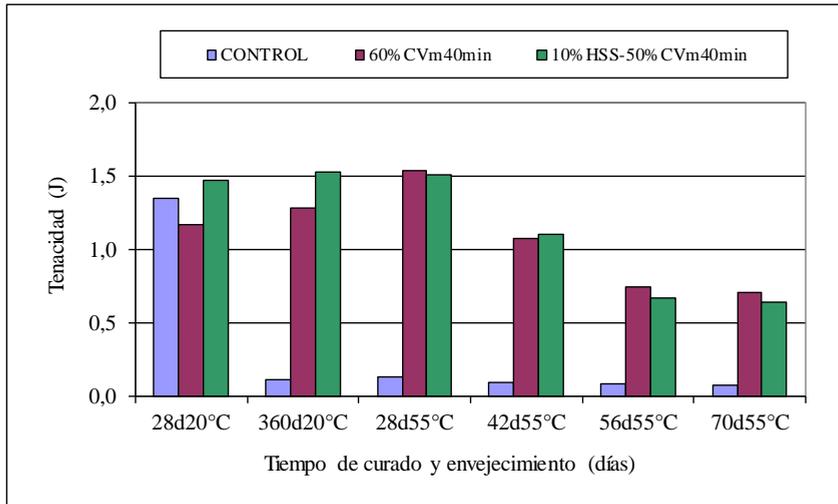


Figura 4.4.8. Tenacidad de los compuestos de GRC con el tiempo de curado y el envejecimiento.

El efecto de la tenacidad es el resultado de la interacción de la fibra y la matriz, la cual lidera la absorción de la energía en las zonas de puente-fibra generadas en la matriz, después de haber superado primero el límite de proporcionalidad (primera fisura) y luego el módulo de rotura (máxima resistencia a flexión). En este proceso se distinguen varias etapas: la ruptura de la fibra, el deslizamiento de la fibra o pull out y la pérdida de adherencia que influyen significativamente sobre el total de energía absorbida durante el proceso de propagación; el efecto puente-fibra resulta en el cierre de la fisura o en una reducción de la intensidad del esfuerzo y está relacionado con la adherencia de la fibra a la matriz [9].

Para el caso de los compuestos puzolánicos la distribución tridimensional de las fibras y la adecuada unión entre la fibra y la matriz cementante, permiten un desplazamiento progresivo de la fibra, y no un arrancamiento rápido (caso de compuestos con interfase fibra-matriz débil) o una rotura (caso de compuestos con interfase fibra-matriz excesiva o bien el deterioro de la fibra). Este hecho es favorecido por los productos de hidratación

generados, evitando la presencia excesiva de portlandita entre las fibras. A estos factores habría que añadir la menor agresividad del medio alcalino durante el proceso de envejecimiento por la reacción de la puzolana, evitando el deterioro de las fibras. Para el mortero control, la presencia de portlandita entre las fibras (cristales incrustados) y su corrosión, generan la rotura de éstas evitando la absorción de energía.

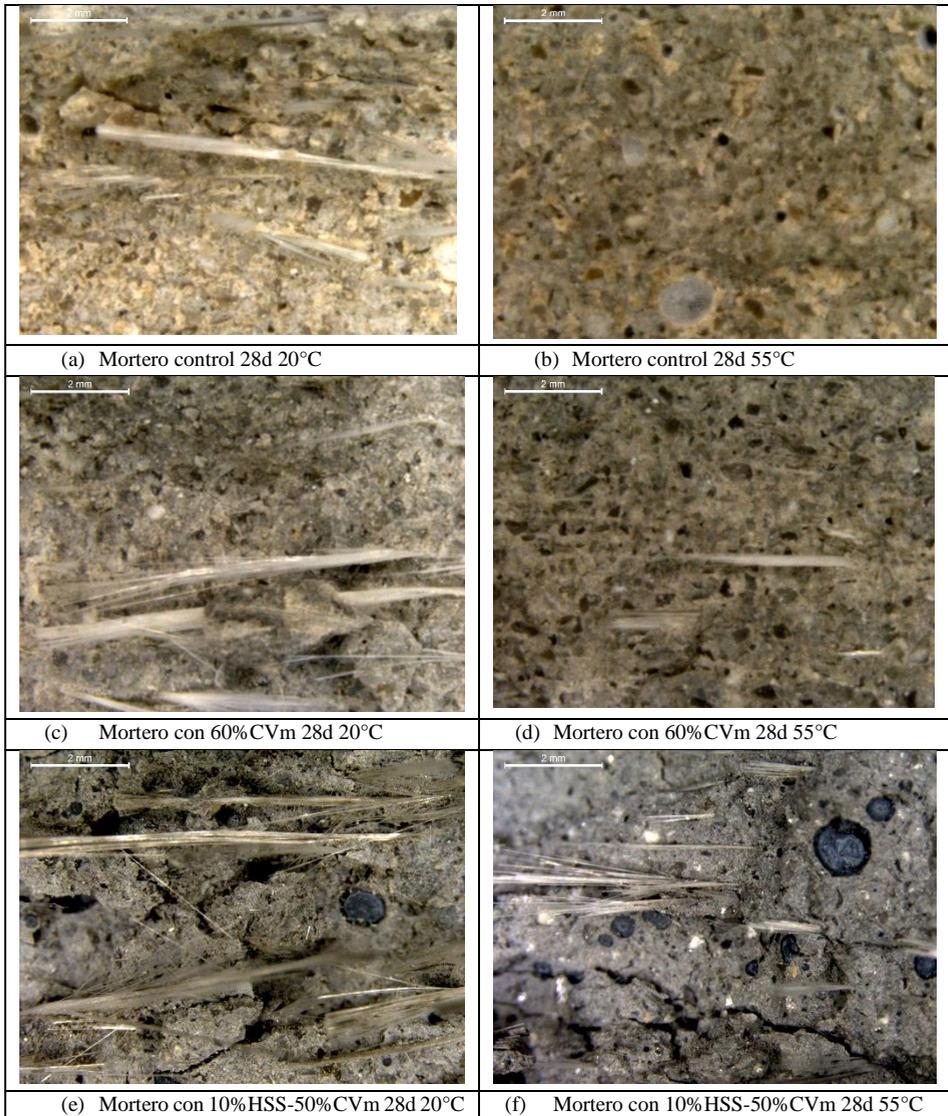


Figura 4.4.9. Fotografías microscopio óptico para la zona de fractura de morteros GRC.

En la figura 4.4.9 se aprecia la zona de fractura de compuestos con y sin adiciones; en la imagen 4.4.9a correspondiente al mortero control curado se observan una cantidad importante de fibras extraídas, algunas más cortas que otras, diferencia notable si se

compara con la imagen 4.4.9b (mortero control) envejecido en la cual no se aprecian fibras extraídas factor que coincide con la disminución en el comportamiento mecánico debido al deterioro de la fibra.

Al observar la zona de fractura en los morteros con sustitución puzolánica por CVm y la mezcla HSS-CVm curados 28 días a 20°C (imagen 4.4.9c y e respectivamente) se puede ver un número mayor de fibras extraídas de la matriz, coincidiendo con el mejor comportamiento mecánico; en ambos casos, con el envejecimiento aún se conserva un número importante de fibras que no se rompieron y se deslizaron saliendo de la matriz durante la rotura, comportamiento muy diferente al del mortero control envejecido. A continuación, se presenta el análisis de las curvas carga desplazamiento como complemento a las propiedades mecánicas estudiadas.

4.4.1.4. Análisis diagrama carga-desplazamiento

M. Butler propone que en el proceso de extracción de la fibra se pueden analizar fundamentalmente 3 zonas: zona 1, no se observan cambios macroscópicos en el compuesto; zona 2, se genera un retroceso brusco en la tensión debido al no encontrar oposición; zona 3, se genera la oposición a la tensión aplicada iniciando el proceso de extracción (Figura 4.4.10 a) [10].

Enfedaque estudia la curva tensión deformación y propone varios aspectos relacionados con su evolución (Figura 4.4.10 b) [11]:

- Los compuestos presentan un comportamiento elástico hasta el límite de proporcionalidad (LOP).
- Luego se presenta un decrecimiento de la tensión mostrando un material menos rígido, en la curva se observan pequeñas subidas y bajadas múltiples por las micro fisuras presentes contrarrestadas por la acción de las fibras.
- El proceso sigue hasta que el grado de tensión es tan alto que produce una fisura importante, visiblemente en la gráfica por un cambio de súbito de pendiente, este punto se denomina punto de quiebre (bend over point- BOP).
- La curva continúa su evolución, pero con una pendiente menor incrementando el grado de elongación relacionado directamente con la apertura de la fisura; en este punto la tensión es soportada por el efecto puente que generan las fibras. Esta zona es más larga para el GRC joven, demostrando el esfuerzo de pull out o extracción de la matriz realizado por las fibras antes de la fractura.

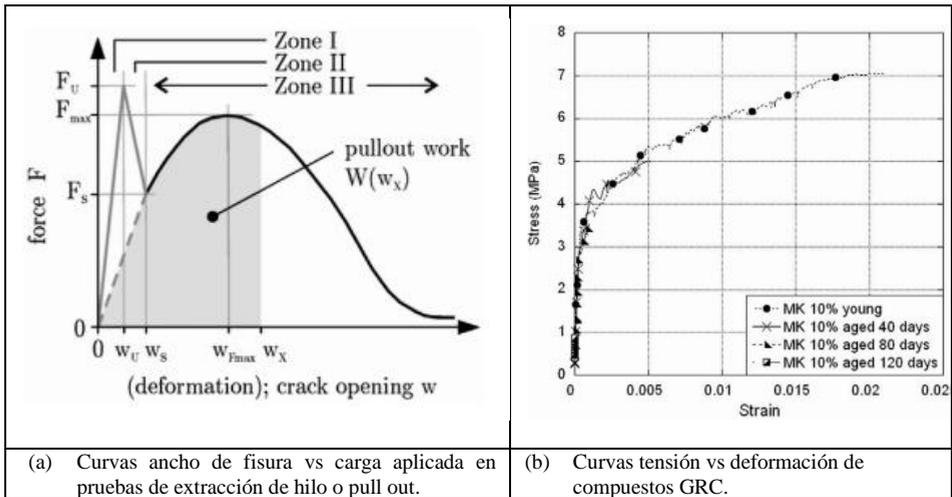


Figura 4.4.10. Proceso de extracción de la fibra: (a) Curvas ancho de fisura vs carga aplicada en pruebas de extracción de hilo o pull out. (b) Curvas tensión vs deformación de compuestos GRC.

En la figura 4.4.11 se observa el diagrama “carga-flecha” de morteros de GRC control y con sustitución puzolánica, a 28 días de curado (líneas delgadas) y después de 28 días de envejecimiento (líneas gruesas). Los datos que se muestran corresponden a la gráfica carga desplazamiento de una probeta para cada tipo de compuesto, el cual tiene 6probetas de las cuales se obtiene la media para cada propiedad. Para las gráficas comparativas de curvas, se registra la gráfica completa de la probeta más cercana al comportamiento medio, por este motivo se observan desplazamientos entre ellas y diferentes localizaciones del tramo elástico.

Se aprecia que el mortero control curado 28 días presenta un comportamiento dúctil que es característico de estos compuestos, esta cualidad se ve disminuida de forma importante con el proceso de envejecimiento al presentar una fuerte caída de la carga después del punto máximo (MOR) demostrando una fractura frágil; la pérdida de calidad del compuesto se hace evidente si observamos la diferencia notoria de la flecha antes y después del envejecimiento (2,5mm aprox.), representando una disminución clara en las propiedades del compuesto especialmente en la tenacidad como se presentará en apartados posteriores. Por otra parte, si evaluamos los compuestos con sustitución puzolánica, se aprecia que desde el proceso de curado presentan un comportamiento dúctil y desplazamientos luego de la rotura significativamente mayores al control, propiedad que se conserva después del proceso de envejecimiento, obteniendo mejoras de la resistencia a flexión, con mayor cantidad de energía absorbida, propiedad característica de un compuesto tenaz.

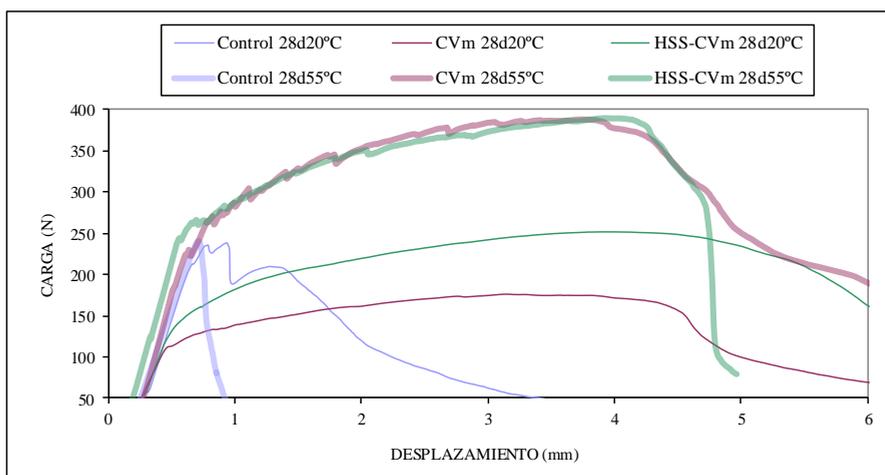


Figura 4.4.11. Curvas carga-desplazamiento de morteros de GRC con y sin envejecimiento.

Si evaluamos el comportamiento elástico de los compuestos se aprecia en las curvas que el tramo recto inicial es similar para todos los compuestos, demostrando una rigidez similar de la matriz. Sin embargo, si se evalúa el límite de proporcionalidad (LOP) el comportamiento varía: para el compuesto control las diferencias antes y después del envejecimiento no son representativas y se ubican entre 200 y 250 N; en cambio para los compuestos puzolánicos, durante el curado el LOP se ubica apenas superando los 100 N, después del envejecimiento este valor se incrementa notablemente ubicándose cerca de los 250 N superando el comportamiento del compuesto control; esto representa que la aparición de la primera fisura se retrasa para los compuestos puzolánicos hecho que permite un mayor grado de resistencia.

Si evaluamos el trabajo realizado por las fibras en cada sistema estudiado durante el agrietamiento también se observan grandes diferencias. El compuesto control después del curado muestra un trabajo moderado de las fibras que se pierde con el envejecimiento, luego de la primera fisura se observa un valor muy pequeño de desplazamiento aproximadamente a 0,3 mm hasta alcanzar la carga máxima, luego el trabajo ejercido por las fibras se ve representado por un desplazamiento de aproximadamente 2,5 mm, pero con el envejecimiento este valor decrece casi a cero. En este caso la distancia entre LOP y MOR (zona 2) es pequeña para el compuesto curado y representa una rotura con una ductilidad moderada, cuando el compuesto es envejecido la distancia es prácticamente inexistente demostrando una rotura frágil.

Para los compuestos puzolánicos el trabajo ejercido por las fibras es notable tanto para el material curado como después del envejecimiento, luego de la carga para la primera fisura se obtienen valores importantes de desplazamiento (aproximadamente 3,5 mm) hasta llegar a la carga máxima (MOR), luego de la rotura las fibras siguen efectuando un trabajo

valioso con desplazamientos adicionales de 4 mm aproximadamente, lo que demuestra la tenacidad del compuesto; para los compuestos puzolánicos el comportamiento es similar, la diferencia más notable radica en la magnitud de la carga obtenida que superó entre 100 y 150N a la obtenida antes del envejecimiento. La diferencia de carga entre el compuesto curado y el envejecido (160N y 390N respectivamente) se debe al alto porcentaje de sustitución de cemento por puzolana (60%CVm) y la moderada reacción de la CVm a edades cortas de curado; con el de envejecimiento se aumenta la reacción de la CVm generando mayor cantidad de productos hidratados que favorecen el incremento de la carga. En los morteros con sustitución por la mezcla HSS-CVm el comportamiento es similar, la diferencia se aprecia durante el curado con una carga máxima cercana a los 250N superando los 160N para el mortero con sustitución por CVm, esto se debe a la mayor reactividad del HSS (10%) a edades tempranas aportando a una mayor resistencia (figura 4.4.11).

4.4.1.5. Resistencia al impacto

La resistencia al impacto se diferencia de la tenacidad en que ésta cuantifica la cantidad de energía absorbida por un compuesto, bajo la acción de un esfuerzo progresivo, y no de un impacto. Se estudian compuestos de GRC convencional (Control) y con sustitución de cemento por puzolanas (60%CVm y la mezcla 10%HSS-50%CVm), curados 28 días y envejecidos en agua a 55°C durante 28 días (5 probetas por compuesto). Es importante mencionar que en general se obtienen datos dispersos por las características del material, por este motivo lo que presentamos son las tendencias más claras.

Primero se utilizó el péndulo Izod, que cuantifica la cantidad de energía que absorbe un material al romperse bajo la acción de un impacto por unidad de superficie de rotura (se expresa en julios por metro cuadrado, J/m²) (ver figura 3.8 en el apartado 3.2.8.3).

Se utilizó también el método de caída libre de peso, la metodología consiste en sostener mediante un electroimán una esfera de acero y dejarla caer sobre la cara superior de la probeta, la cual debe estar apoyada y correctamente nivelada sobre la superficie o un soporte; de acuerdo a los primeros resultados y para disminuir el nivel de incertidumbre se incluyó una cama de arena como apoyo para la probeta. Se controla el número de impactos necesarios para producir la primera fisura en la cara inferior y la rotura, se entiende por rotura el momento en que una fisura que atravesase completamente el espesor de la probeta, y se pueda visualizar en la superficie inferior de la misma, con una apertura mayor a 1mm.

En la figura 4.4.12 se aprecian los resultados del ensayo a impacto con el péndulo Izod de probetas de sección de 1x1 cm y 10 cm de largo para los compuestos con y sin sustitución puzolánica sometidos a envejecimiento. En general, se observan datos

agrupados en rangos de resistencia con excepción de algunos datos que se encuentran dispersos. Se aprecia como la resistencia al impacto a los 28 días de curado para las probetas de mortero control se ubica en el rango de 12 a 15 kJ/m², seguidas por las probetas con la mezcla CVm-HSS las cuales presentan una dispersión importante ubicadas en un rango de 11 a 16 kJ/m²; finalmente, las probetas con CVm que presentan menor dispersión y se ubican en el rango entre 8 a 11 kJ/m². En general, se puede afirmar que el mortero control presenta una respuesta al impacto superior a los compuestos con CVm y similar a los compuestos con HSS-CVm. Con el proceso de envejecimiento, se observa una disminución notable de la resistencia del compuesto control con valores cercanos a los 3 kJ/m², situación similar la que presenta el compuesto con la mezcla HSS-CVm que aunque disminuye presenta valores superiores al control con resistencias entre 5 y 6 kJ/m²; el compuesto con CVm aunque presenta una disminución de resistencia, ésta es menor que los demás compuestos pasando de un rango entre 8 a 11 kJ/m² a un rango entre 5 y 9 kJ/m² presentando el mejor comportamiento de los compuestos envejecidos.

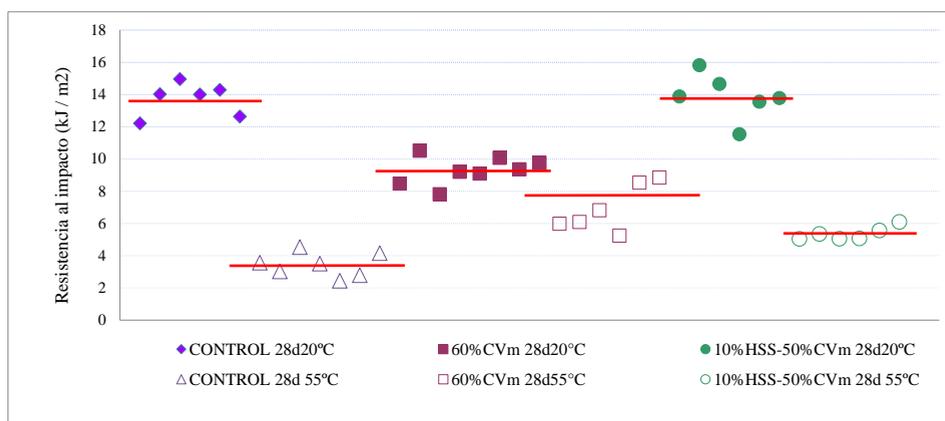


Figura 4.4.12. Resistencia al impacto Péndulo Izod, composites de GRC.

En la figura 4.4.13 se aprecia la zona de fractura de compuestos con y sin adiciones. En la imagen 4.4.13a correspondiente al mortero control curado se observan una cantidad importante de fibras extraídas (perpendiculares a la zona de fractura), algunas más cortas que otras, diferencia notable si se compara con la imagen 4.4.13b para el control después del envejecimiento, donde no se aprecia un número importante de fibras extraídas si se compara con la imagen anterior, factor que coincide con la disminución en la resistencia al impacto debido al deterioro de la fibra.

Al observar la zona de fractura en los morteros con sustitución puzolánica por CVm y la mezcla HSS-CVm curados (imagen 4.4.13c y e respectivamente) se puede ver un número importante de fibras extraídas de la matriz en diferentes direcciones, coincidiendo con el

mejor comportamiento mecánico; en ambos casos con el envejecimiento aún se conserva un número importante de fibras en buen estado que no se rompieron y se deslizaron saliendo de la matriz durante la rotura por el impacto, comportamiento muy diferente al del mortero control envejecido.

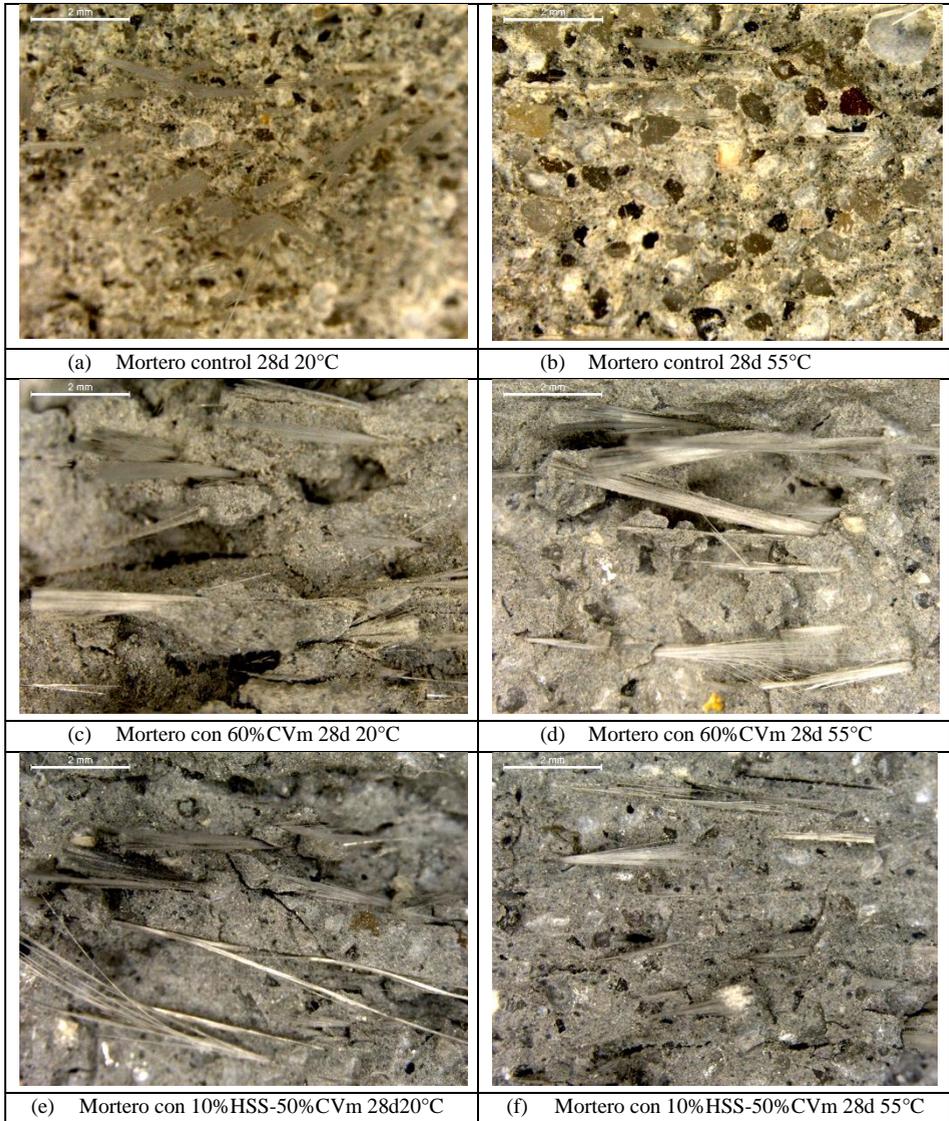


Figura 4.4.13. Fotografías microscopio óptico de la zona de fractura de morteros GRC.

Es importante anotar que se observan múltiples fisuras en la matriz de los compuestos puzolánicos después del curado comparado con el compuesto control, esto coincide con la menor resistencia de la matriz puzolánica por su menor contenido de cemento,

presentando una matriz más débil. Esta característica evidencia que la matriz en los compuestos puzolánicos después del curado se fractura primero que la fibra que es la encargada de generar la mayor oposición, además, la interfaz entre la matriz y la fibra nos es tan fuerte como en el mortero control curado o en los morteros puzolánicos después del envejecimiento, en donde la resistencia se da por la acción conjunta de fibra y matriz.

En la figura 4.4.14 se describe el comportamiento ante el impacto de una esfera de 108g sobre probetas cuadradas de 10cm de arista y espesor 1cm (curadas 28 días a 20°C y envejecidas 28 días a 55°). Al evaluar la resistencia de los compuestos curados (figura 4.4.14 izquierda), se aprecia como la primera fisura se obtiene a los cuatro impactos para el control y el mortero con CVm, el mortero con la mezcla HSS-CVm sólo necesita de uno o dos impactos para generar la fisura. Si evaluamos el momento en el que se genera la fisura completa mayor a un milímetro de grosor, observamos que se necesitan aproximadamente 35 impactos para generar esta condición en el control y la mezcla HSS-CVm, y en el caso de la CVm se llega a los 43 impactos; en general se puede decir que no existen diferencias sustanciales en este caso. Sin embargo, después del proceso de envejecimiento 28 días a 55°C (figura 4.4.14 derecha) se aprecia una variación muy importante respecto al comportamiento en el caso anterior, y es que el mortero control luego de ser envejecido pierde de forma contundente su resistencia al impacto, si se compara con su comportamiento después de ser curado y con los compuestos puzolánicos envejecidos, los cuales obtienen valores de entre 35 y 40 impactos para la fisura completa mayor a 1mm.

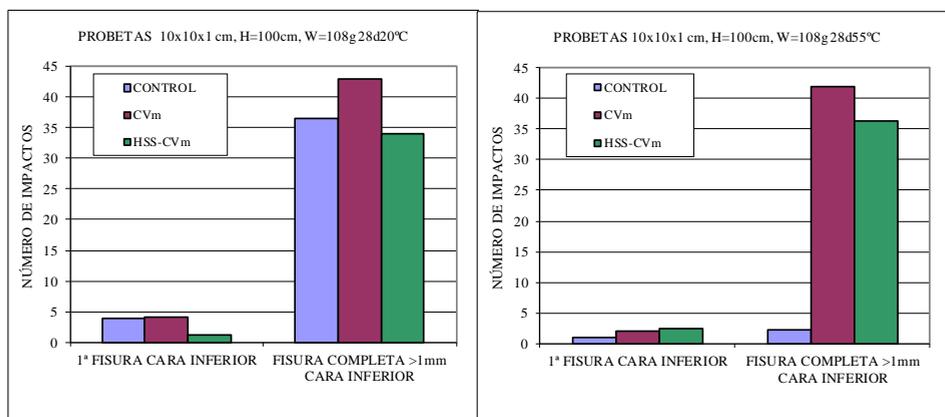


Figura 4.4.14. Resistencia al impacto de compuestos de GRC por caída de peso (esfera de 108 gr) a una altura de 100 cm sobre probetas de 10x10x1cm: izquierda, composites curados a 28 días a 20°C; derecha, composites envejecidos 28 días a 55°C.

En la figura 4.4.15 se describe el comportamiento ante el impacto de una esfera de 540g, sobre probetas cuadradas de 15 cm de arista y espesor 2cm (curadas 28 días a 20°C y envejecidas 28 días a 55°). Al evaluar la resistencia de los compuestos curados (figura

4.4.15 izquierda), el comportamiento es similar al caso de las probetas de 1cm de espesor, con la diferencia de que los compuestos puzolánicos resisten 10 impactos más que el control aproximadamente para la fisura completa mayor a 1mm. Después del proceso de envejecimiento (figura 4.4.15 derecha), el resultado es el mismo al caso anterior, el mortero control luego de ser envejecido pierde de forma contundente su resistencia al impacto; los compuestos puzolánicos lo superan rotundamente por más de 70 impactos.

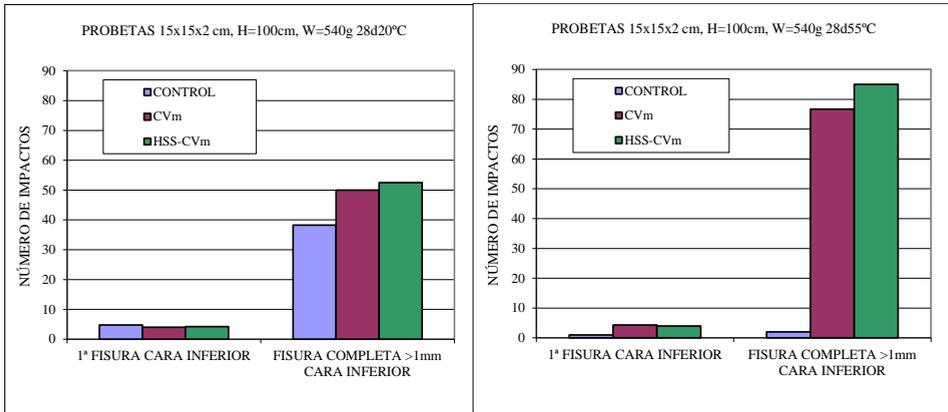


Figura 4.4.15. Resistencia al impacto de compuestos de GRC por caída de peso (540 gr) a una altura de 100 cm sobre probetas de 15x15x2cm: izquierda, composites curados a 28 días a 20°C; derecha, composites envejecidos 28 días a 55°C.

En las imágenes de la figura 4.4.16, se aprecia la evolución del proceso de fisuración de la cara inferior de probetas de 10x10cm con 1cm de espesor y la zona de impacto, al ser sometidas al impacto de la esfera de 108g en caída libre desde un metro de altura; para morteros de GRC control, con CVm y su mezcla con HSS después de ser sometidos a envejecimiento. En la figura 4.4.16a se describe la evolución para el mortero control, el cual resiste pocos impactos, los cuales son suficientes para fracturar la probeta incluso en varias direcciones y con fisuras marcadas. En las figuras 4.4.16 b y c se aprecia la respuesta de probetas de morteros puzolánicos, sobre las cuales es necesario impactar hasta 35 o 40 veces la esfera de acero; se observa la evolución clara de una sola fisura que atraviesa la superficie de la probeta, resultado de la unión progresiva de varias fisuras al interior de la matriz. Se aprecia en el centro de la probeta como se forma una huella que marca la proyección del punto de impacto de la esfera, fisurando la zona afectada; este fenómeno se observa con mayor claridad en el mortero con la mezcla de HSS-CVm.

El comportamiento de los compuestos de GRC sometidos al impacto, descrito anteriormente, confirma el hecho ya explicado de que en primer lugar se desarrollan pequeñas y discontinuas micro fisuras a través del material, pero las fibras retardan la unión de las micro fisuras para formar fisuras más grandes que generan la fractura del compuesto. Para el caso del mortero control envejecido este proceso es rápido y la fractura

se da a los primeros impactos debido a la pérdida de propiedades de la fibra; por el contrario, los morteros puzolánicos resisten mayor número de impactos incluso cuando han sido sometidos a procesos de envejecimiento.

		
Control. Impacto 1	CVm. Impacto 24	HSS-CVm. Impacto 21
		
Control. Impacto 2	CVm. Impacto 30	HSS-CVm. Impacto 26
		
Control. Impacto 3	CVm. Impacto 36	HSS-CVm. Impacto 30
		
	CVm. Impacto 42	HSS-CVm. Impacto 36
(a)	(b)	(c)

Figura 4.4.16. Evolución de las fisuras durante los impactos por caída de peso sobre compuestos de GRC envejecidos.

4.4.2. Conclusiones

- Si evaluamos el módulo de rotura de los compuestos estudiados, observamos que al final de los 28 días de curado el compuesto control presenta valores superiores a los compuestos puzolánicos. Caso contrario los compuestos puzolánicos que a los 28 días de curado presentan valores de MOR inferiores al control, pero al cumplir los 360 días este valor se incrementa notablemente superando ampliamente al control, factor que se conserva durante todo el proceso de envejecimiento hasta tiempos equivalentes a 19 años de curado, siempre presentando valores superiores al máximo obtenido por el mortero control (al final del curado).
- El mejor comportamiento de los compuestos con sustitución puzolánica se debe a varios factores: el efecto puzolánico de la CVm permite que la resistencia se mantenga en el tiempo; la actividad puzolánica de la CVm facilita la creación de productos hidratados, factor que contribuye a la formación de una matriz más densa; se genera una acción conjunta entre las reacciones de la CV y HSS, y la continua incluso después de los 28 días permitiendo la obtención de las resistencias mecánicas altas para los primeros días de envejecimiento y su mantenimiento en el tiempo.
- Si evaluamos el grado de ganancia de los morteros puzolánicos, observamos cómo incluso desde el curado se obtienen valores superiores en un 50% al control, este comportamiento se incrementa de forma notable con ganancias que pasan de 1,8 a 3,5 para los 360 días de curado. Con el proceso de envejecimiento se conserva la ganancia de resistencia debido a la elevada actividad puzolánica presente en la matriz y lo más importante, se sostiene en el tiempo incluso hasta los 70 días de proceso (equivalente a 7000 días o 19,5 años en condiciones de curado normales).
- El grado de contribución a la resistencia debido al efecto puzolánico es mayor que el de la hidratación del cemento en los morteros con estos porcentajes de sustitución altos, durante el envejecimiento más del 70% de la resistencia se debe al efecto puzolánico.
- Se observa que al final del curado el mortero control presenta valores cercanos a los 20 GPa para el módulo de elasticidad, característica que demuestra la rigidez del compuesto; por el contrario, para los morteros puzolánicos se obtienen valores menores, cercanos a los 10 GPa. Esta propiedad mejora con el tiempo de envejecimiento, período que permite que los compuestos puzolánicos ganen en rigidez incluso superando levemente al control.
- Al estudiar el diagrama “carga-flecha” de morteros de GRC control y con sustitución puzolánica, se aprecia que el mortero control curado 28 días presenta un comportamiento dúctil, cualidad que se ve disminuida de forma importante con el proceso de envejecimiento al presentar una fuerte caída de la carga

después del punto máximo (MOR) demostrando una fractura frágil. Caso contrario si evaluamos los compuestos con sustitución puzolánica, los cuales desde el proceso de curado presentan un comportamiento dúctil y desplazamientos luego de la rotura significativamente mayores al control, propiedad que se conserva después del proceso de envejecimiento, obteniendo mejoras de la resistencia a flexión, con mayor cantidad de energía absorbida, propiedad característica de un compuesto tenaz.

- Si evaluamos la tenacidad de los compuestos estudiados, concluimos que desde el final del curado el compuesto control presenta valores menores a los compuestos puzolánicos, diferencia que se incrementa de forma considerable con el tiempo de envejecimiento. Durante el envejecimiento, el control disminuye su tenacidad a valores cercanos al cero, en cambio los morteros puzolánicos disminuyen sólo a partir de los 28 días de envejecimiento, pero manteniéndose siempre con valores muy superiores al mortero control.
- Al evaluar la resistencia al impacto mediante el péndulo Izod, en general se puede comentar que el mortero control presenta una respuesta al impacto superior a los compuestos con CVm y similar a los compuestos con HSS-CVm después del curado; después del proceso de envejecimiento, el comportamiento se invierte, es así como los compuestos puzolánicos presentan mejor comportamiento siendo el más notable el que contiene CVm si se compara con el compuesto control que presenta la resistencia más baja.
- Al evaluar la zona de fractura de compuestos con y sin adiciones, en el mortero control curado se observan una cantidad importante de fibras extraídas, algunas más cortas que otras, comportamiento que cambia drásticamente después del envejecimiento ya que no se aprecia un número importante de fibras extraídas, factor que coincide con la disminución en la resistencia al impacto debido al deterioro de la fibra. Al observar la zona de fractura en los morteros con sustitución puzolánica por CVm y la mezcla HSS-CVm curados y envejecidos se puede ver un número importante de fibras en buen estado que no se rompieron y se deslizaron saliendo de la matriz durante la rotura por el impacto, comportamiento muy diferente al del mortero control envejecido.
- Después del proceso de envejecimiento se aprecia una variación muy importante de la resistencia al impacto, respecto al comportamiento del mortero control, el cual luego de ser envejecido, pierde de forma contundente esta propiedad (valores de 3 impactos para la rotura) si se compara con su comportamiento después de ser curado y con los compuestos puzolánicos envejecidos, casos en los cuales se obtienen valores de entre 35 y 40 impactos para la rotura (fisura completa mayor a 1mm).

4.4.3. *Bibliografía*

1. Norma UNE-EN 1170-5: 1998. Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de la resistencia a flexión, método denominada ensayo completo a flexión.
2. X. Pu. Investigation on pozzolanic effect of mineral additives in cement and concrete by specific strength index. *Cement and Concrete Research*. 1999; 29:
3. Norma UNE-EN 180:2007. Plásticos, determinación de la resistencia al impacto Izod (ISO 180:2000)).
4. J.C. Anderson, K.D. Leaver, R.D. Rawlings, J.M. Alexander. *Materials Science*. Editorial Limusa, 2ª edición. 1998.
5. A.H.H. Waeslisch, H. Moertel, V. Rudert. Optimisation and glass fibre reinforcement of mortars with very fine fillers. *Materials in Concrete Construction*. Proceedings of the International Seminar Held at the University of Dundee. Escocia. 2002: 324-331.
6. Y. Zhang, W. Sun, L. Shang and G. Pan. Effect of high content of fly ash on the properties of glass fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Research*. 1997; 27 (12): 1885-1891.
7. F. Amahjour. Estudio de la reactividad de las puzolanas artificiales: cenizas volantes y humo de sílice y su reutilización en ingeniería civil. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia. 2000.
8. F. Puertas, A. Gil-Maroto, M. Palacios, T. Amat. Morteros de escoria activada alcalinamente reforzados con fibra de vidrio AR. Comportamiento y propiedades. *Materiales de Construcción*. 2006; 56: 79-90.
9. S. Singh, A. Shukla, R. Brown. Pullout behavior of polypropylene fibers cementitious matrix. *Cement and Concrete Research*. 2004; 34: 1919-1925.
10. M. Butler, S. Hempel, V. Mechtcherine. Modelling of ageing effects on crack-bridging behaviour of AR-glass multifilament yarns embedded in cement-based matrix. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41: 403-411.
11. A. Enfedaque, D. Cendón, F. Gálvez, V. Sánchez-Gálvez. Analysis of glass fiber reinforced cement (GRC) fracture surfaces. *Construction and Building Materials*. 2010; 24: 1302-1308.

4.5. Compuestos de GRC y adiciones activas: envejecimiento acelerado y durabilidad

En el apartado anterior se concluye que el comportamiento mecánico de los compuestos puzolánicos a 28 días de curado es menor que el control, pero al cumplir un año de este proceso las propiedades mecánicas de los compuestos con adiciones se incrementan notablemente superando ampliamente los valores de referencia; además, se comprueba que este comportamiento se conserva durante todo el proceso de envejecimiento hasta tiempos equivalentes a 19 años de curado. Los aspectos más importantes identificados para los compuestos de GRC con sustitución puzolánica por CVm y su mezcla con HSS se resaltan a continuación:

- Al estudiar el diagrama “carga-flecha” de morteros control y con sustitución puzolánica se aprecia un comportamiento dúctil para el tiempo de curado, durante el envejecimiento el control presenta una fuerte caída de la carga después del punto máximo (MOR) demostrando una fractura frágil; caso contrario los compuestos puzolánicos presentan un comportamiento dúctil, obteniendo mejoras de la resistencia a flexión con mayor cantidad de energía absorbida, propiedad característica de un compuesto tenaz.
- Al evaluar la zona de fractura, en el mortero control curado se observan una cantidad importante de fibras extraídas, cantidad que disminuye drásticamente después del envejecimiento, factor que coincide con la disminución en la resistencia debido al deterioro de la fibra; de forma contraria, al evaluar la zona de fractura de los morteros con sustitución puzolánica curados y envejecidos, se observa un número importante de fibras en buen estado que no se rompieron y se deslizaron saliendo de la matriz.
- Finalmente, al evaluar el grado de ganancia de resistencia de los compuestos se aprecia que la contribución a la resistencia debido al efecto puzolánico es mayor que el aporte de la hidratación del cemento en los morteros con porcentajes de sustitución puzolánica altos, durante el envejecimiento más del 70% de la resistencia se debe al efecto puzolánico.

De acuerdo con la aplicación que se dé a los diferentes elementos fabricados con GRC, éstos estarán sometidos a diferentes agresiones dependiendo del medio en el que se encuentren; pueden ser afectados por agentes físicos o químicos, externos o internos, los cuales pueden producir erosiones, fisuras y expansiones que pueden ser nocivas. Los agentes físicos tales como los procesos de desecación y las acciones de hielo-deshielo, se presentan cuando los materiales están a la intemperie expuestos a los cambios climáticos y cuando son sometidos a la acción del agua en movimiento, generando un desgaste superficial. En el entorno del compuesto podemos encontrar sulfatos, cloruros o ácidos,

entre otros, que afectan a la matriz cementante causando pérdida de masa o su hinchamiento y rotura.

Por los motivos antes presentados, el planteamiento que se desarrolla en este apartado consiste en estudiar si las adiciones minerales (CVM y su mezcla con HSS) pueden contribuir positivamente a la durabilidad de los compuestos de GRC premezclado. Se fabricaron probetas de 1x5x22,5cm de morteros de GRC premezclado, compuestos por los siguientes materiales:

- ✘ Cemento Pórtland tipo CEM I 52,5R, para disminuir su estándar de resistencia a 42,5R se adiciona un 25% en peso de filler calizo.
- ✘ Ceniza volante tipo F según la clasificación ASTM C-618 molida durante 40 minutos (CVM) según características y procedimiento descrito en epígrafes 4.1.1.4 y 3.2.1 respectivamente.
- ✘ Humo de sílice sonicado (HSS) según características y procedimiento descrito en epígrafes 4.1.1.4 y 3.2.7 respectivamente.
- ✘ Árido silíceo AFA80, con un módulo de finura de 3,1.
- ✘ Fibras de vidrio Cem-FIL AR de 12mm. de longitud no dispersables. Contenido de fibra del 3% respecto al peso total del mortero.
- ✘ Superplastificante Melment L240.
- ✘ Relación agua/material cementante de 0,35, constante para todos los morteros.
- ✘ Relación árido/material cementante de 0,67, constante para todos los morteros.

Las probetas de 1x5x22,5cm se elaboraron de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1170-5 [1], el curado se realizó en cámara húmeda, dejándolas durante 28 días sumergidas en agua; luego las dosificaciones seleccionadas fueron sometidas a un proceso de envejecimiento controlado (sumergidas en agua a 55°C). Con el objeto de acelerar la reacción puzolánica para los compuestos con sustitución se realizó un curado acelerado mediante 7 días a 20°C en cámara húmeda seguido de 21 días de inmersión en agua a 55°C. La equivalencia en términos predictivos de durabilidad es, según Purnell, de 100 días en condiciones de 20°C y ambiente húmedo (condiciones de Reino Unido) por cada día de envejecimiento [2]. Adicionalmente, se determinó para los compuestos seleccionados el porcentaje de absorción de agua por inmersión y densidad seca luego de los procesos de curado y envejecimiento, según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1170-6:1998 [3] (ver apartado 3.2.10); este proceso fue previo a la exposición de los compuestos a las pruebas de durabilidad y se determinó por la importancia que tiene valorar la capacidad de absorción de los compuestos con o sin sustitución puzolánica. En la tabla 4.4.1 se detalla la dosificación empleada en la fabricación de los morteros de GRC.

Tabla 4.4.1. Dosificación morteros de GRC fabricados (valores en gr).

Porcentaje sustitución	Cemento CEM I 52.5R	Filler calizo	Sustitución puzolánica	Árido silíceo AFA80	Fibra AR ND 12 mm	Aditivo Melment L240	Agua de amasado
0%	1153,7	384,6	0	1025,5	93	15,4	529,8
60% CVm40min	461,5	153,8	923	1025,5	93	12,3	531,6
10%HSS- 50% CVm40min	461,5	153,8	153,8-769,1	1025,5	93	20	527

Para la evaluación de las condiciones de durabilidad de los diferentes compuestos, se determinaron pruebas para evaluar su comportamiento luego de ser sometidos a agresiones físicas y químicas: ciclos de humectación y secado de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-ENV 1170-8:1997 [4] sumergiendo las probetas en agua o en una disolución con un 3,5% de NaCl; ciclos de hielo y deshielo de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C 1185-03 apartado 12 “Freeze-Thaw-Cladding Products” [5]; y exposición ante diferentes agentes agresivos, por inmersión en diferentes disoluciones agresivas (cloruro amónico 1M y ácido sulfúrico 0,5M).

En los siguientes apartados se presentan los resultados del comportamiento de los compuestos estudiados luego de ser expuestos a los procedimientos y procesos anteriormente mencionados. En la primera parte se muestra los resultados de los compuestos antes y después del envejecimiento; en la segunda parte, se presenta el comportamiento de los compuestos sometidos a los ataques físicos: humectación-secado (en agua y en NaCl 3,5%) y hielo-deshielo; en la tercera parte se analizan los resultados obtenidos sobre el comportamiento de los composites sometidos a ataque de sustancias de carácter ácido: cloruro amónico y ácido sulfúrico.

4.5.1. Caracterización de composites y estudio del envejecimiento

Se estudian los siguientes sistemas de compuestos de GRC: matriz de referencia (control), 60% de sustitución de cemento por ceniza volante molida durante 40 minutos (CVm) y la mezcla sustituyendo un 60% del cemento por 10% de HSS y 50% de CVm (HSS-CVm); además se incluyen sistemas relacionados con el proceso de aceleración de la reacción puzolánica mediante el curado durante 7 días a 20°C y la inmersión 21 días en agua a 55°C (estas series estarán identificadas con la letra A). Se pretende conocer el comportamiento frente al envejecimiento, tanto a nivel de propiedades físicas (absorción y densidad seca) como a nivel de propiedades mecánicas (resistencia a flexión y tenacidad).

4.5.1.1. Porcentaje de absorción y densidad seca

La respuesta de la matriz cementante ante agresiones externas al compuesto depende en gran medida del porcentaje de absorción, del grado de porosidad y de la evolución y naturaleza de la matriz cementante, lo cual permitirá en menor o mayor medida la penetración de estos agentes y su reacción perjudicial con los componentes de la matriz [6]. Para la determinación del porcentaje de absorción de agua por inmersión y la densidad seca se utilizan las fórmulas que se muestran en el apartado 3.2.10 (tabla 3.11).

En la figura 4.5.1. se presentan los valores de absorción y densidad de los composites estudiados. En general, se observa que el proceso de envejecimiento provoca una disminución de la absorción y un aumento de la densidad seca, lo cual afirma que durante ese proceso la matriz ha seguido hidratándose y ha ido aumentando la cantidad de productos cementantes a través de la hidratación del cemento y de las reacciones puzolánicas. Al evaluar los sistemas relacionados con el proceso de curado durante 7 días a 20°C e inmersión 21 días en agua a 55°C, se confirma el efecto de aceleración de la reacción puzolánica al observar que la densidad es ligeramente inferior para el caso de los compuestos puzolánicos e igual para el control, si se compara con los sistemas curados y envejecidos 28 días.

El mortero con una sustitución de CVm presenta un porcentaje de absorción superior al del mortero control y al sustituido por la mezcla HSS-CVm después del curado, valor que disminuye con el tiempo de envejecimiento, situándose por debajo de las demás muestras. Este comportamiento se repite, aunque en menor magnitud, para la muestra con sustitución por HSS-CVm, la cual con el proceso de envejecimiento disminuye el porcentaje de absorción e incrementa su densidad a valores similares al control.

Las diferencias de comportamiento encontradas se atribuyen a la reactividad puzolánica de las puzolanas. Para el caso de la CV usada, que a pesar de estar molida para incrementar su reactividad presenta una reactividad media, a los 28 días todavía no se ha avanzado de forma importante en la formación de productos de hidratación por reacción puzolánica entre las fases vítreas de la CV y la portlandita liberada por el cemento Portland. Sin embargo, el proceso de envejecimiento activa la reacción puzolánica, originando una densificación de la matriz cementante. La presencia del humo de sílice, puzolanas de elevada reactividad a tiempos cortos de curado, compensa la menor reactividad de la CV, dando lugar a una situación intermedia.

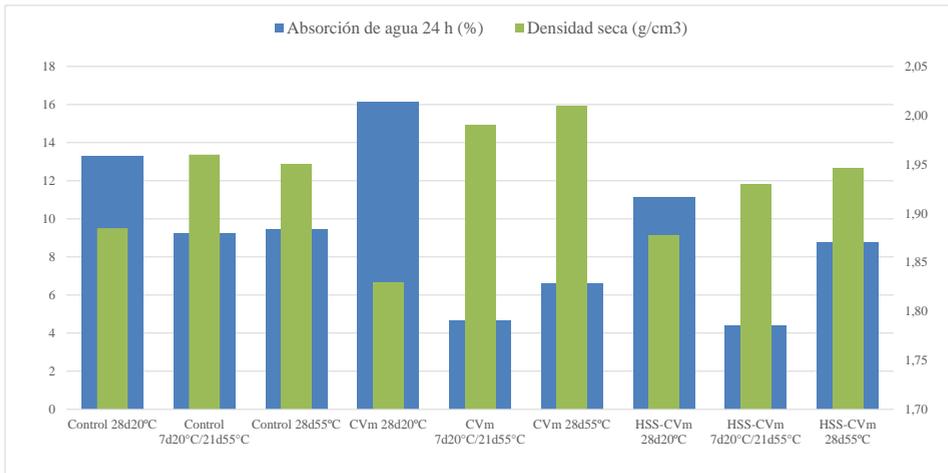


Figura 4.5.1. Absorción y densidad seca para compuestos de GRC con sustitución por CVm y la mezcla HSS-CVm.

4.5.1.2. *Propiedades mecánicas*

Luego de confirmar que se presenta una disminución de la absorción y un aumento de la densidad seca de la matriz con el envejecimiento, proceso que favorece la hidratación de la matriz aumentando la cantidad de productos cementantes a través de la hidratación del cemento y de las reacciones puzolánicas, se pretende relacionar estos resultados con las propiedades mecánicas de los compuestos en estudio. Al estudiar el módulo de rotura de los compuestos y su evolución con el tiempo de envejecimiento (figura 4.5.2), se observa que al final de los 28 días de curado el compuesto control presenta valores superiores a los compuestos puzolánicos, sin embargo, una vez iniciado el proceso aceleración de la reacción puzolánica y el envejecimiento, el control es ampliamente superado por los compuestos puzolánicos, hecho que se conserva durante todo el proceso de envejecimiento.

El control aumenta su densidad con el envejecimiento, pero no aumenta su resistencia a flexión, sin embargo, para los compuestos puzolánicos se observa un aumento de la densidad y de la resistencia con el envejecimiento. Esto significa que el aumento de densidad no es clave para la resistencia en el caso del control, porque el deterioro que sufren las fibras; en el caso de los puzolánicos, se mantiene la integridad de las fibras, por lo que el aumento de densidad favorece el incremento en las propiedades mecánicas.

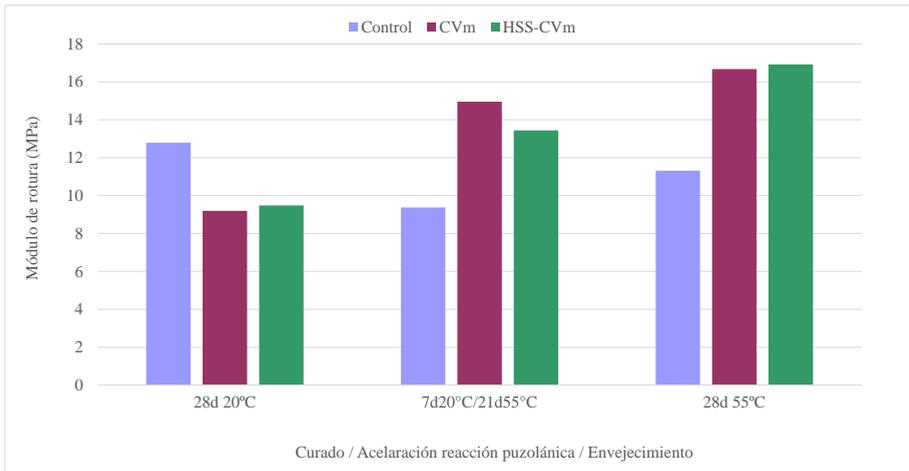


Figura 4.5.2. Módulo de rotura para compuestos de GRC curados, con aceleración de la reacción puzolánica y envejecidos.

En la figura 4.5.3, se observa como a los 28 días de curado el mortero control presenta valores cercanos a los 17,5 GPa para el módulo de elasticidad, valor que se mantiene estable durante el tiempo de envejecimiento; por el contrario, para los morteros puzolánicos se obtienen valores menores cercanos a los 10 GPa, propiedad que se incrementa progresivamente alcanzando valores entorno a los 14 GPa para los compuestos tipo A y 18 GPa para los compuestos envejecidos. Este comportamiento se relaciona con la ganancia de rigidez para los compuestos puzolánicos.

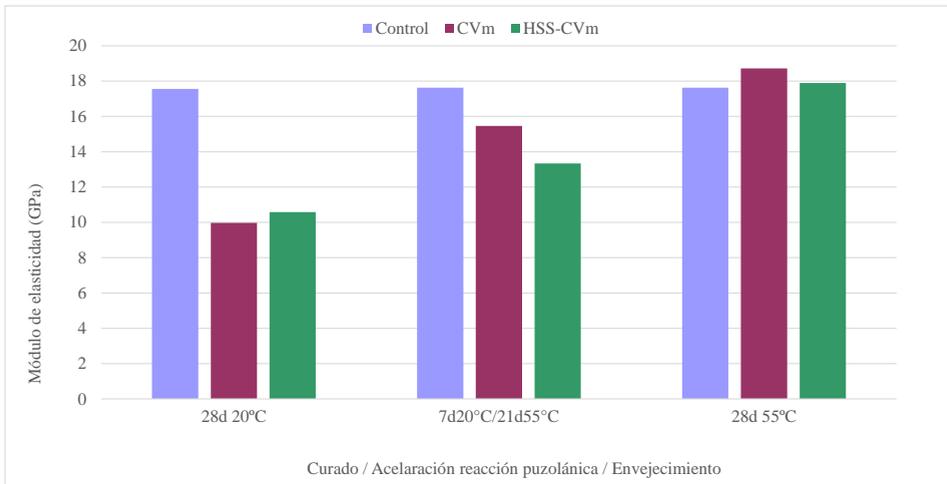


Figura 4.5.3. Módulo de elasticidad para compuestos de GRC curados, con aceleración de la reacción puzolánica y envejecidos.

En la figura 4.5.4 se aprecia la tenacidad de los compuestos estudiados. Para los 28 días de curado el compuesto control presenta valores importantes de tenacidad sólo superado por el compuesto puzolánico que contiene HSS-CVm. Durante el proceso de aceleración de la reacción puzolánica se presenta una drástica caída de la tenacidad del control, en cambio los compuestos puzolánicos mejoran durante el envejecimiento.

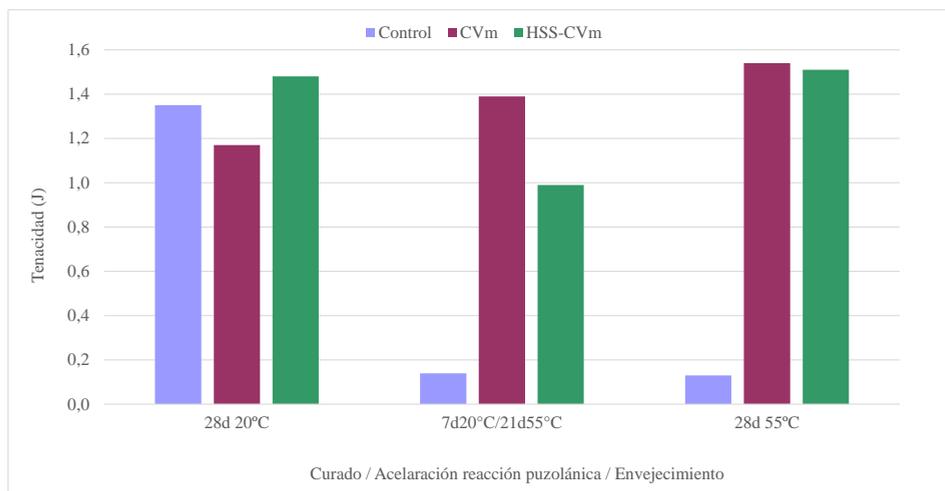


Figura 4.5.4. Tenacidad para compuestos de GRC curados, con aceleración de la reacción puzolánica y envejecidos.

La mejora y el incremento de los productos hidratados aumentan el nivel de resistencia del compuesto, debido a la mayor fuerza de cohesión en la interfase pasta-árido y matriz-fibra. Gracias a las propiedades puzolánicas de la CVm y el HSS, la acción conjunta que ejerce la reacción de las puzolanas con la portlandita liberada durante la hidratación del cemento y de forma importante con la que se encuentra en la superficie de la fibra, permiten la formación de productos hidratados que benefician a la matriz cementante y fortalecen la interfase fibra-matriz. De esa forma se permite una mejora progresiva de las propiedades mecánicas, pero más importante aún su mantenimiento en el tiempo.

En las imágenes de la figura 4.4.5 se presenta el estado de la fibra AR en los diferentes compuestos y para las diferentes edades. Es evidente el deterioro de la superficie de las fibras en el compuesto control después del curado, deterioro correspondiente a pérdida del ensimaje (figuran 4.4.5a), dicha situación se incrementa durante el proceso de envejecimiento y se hace evidente la pérdida de masa del filamento (figura 4.4.5d).

Las imágenes 4.4.5 b y e corresponden a los compuestos con CVm para los diferentes procesos: se aprecia un buen estado de las fibras y una acumulación de productos de hidratación en la superficie de los filamentos que se incrementa con el envejecimiento;

esta situación se repite para los compuestos con sustitución por la mezcla CVm-HSS (imágenes 4.4.5 c y f).

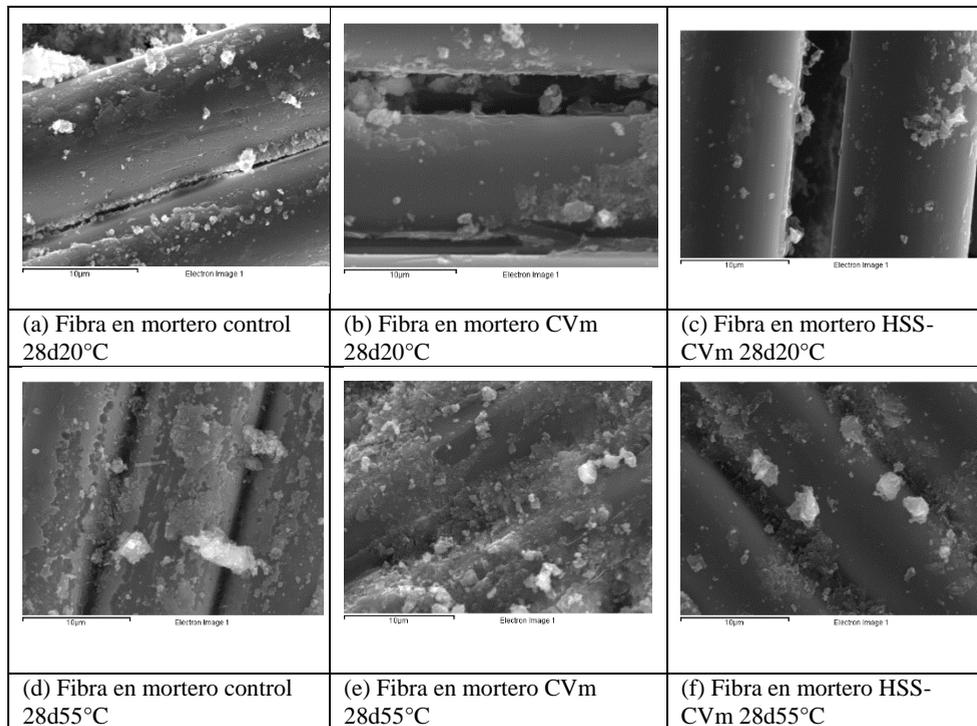


Figura 4.5.5. Fibras AR extraídas de morteros curados 28 días a 20°C (a, b y c) y envejecidos 28d55°C (d, e y f).

4.5.1.3. *Exposición de fibras AR a diferentes ambientes agresivos*

Las fibras AR teóricamente son álcali-resistentes, pero no son completamente inertes. A través de la solución acuosa formada por el cemento, se inicia la disolución de los iones de sodio provenientes de la fibra, luego la red de silicio del vidrio es atacada por el ion hidroxilo generando la posterior disolución de los iones de silicio, provocando el deterioro de la fibra [2]. Cuando se inicia la reacción del cemento, la estructura original de los filamentos de las fibras distribuidas homogéneamente sobre los poros de la pasta de cemento, se ve afectada y da paso a varios procesos que suceden simultáneamente y afectan a la naturaleza del material. Los cristales de portlandita interactúan con las fibras, acelerando la corrosión y generando muescas locales que causan el corte de los filamentos; además, se inicia un ataque en masa, se presenta la hidroxilación y disolución del vidrio, dejando huecos rodeados de productos de la reacción entre el cemento y el vidrio [7].

Se ha observado que la fibra AR sufre un ataque por parte de los productos que se generan durante la hidratación del cemento, los cristales de hidróxido cálcico se incrustan en la fibra alterando sus propiedades físicas; además, se genera una reacción química en la interfase entre la fibra y la matriz cementante que produce una pérdida de masa por parte de la fibra (hidroxilación) [3] (figura 4.5.6). Estos factores son responsables en gran medida de la pérdida de las propiedades del composite, como la disminución de tenacidad y de la resistencia a flexión [8].

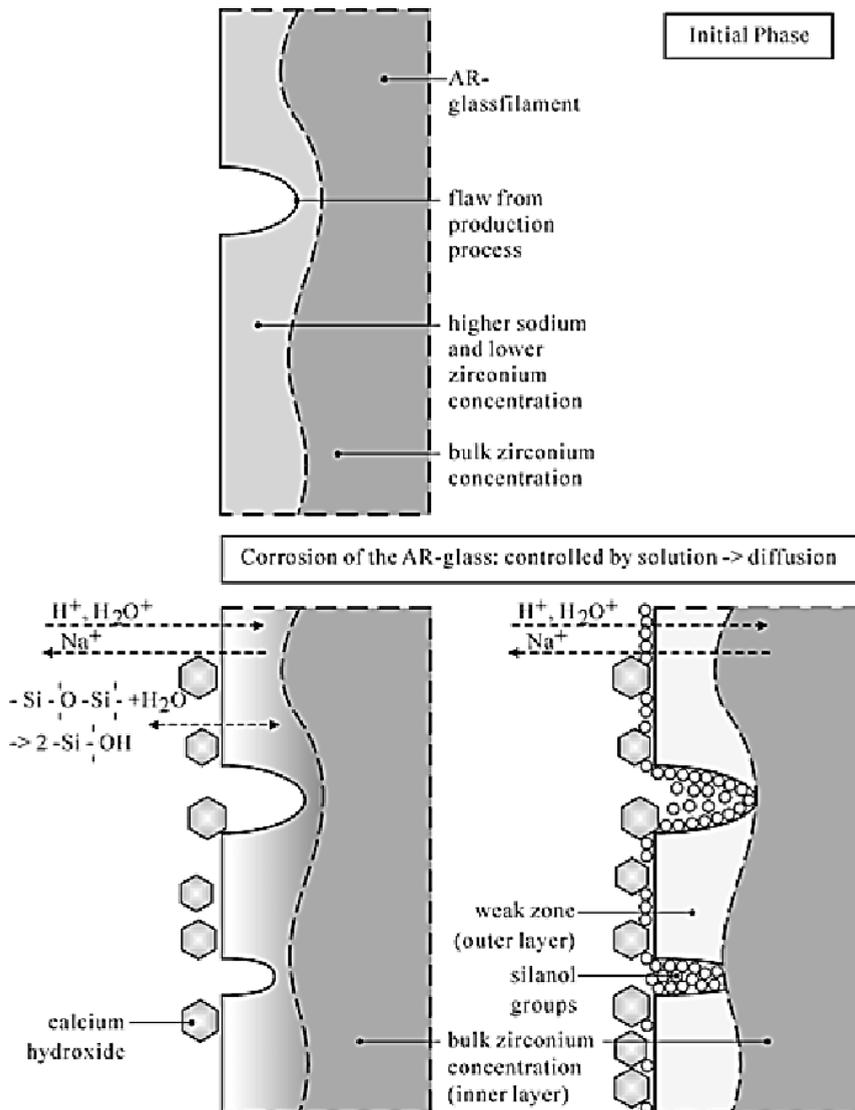


Figura 4.5.6. Mecanismo de degradación de los filamentos de las fibras. Fuente J. Orłowsky et al. [8].

Las fibras de vidrio AR se sometieron a diferentes agentes agresivos y tratamiento térmico en agua entre 28 y 70 días a 55°C mediante inmersión en disoluciones de Ca(OH)_2 y NaOH en las siguientes condiciones: Se preparó una disolución saturada colocando en exceso el compuesto y luego decantándolo, para el NaOH se trabajó una concentración del 5%. Posterior al tiempo de exposición se procedió con la evaluación visual para observar su evolución y evaluar el deterioro de la fibra coincidiendo con los planteamientos de los autores anteriormente citados.

En la figura 4.5.7 se presentan micrografías de las fibras sumergidas en disolución de Ca(OH)_2 , donde se observa el ataque generado por la solución alcalina en forma de cráteres sobre la superficie a los 28 días de tratamiento (figura 4.5.7 a); el efecto del ataque se incrementa con el envejecimiento a 56 y 70 días (figuras 4.5.7 b y c) conectando las zonas afectadas e incrementando su profundidad. Este tipo de ataque es debido al efecto de la alta alcalinidad del medio agresivo que genera un debilitamiento superficial sobre zonas de falla generadas durante el proceso de producción en la capa de ensimaje, esta es la vía de entrada o inicio para atravesar la capa inicial de la fibra rica en zirconio y producir la disolución de los iones de sodio y silicio.

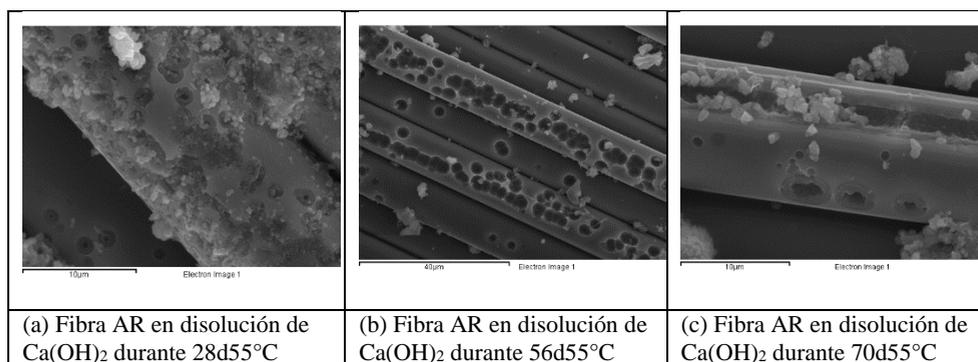


Figura 4.5.7. Fibras AR sumergidas en disolución saturada de Ca(OH)_2 .

En las figuras 4.5.8 a y b se presentan micrografías de las fibras sumergidas en disolución de NaOH durante 28 y 56 días. Se identifica un deterioro diferente al observado en el caso anterior, en este caso la fibra sufre un ataque más agresivo al presentar la pérdida de masa por desprendimiento de anillos a lo largo de su longitud. Probablemente, por un lado, se produce un ataque más agresivo debido a que la disolución de NaOH tiene mayor pH; por otro lado, las sustancias generadas en el deterioro (silicato, iones Na^+ y Zr^{+4}) serán más solubles cuando se tiene un entorno rico en sodio, mientras que en un entorno rico en calcio se producirá una tendencia a depositar silicatos cálcicos hidratados sobre las fibras que se están corroyendo.

En la Figura 4.5.8c se muestra una fibra deteriorada valorada mediante microanálisis para identificar su composición. Se identifica la presencia de Na, Si y Zr que constituyen los componentes más importantes de la fibra (Figura 4.5.8d). El fenómeno de desprendimiento del anillo exterior descubriendo el núcleo de la fibra se constata en las figuras 4.5.8 e y f, en donde se observa el contenido correspondiente a Si y Zr, respectivamente; en el primero se muestra mayor concentración de Si en la zona central (zona de anillo desprendido) que en los extremos de la fibra; por el contrario, al evaluar el contenido de Zr se muestra mayor concentración en los extremos de la fibra correspondientes a la capa externa que en el centro de la misma. Todo ello nos lleva a deducir que el proceso de fabricación de los filamentos se genera mayor concentración de Zr en el perímetro exterior para brindar mayor capacidad resistente al ambiente alcalino de la matriz cementante.

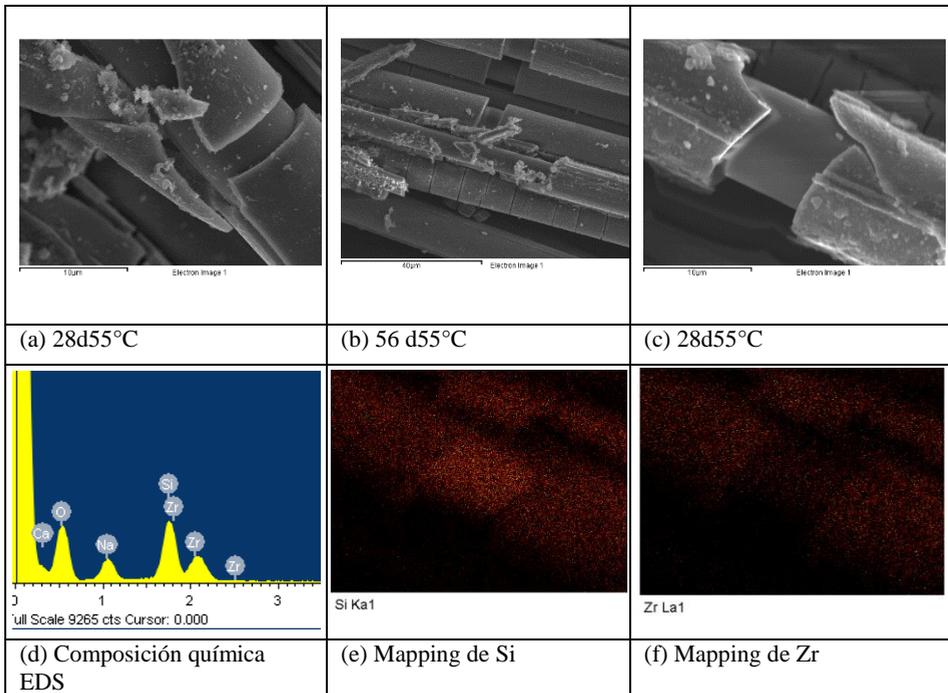


Figura 4.5.8. Fibras AR sumergidas en disolución de NaOH.

4.5.2. Evaluación del comportamiento de composites sometidos a agresiones físicas

En este apartado se analiza el comportamiento de los compuestos sometidos a los ataques físicos: humectación-secado (en agua y en NaCl 3,5%) y hielo-deshielo.

4.5.2.1. Ciclos de humectación - secado

Los especímenes después del proceso de curado estándar durante 28 días y curado acelerado (7d 20°C y 21d 55°C), fueron sometidos a ciclos de humectación y secado como se indica en la figura 4.5.9, este ciclo se repitió 10, 25 y 50 veces tanto para las probetas saturadas con agua como con la disolución de NaCl; luego se realizó un registro visual y de la masa de cada probeta al final de cada ciclo; finalmente se evaluó la resistencia a flexión para cada una de las series.

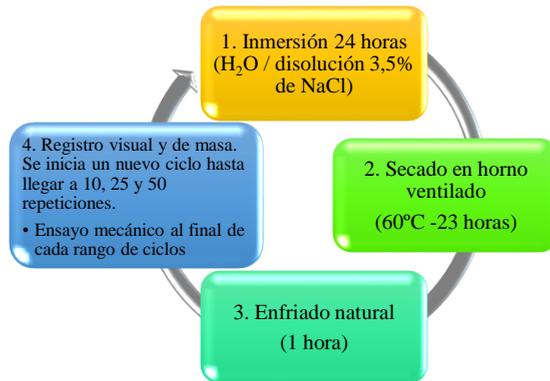


Figura 4.5.9. Descripción ciclo de humectación - secado.

4.5.2.1.1. Humectación con agua y secado

Se presentan los resultados de módulo de rotura (figura 4.5.10) de un conjunto de 6 probetas por dosificación, para compuestos curados (0 ciclos) y con 10, 25 y 50 ciclos de humectación en agua y su posterior secado. Se puede observar, al final del curado estándar (0 ciclos), que los composites con sustitución puzolánica presentan valores de resistencia a la flexión menores que los del control, mientras que los composites puzolánicos con aceleración de la reacción puzolánica (A) obtienen resistencias similares al control; ello es debido al mayor avance de la reacción puzolánica con el proceso de aceleración, hecho que permite la formación de mayor cantidad de productos de hidratación. Con el inicio de los ciclos se aprecia una caída significativa del comportamiento mecánico del mortero control después de los 10 ciclos, conservando estos valores hasta el ciclo 50. Es evidente que el proceso de humectación-secado afecta de forma decisiva la estabilidad del composite control.

Caso contrario el de los morteros con sustitución con curado estándar, que presentan un incremento de sus propiedades favorecidas por el tratamiento térmico de los ciclos, proceso que acelera la generación de productos procedentes de la reacción puzolánica; este comportamiento se obtiene su máximo valor después de los primeros 10 ciclos y

sufre una ligera disminución hasta los 50 ciclos, pero siempre manteniéndose en valores cercanos a los 12 MPa. Los composites con sustitución puzolánica con curado acelerado presentan un comportamiento mecánico al final del proceso de curado similar al control, lo cual está de acuerdo con una mayor extensión de la reacción puzolánica durante el curado; los valores de resistencia disminuyen levemente con el inicio de los ciclos y se estabiliza hasta las 50 repeticiones alrededor de los 12 MPa, de forma similar a los composites con curado estándar.

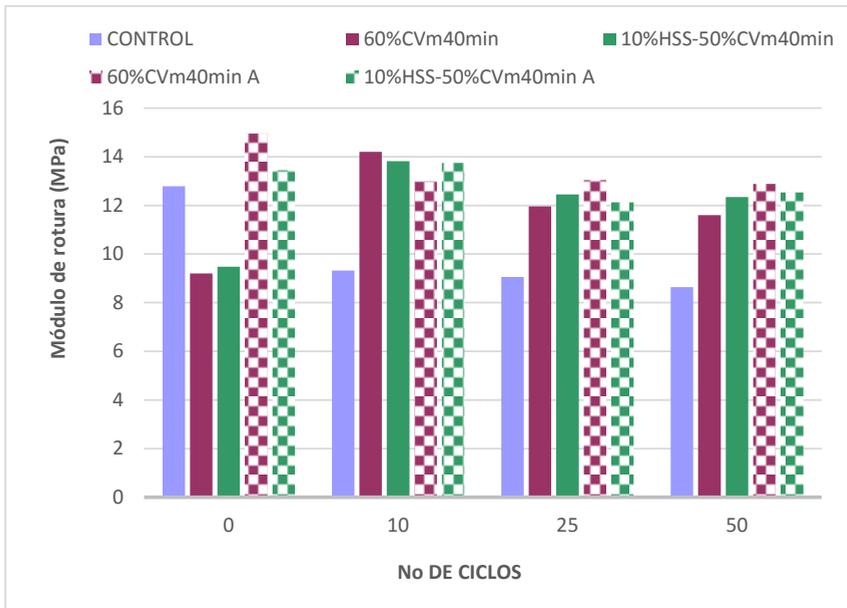


Figura 4.5.10. Módulo de rotura para morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con agua.

En cuanto a la tenacidad (figura 4.5.11), se observa una gran diferencia entre el composite control y el resto de los composites con puzolanas. Con la presencia de puzolanas, la tenacidad disminuye de forma progresiva con el número de ciclos, mientras que para el control se observa una fragilización muy significativa a los 10 ciclos. Los composites con curado estándar presentan un comportamiento mecánico cercano al control para el final del proceso de curado. Los valores de tenacidad disminuyen levemente para los 10 ciclos con valores ligeramente inferiores a 1,2 J para la CVm y 0,8 para la mezcla HSS-CVm; la disminución es continua para los siguientes ciclos situándose cerca de los 0,7 J para los 25 ciclos y sobre los 0,4 J para los 50 ciclos. Es importante resaltar que siempre los valores de tenacidad para los compuestos puzolánicos con curado estándar se ubican sobre los compuestos reacción puzolánica acelerada (A).

Es importante resaltar que el proceso de humectación-secado afecta de forma notable la integridad de las fibras para el mortero control, como se puede observar en la micrografía 4.5.12a. Por otro lado, después de 50 ciclos, las fibras contenidas en la matriz con puzolana aparentemente están sin corrosión y sin daños tan evidentes (figuras 4.5.12 b y c). Queda por tanto demostrado que la incorporación de cantidades importantes de puzolanas supone una mejora en el comportamiento de los composites con fibras AR frente a los procesos de humectación-secado.

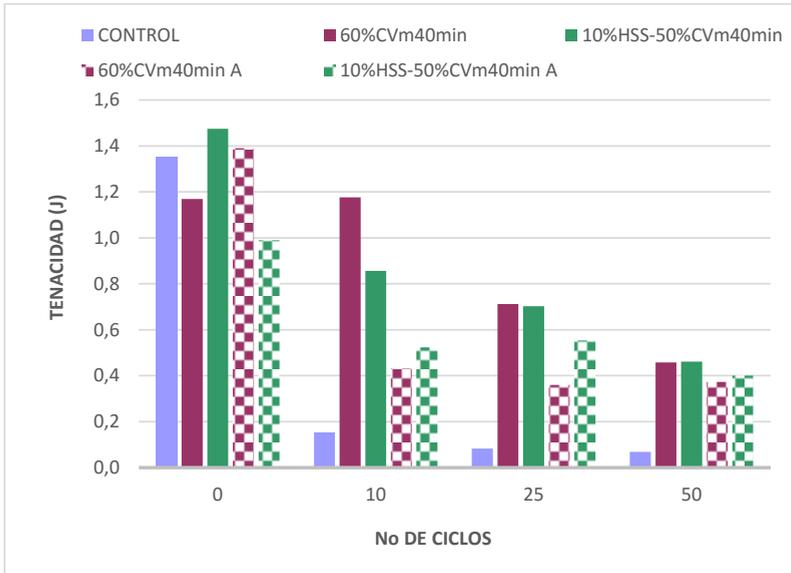


Figura 4.5.11. Tenacidad de morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con agua.

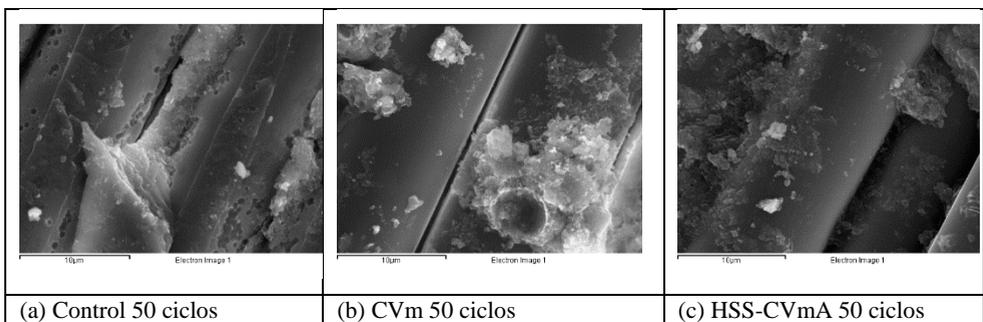


Figura 4.5.12. Micrografías SEM de las fibras procedentes de diferentes tipos de morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con agua.

4.5.2.1.2. Humectación con disolución en 3.5% de NaCl y secado

Se presentan en las figuras 4.5.13 y 4.5.14 los resultados de módulo de rotura y tenacidad, respectivamente, de un conjunto de 6 probetas por dosificación para compuestos curados (0 ciclos) y 10, 25 y 50 ciclos de humectación con disolución de 3,5% de NaCl y su posterior secado. En general, el comportamiento observado es similar al encontrado para humectación-secado en agua, tanto a nivel de resistencia como a nivel de tenacidad.

Con el inicio de los ciclos (Figura 4.5.13) es evidente que el proceso afecta de forma decisiva la estabilidad del composite control con una caída progresiva del comportamiento mecánico hasta los 8 MPa para el ciclo 50. Los morteros con sustitución con curado estándar y con aceleración de la reacción puzolánica, presentan un incremento de sus propiedades favorecidas por el tratamiento térmico de los ciclos, este comportamiento obtiene su máximo valor durante los 10 ciclos y sufre una ligera disminución hasta los 50 ciclos, manteniéndose en valores cercanos a los 10 MPa. Los valores finales a los 50 ciclos son ligeramente inferiores a los observados para el ensayo de humectación-secado, lo que sugiere que la presencia de sales disueltas afecta de forma ligera el comportamiento: al final de los 50 ciclos la resistencia de los composites con puzolana está alrededor de 10 MPa para la disolución salina, frente a los 12 MPa observados para los GRC sometidos a humectación-secado con agua. La cristalización en los poros del mortero de la sal NaCl durante el proceso de secado, produce un ligero empeoramiento del comportamiento mecánico.

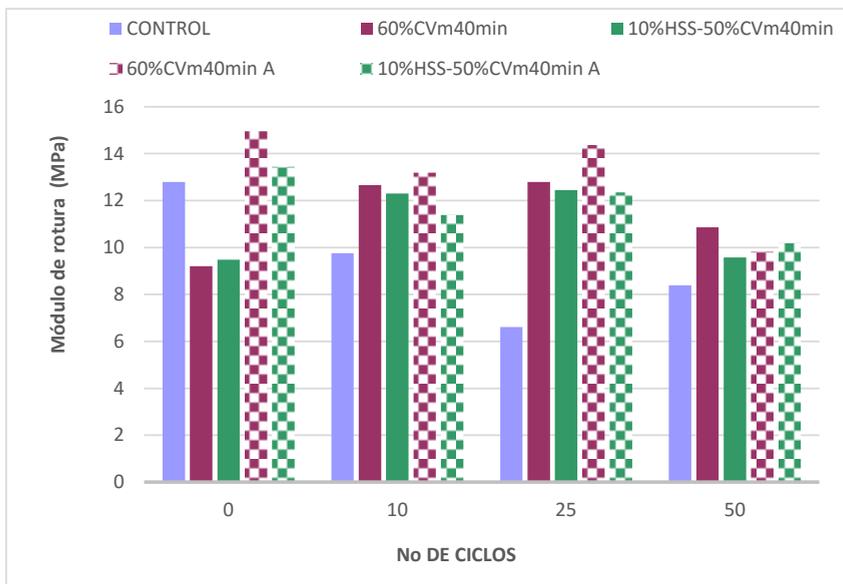


Figura 4.5.13. Módulo de rotura para morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con NaCl.

En cuanto a la tenacidad (figura 4.5.14), con la presencia de puzolanas, la tenacidad disminuye de forma progresiva con el número de ciclos, mientras que para el control se observa una fragilización muy significativa, de nuevo, a los 10 ciclos. Posteriormente, los valores de tenacidad disminuyen progresivamente con la aplicación de los ciclos situándose entre de los 0,4 y 0,6 J para los 50 ciclos.

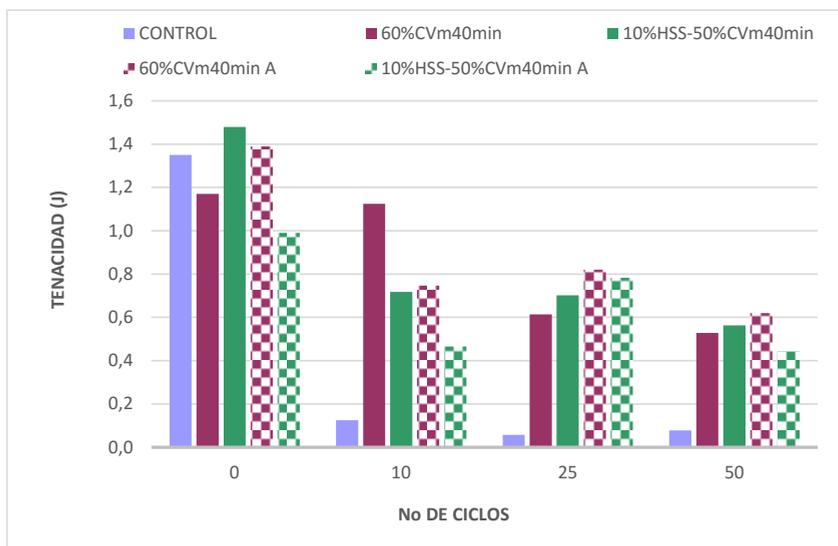


Figura 4.5.14. Tenacidad para morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con NaCl.

Se observa de nuevo un deterioro importante para las fibras para el caso del composite control al superar los 50 ciclos (figura 4.5.15a). Se presentan cráteres sobre la superficie de la fibra y se aprecian productos de hidratación, en especial cristales de hidróxido cálcico que se incrustan en la superficie. Para los composites con puzolanas (figura 4.5.15 b y c) se observa la presencia de productos hidratados, pero no se presentan fallos o debilitamientos luego de los 50 ciclos de humectación secado; este hecho coincide con el mejor comportamiento mecánico obtenido por los compuestos puzolánicos comparados con el control. En la figura 4.5.15d se presenta la fibra control luego de 50 ciclos acompañada de la composición química en los puntos de interés marcados en la micrografía, se aprecian en los puntos 1 y 2 la presencia de silicatos y silicoaluminatos cálcicos hidratados, en el punto 3 se observa mayoritariamente portlandita.

Lo afirmado anteriormente se confirma si se analiza la información termogravimétrica presentada en la tabla 4.5.2. Se aprecia que el porcentaje de agua combinada de los hidratos para los sistemas con sustitución puzolánica es menor al final del curado, pero se incrementa con la aplicación de los ciclos; este hecho confirma la mejora de las propiedades del composite y la progresiva producción de hidratos.

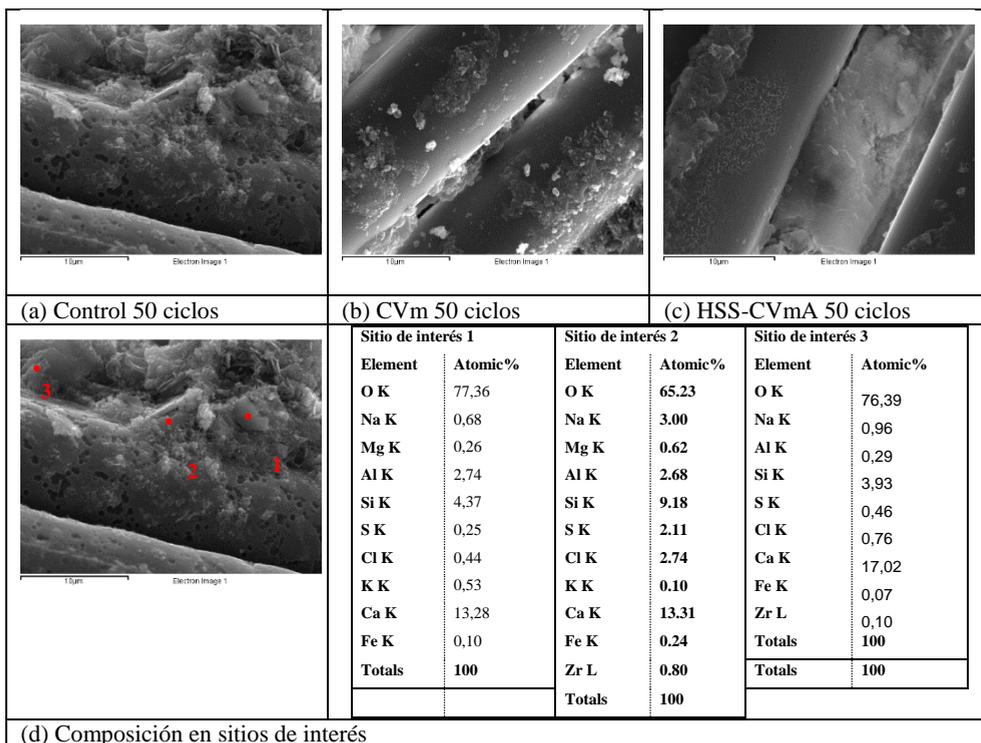


Figura 4.5.15. Micrografías SEM de las fibras procedentes de diferentes tipos de morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con NaCl.

Tabla 4.5.2. Resultados de termogravimetría sobre morteros sometidos a pruebas de Humectación - secado con NaCl.

Sustitución	% Agua combinada de los hidratos		%Ca(OH) ₂	
	Curado estándar 28 días a 20°C	Después de 50 ciclos	Curado estándar 28 días a 20°C	Después de 50 ciclos
Control	10,27	12,17	7,98	4,67
60%CVm40min	7,39	12,26	0,00	0,00
10%HSS-50%CVm40min	9,50	12,03	0,00	0,00

También se observa que a los 28 días de curado solo hay presencia de hidróxido cálcico en el mortero control, valor que disminuye al aplicar los ciclos ya que parte de la portlandita se disuelve al reaccionar con los cloruros presentes en la disolución y originando posiblemente sal de Friedel. Además, debido al proceso de humectación-secado se ha podido generar una carbonatación importante. En los sistemas con puzolana, se observa claramente que la elevada proporción de puzolana hace que toda la portlandita se consuma de forma rápida de modo que el entorno agresivo para las fibras se minimiza;

además, al igual que el mortero control se puede sumar la presencia de carbonatación por el proceso de humectación-secado.

Para complementar el análisis anterior, se representan las curvas DTG, correspondientes a los morteros en estudio (figura 4.5.16). Se aprecian cuatro áreas (A, B, C y D), en las cuales se ubican los picos característicos resultado de la hidratación del cemento y de la reacción con las puzolanas:

- En el área A entre los 100 y 180°C, se identifican picos correspondientes a la deshidratación los silicatos cálcicos hidratados y de la etringita.
- En el área B entre los 180 y 220 °C, se identifica la deshidratación de los aluminatos y silicoaluminatos cálcicos hidratados.
- En el área C entre los 300 y 370°C, se identifica el pico de la deshidratación de la sal de Friedel para el mortero control.
- El área D entre los 480 y 550°C se observa el pico correspondiente a la deshidroxilación del hidróxido cálcico.

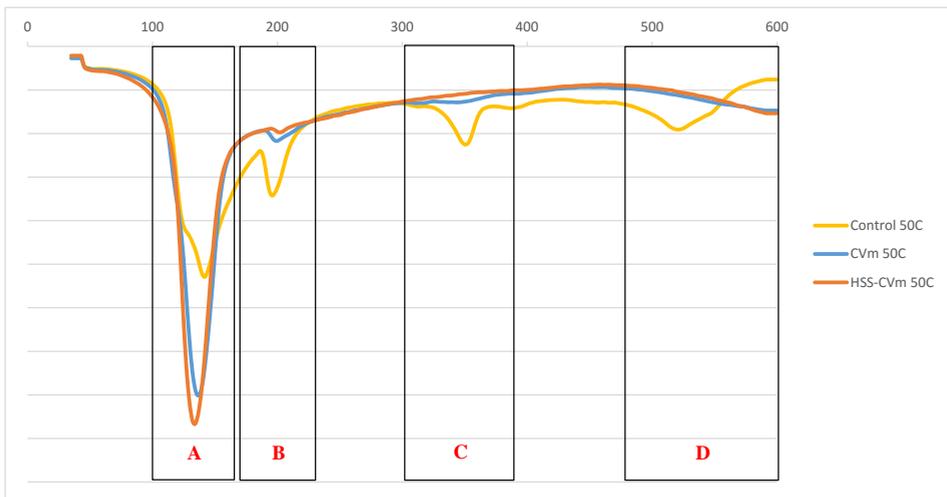


Figura 4.5.16. Curvas DTG para morteros control y puzolánicos sometidos a 50 ciclos de humectación - secado con NaCl.

4.5.2.2. Ciclos de hielo-deshielo

Los especímenes fueron sometidos a ciclos de hielo y deshielo como se indica en la figura 4.5.17, este ciclo se repitió 50 y 100 veces; luego se realizó un registro visual y de la masa de cada probeta al final de cada conjunto de ciclos; finalmente se evaluó la resistencia a flexión de un conjunto de 6 probetas para cada una de las series.

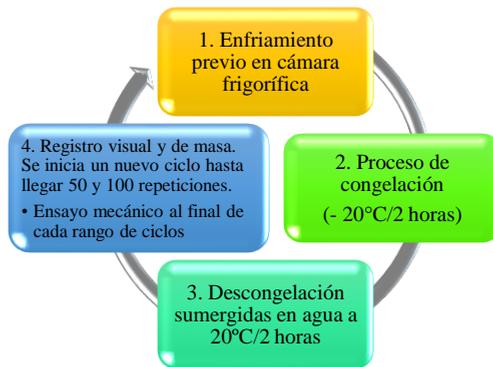


Figura 4.5.17. Descripción de los ciclos de hielo - deshielo.

En las figuras 4.5.18 y 4.5.19. se presentan los resultados de módulo de rotura y tenacidad, respectivamente, de los diferentes especímenes. Con el inicio de los ciclos se aprecia una caída significativa de los valores de módulo de rotura, tanto para el mortero control como para los compuestos con sustitución puzolánica. Esa caída es mucho más marcada para los especímenes con puzolana con curado estándar, ya que pierden drásticamente sus propiedades para los 50 ciclos, comportamiento que se estabiliza para los 100 ciclos en valores entorno a los 8 MPa para la mezcla HSS-CVm, mientras que la mezcla con CVm obtuvo resistencias cercanas a 6 MPa.

Es evidente que, en este caso debido a que la matriz con puzolana no estaba completamente desarrollada, se ha producido un debilitamiento por el efecto de la congelación del agua presente en los poros. En el caso de los especímenes con aceleración de la reacción puzolánica (A) podemos observar que después de los 50 ciclos la caída es importante pero que el módulo sigue siendo superior al control en las mismas condiciones. Todo ello indica que la aceleración de la reacción puzolánica es un factor positivo en relación con la durabilidad en hielo-deshielo. En general, la disminución de las propiedades mecánicas se debe al efecto que tiene la congelación del agua presente en los poros del composite, que al incrementar su volumen inicia un proceso de deterioro progresivo de la matriz del compuesto: ese efecto es mucho más notable para los composites con puzolana y curado estándar, puesto que presentan mayor absorción de agua (ver figura 4.5.1).

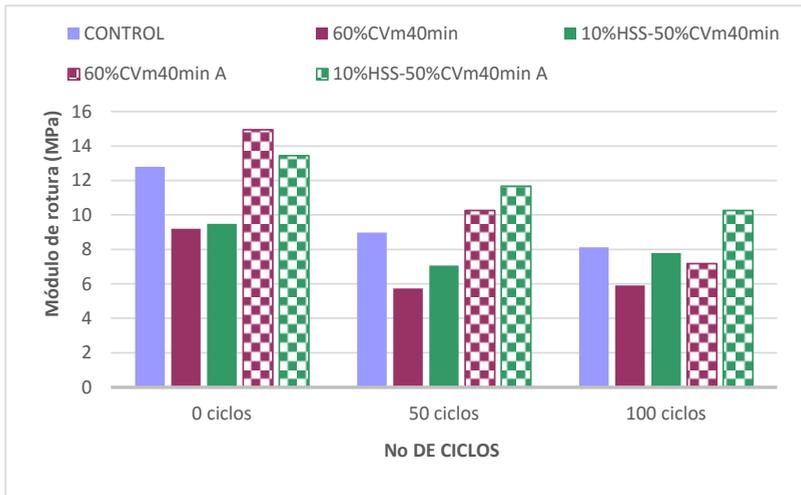


Figura 4.5.18. Módulo de rotura para morteros sometidos a pruebas de hielo - deshielo.

Se muestran en la figura 4.5.19 los resultados relacionados con la tenacidad de los compuestos luego de la exposición a los ciclos. El control disminuye su tenacidad a valores cercanos al cero (rotura frágil). Ello significa que se ha producido un daño notable en la integridad de las fibras por envejecimiento. En cambio, los composites puzolánicos que, en general, presentan valores cercanos al control para el final del proceso de curado, disminuyen mucho menos su tenacidad a los 50 y 100 ciclos: ello sugiere que el proceso de hielo-deshielo ha dañado la matriz pero que las fibras siguen manteniendo una cierta integridad.

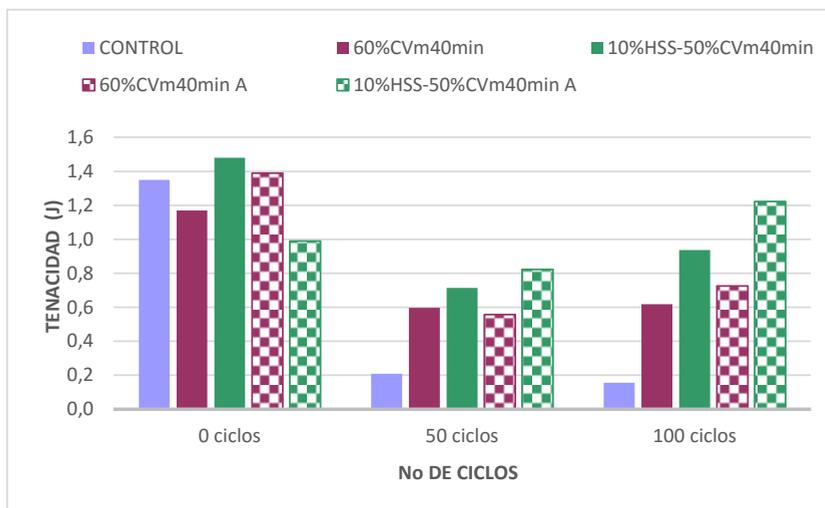


Figura 4.5.19. Tenacidad para morteros sometidos a pruebas de hielo - deshielo.

Es evidente el efecto que genera sobre las propiedades mecánicas el incremento del volumen de los poros por el agua congelada, en especial sobre la tenacidad que mide la capacidad de absorción de energía del compuesto y su valor no sólo depende del volumen, longitud y tipo de fibra sino también de las características de la matriz [9], la cual se ve deteriorada para los primeros 50 ciclos.

En la figura 4.5.20 se observan imágenes de los compuestos estudiados: se aprecia en los compuestos puzolánicos con curado estándar (CVm y mezcla HSS-CVm) una cantidad importante de fisuras en el canto de las probetas generados por el incremento volumétrico al interior de la matriz. Es notorio que, debido a que la matriz con puzolana con curado estándar no estaba completamente desarrollada, se ha producido un debilitamiento por el efecto de la congelación del agua presente en los poros; caso contrario el de los especímenes con aceleración de la reacción puzolánica (A), los cuales después de los 50 ciclos no presentan fisura. Esto confirma los resultados de las propiedades mecánicas e indica que la aceleración de la reacción puzolánica es un factor positivo en relación con la durabilidad en hielo-deshielo.

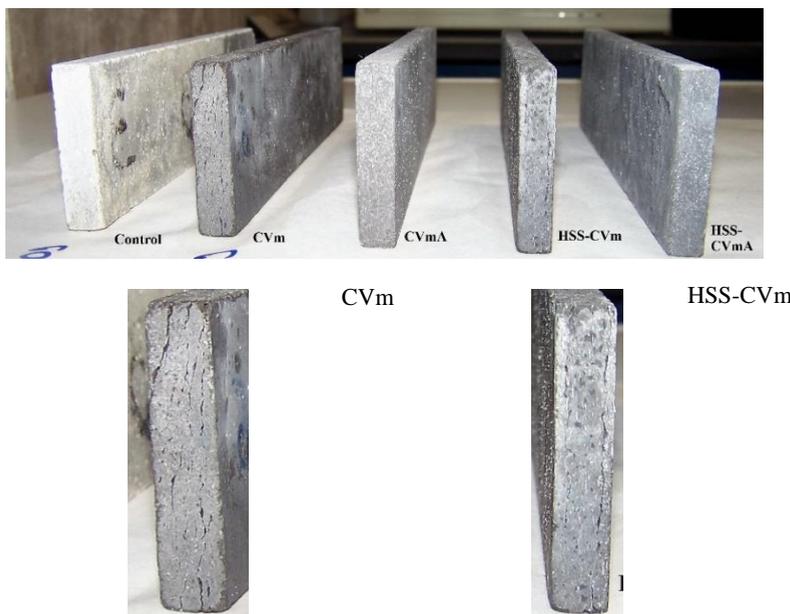


Figura 4.5.20. Fotografías de las probetas sometidas a 50 ciclos de hielo - deshielo.

4.5.3. Evaluación del comportamiento de composites sometidos a agresiones químicas

Posterior a los procesos de curado estándar y curado acelerado de las probetas de GRC, éstas fueron sumergidas en diferentes disoluciones agresivas: cloruro amónico 1M y

ácido sulfúrico 0,5M. Se realiza un registro visual y se observa la evolución en el tiempo de la masa de cada probeta (especímenes de 1x5x22,5 cm), controlando periódicamente la evolución del pH de cada disolución, el cual varía constantemente como efecto de la interacción entre las disoluciones y las probetas; se busca con este método el determinar un rango de pH de cada disolución que permita mantener de forma aproximada un medio agresivo constante. De esta forma, cuando el pH se incrementa y sobrepasa el límite dispuesto, es necesario sustituir la disolución. Adicionalmente, se utilizan prismas de sección 4x4x16 cm elaborados con los compuestos de GRC en estudio, sumergidos durante periodos de 7, 28 y 90 días en las disoluciones propuestas para la impregnación con fenolftaleína; se ha utilizado este indicador para el revelado y visualización del perfil de ataque de los distintos agresivos sobre el cemento.

4.5.3.1. Exposición de morteros de GRC a disolución de NH_4Cl

Girbés [6] concluye en su estudio que la agresividad generada por el cloruro amónico tiene una relación directa con la porosidad del material y confirma la vulnerabilidad de la portlandita ante su ataque. Afirma el aporte de los materiales puzolánicos para la densificación de la matriz y define un fenómeno de gran impacto en la durabilidad de compuestos de matriz cementante producto del efecto de la sustitución puzolánica, que genera una barrera física como consecuencia de la ubicación de los productos de la reacción puzolánica en los poros, contrarrestando la penetración del agresivo [6]. Las probetas control, con sustitución puzolánica con curado estándar y con curado acelerado (A) se sumergieron en disolución 1M de NH_4Cl a 20°C, se procuró mantener la disolución en rango de pH entre 8 y 9, está fue renovada cuando el grado de pH llegaba al límite superior. Las probetas se pesaron cada 5 días durante los dos primeros meses, cada 15 días durante el tercer y cuarto mes; para los dos meses finales el registro fue cada 30 días, aproximadamente.

En la figura 4.5.21 se observa la variación de masa que sufrieron las probetas al ser expuestas al agresivo. En todos los casos se produce una reducción de la masa inicial de las probetas. Se produce una pérdida mayor para las probetas control, finalmente cerca de los 216 días de exposición se presenta una pérdida cercana al 14%. Para las probetas con sustitución puzolánica y curado estándar se aprecia una pérdida mucho menor de masa si se compara con el control, se obtienen pérdidas de masa con valores entre 5 y 7% a los 216 días. Los compuestos puzolánicos con curado acelerado son los que presentan menor pérdida (entre 4-5%): este comportamiento tiene una relación directa con el incremento de la densidad y la disminución de grado de absorción del compuesto con la sustitución puzolánica (ver figura 4.5.1).

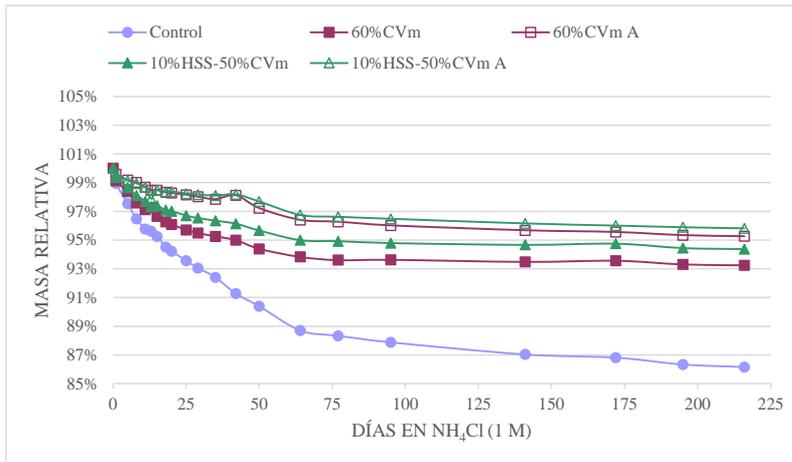


Figura 4.5.21. Variación de masa para morteros de GRC sumergidos en disolución de NH_4Cl .

Para los 28 días de estar sumergidos en la disolución, todos los morteros disminuyen sus resistencias, pero un hecho notorio y muy importante, es que los morteros con sustitución igualan o se mantienen sobre el mortero control, presentando mayores resistencias los morteros con curado acelerado (figura 4.5.22).

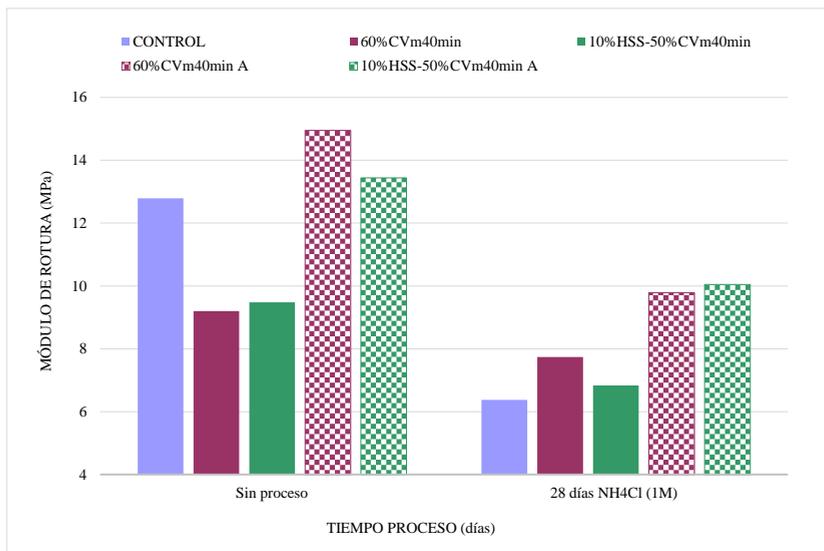


Figura 4.5.22. Módulo de rotura para morteros GRC sumergidos en disolución de NH_4Cl .

La razón por la que el mortero control muestra un peor comportamiento mecánico se debe a que el hidróxido cálcico presente en los morteros se disuelve al reaccionar con el cloruro amónico, aumentando la porosidad [6]; tanto la matriz cementante control como la que

presenta sustitución puzolánica son atacadas, pero esta última se comporta mejor por tener productos hidratados más resistentes al ataque del cloruro amónico, generados por la reacción de la portlandita con las puzolanas: este comportamiento es tanto mejor cuanto más evolucionada esté la matriz con puzolana (aceleración de la reacción, A).

Al evaluar la tenacidad (figura 4.5.23) al igual que los resultados obtenidos para el módulo de rotura, los compuestos puzolánicos presentan mejor respuesta ante el agente agresor que el compuesto control. Para los 28 días de curado el compuesto control presenta valores importantes de tenacidad sólo superado por el compuesto puzolánico que contiene HSS-CVm y ligeramente por el compuesto con CVm; luego de la exposición al ambiente agresivo el control disminuye su tenacidad a valores cercanos al cero (rotura frágil). En cambio, los morteros puzolánicos, después del proceso de exposición al agente agresivo, aunque disminuyen su tenacidad se identifica un comportamiento que es notablemente superior al control.

En la figura 4.5.24a se aprecia que las fibras presentes en el mortero control están atacadas; por el contrario, las fibras presentes en los morteros con sustitución se encuentran en buen estado (figura 4.5.24 b y c); este hecho nos indica que el cloruro amónico ataca directamente a la matriz cementante y no a la fibra; en el caso del mortero control el ataque sobre la fibra se genera por la presencia de portlandita en la matriz, la cual en los morteros con sustitución ha sido fijada por las puzolanas.

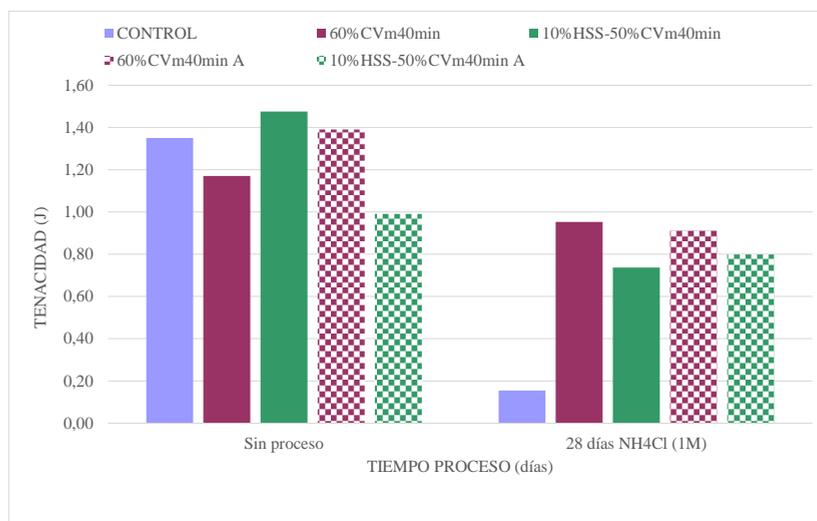


Figura 4.5.23. Tenacidad para morteros GRC sumergidos en disolución de NH₄Cl.

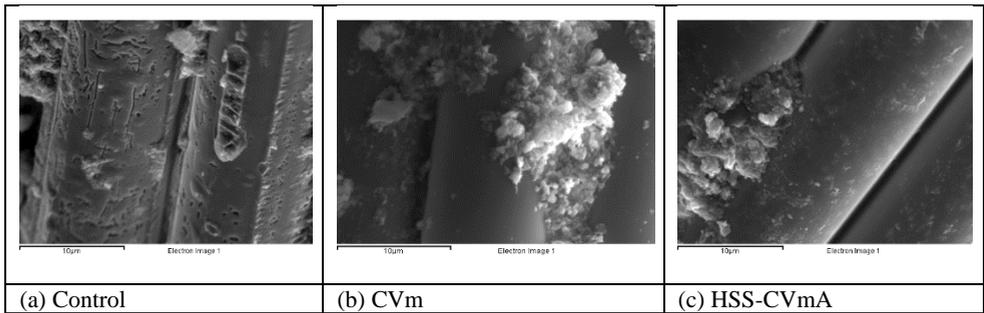


Figura 4.5.24. Micrografías SEM de las fibras procedentes de diferentes tipos de morteros sumergidos 28 días en disolución de NH_4Cl (1M).

En la tabla 4.5.3 se observa que a los 28 días de curado sólo hay presencia de hidróxido cálcico en el mortero control, valor que disminuye al aplicar el ataque ya que la portlandita se disuelve al reaccionar con el catión amonio presente en la disolución; al analizar el agua combinada de los hidratos se identifica un 0,13% corresponde a la sal de Friedel. En los sistemas con puzolana, se observa claramente que toda la portlandita ha sido consumida por la elevada proporción de puzolana modificando el entorno agresivo para las fibras.

Tabla 4.5.3. Resultados de termogravimetría para morteros sumergidos en disolución de NH_4Cl (1M). * 0.13% que corresponde a la sal de Friedel.

Sustitución	% Agua combinada de los hidratos		% $\text{Ca}(\text{OH})_2$	
	Curado 20°C	28 días NH_4Cl	Curado 20°C	28 días NH_4Cl
Control	10,27	*13,76	7,98	0,00
CVm	7,40	9,10	0,00	0,00
HSS-CVm	9,50	8,30	0,00	0,00

Para complementar el análisis anterior, se representan las curvas DTG, correspondientes a los morteros en estudio (figura 4.5.25). Se aprecian tres áreas (A, B y C), en las cuales se ubican los picos característicos resultado de la hidratación del cemento y de la reacción con las puzolanas:

- En el área A entre los 100 y 180°C, se identifican picos correspondientes a la deshidratación los silicatos cálcicos hidratados y la etringita.
- En el área B entre 180 y 220 °C, se aprecia la deshidratación de los aluminatos y silicoaluminatos cálcicos hidratados.
- En el área C entorno a los 350°C, se identifica claramente el pico de la deshidratación de la sal de Friedel para el mortero control.

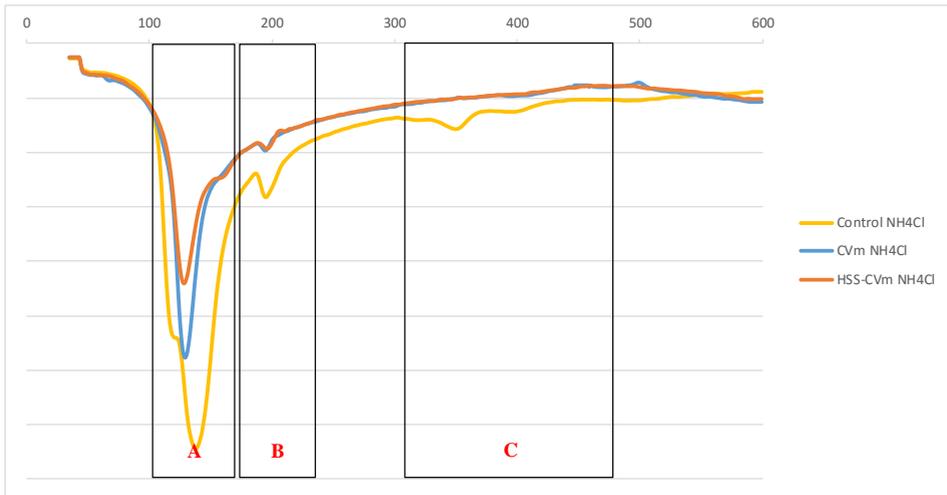


Figura 4.5.25. Curvas DTG para morteros control y puzolánicos sometidos a ataque con NH_4Cl 1M.

4.5.3.2. Exposición de morteros de GRC a disolución de H_2SO_4

Las probetas control, con sustitución puzolánica con curado estándar y con curado acelerado (A) se sumergieron en disolución 0,5M de H_2SO_4 a 20°C . Se procuró mantener la disolución en rango de pH entre 0,5 y 1,5, está fue renovada cuando el pH llegaba al límite superior. Las probetas se pesaron cada 5 días durante los dos primeros meses, cada 15 días durante el 3° y 4° mes, aproximadamente.

La figura 4.5.26 muestra la pérdida de masa de los compuestos sumergidos en disolución de H_2SO_4 0.5M. Se observa que las probetas control, al ser expuestas al agresivo, sufren una pérdida importante (alrededor de 60%), todo esto para 40 días de exposición. Por el contrario, se observa un comportamiento estable para las probetas con sustitución puzolánica durante los primeros días de exposición; posteriormente se genera un significativo incremento de la masa luego de los 28 días de exposición en especial para los compuestos con la mezcla HSS-CVm (que supera el 15%).

Este comportamiento puede ser debido a la acción de los sulfatos presentes en la solución: debido a la mayor cantidad de alúmina en estos conglomerantes con ceniza volante, se produce la formación de etringita. Esta reacción podría provocar a su vez una acción expansiva en el compuesto. Las diferencias en la evolución de la pérdida de masa, mayor para el control que para los morteros con sustitución, se ve reflejada en un mejor comportamiento mecánico para los compuestos puzolánicos.

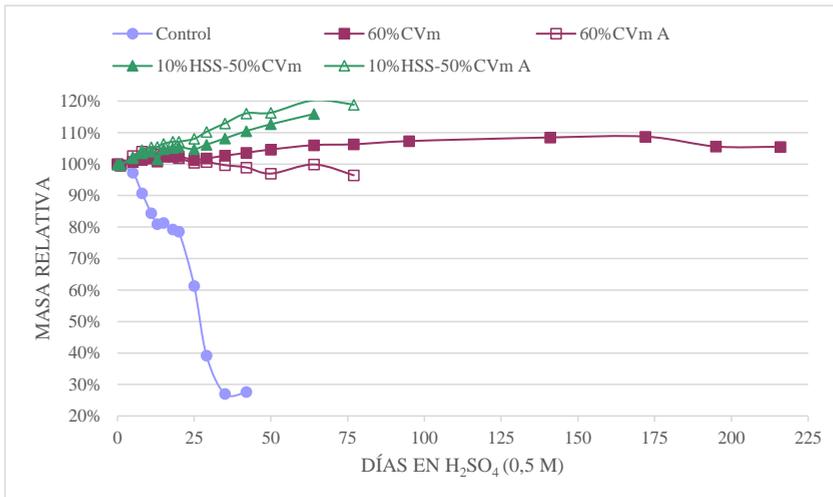


Figura 4.5.26. Variación de masa para morteros sumergidos en disolución de H₂SO₄ (0,5M).

En la figura 4.5.27 se puede observar que después del curado (28 días) y después de estar sumergidos 28 días en la disolución ácida, el composite control presenta un comportamiento mecánico menor que los compuestos puzolánicos, después de la carga máxima se presenta una rotura frágil del compuesto; por el contrario, si se evalúa el comportamiento de los compuestos con sustitución puzolánica, éstos presentan cargas superiores y un comportamiento tenaz que supera ampliamente al control.

Se observa que los morteros con aceleración de la reacción puzolánica demuestran un mejor comportamiento mecánico luego de la exposición al agente agresivo con respecto a los morteros con sustitución curados en condiciones normales. Ello significa para los composites con curado acelerado que el medio ácido apenas ha producido daño en la matriz y que probablemente las fibras siguen trabajando como antes del ataque. En el caso de los composites con curado estándar, se aprecia un aumento significativo de la resistencia: ello se traduce en que la matriz, durante la inmersión, se ha seguido hidratando y las reacciones puzolánicas han seguido produciéndose.

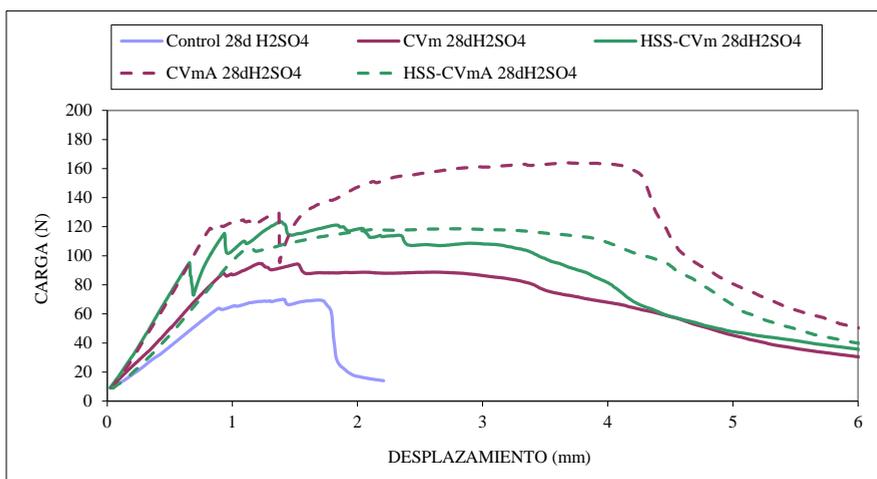


Figura 4.5.27. Curvas carga-desplazamiento para morteros sumergidos 28 días en disolución de H₂SO₄ (0,5M).

Al evaluar la tenacidad (figura 4.5.28) tanto la matriz cementante control como las que presentan sustitución puzolánica son afectadas, pero estas últimas se comportan mejor por tener productos hidratados más resistentes al ataque ácido generados por la reacción de la portlandita con las puzolanas. Luego de la exposición a la disolución ácida, el control disminuye su tenacidad a valores cercanos al cero (rotura frágil). En cambio, los morteros puzolánicos después del proceso de exposición al agente agresivo, aunque disminuyen su tenacidad, presentan comportamiento notablemente superior al control.

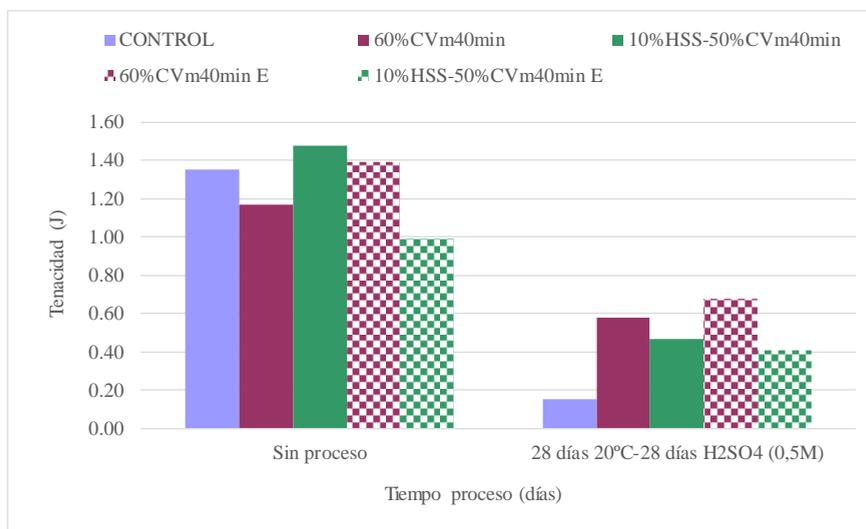


Figura 4.5.28. Tenacidad de morteros sumergidos en disolución de H₂SO₄ (0,5M).

En la figura 4.5.29 se aprecia que las fibras presentes en el residuo de la capa zona exterior de las probetas con mortero control luego de 28 días de exposición se encuentran en buen estado, es decir, no se observa el ataque del medio alcalino a la fibra que usualmente genera su deterioro, en este caso el ácido disolvió la portlandita del compuesto, este factor no dio tiempo para el ataque alcalino a la fibra. Esto contrasta con la evidencia presentada sobre el efecto del ataque del ácido sulfúrico a la matriz cementante el cual genera la pérdida de masa y la disminución de las propiedades de los compuestos.

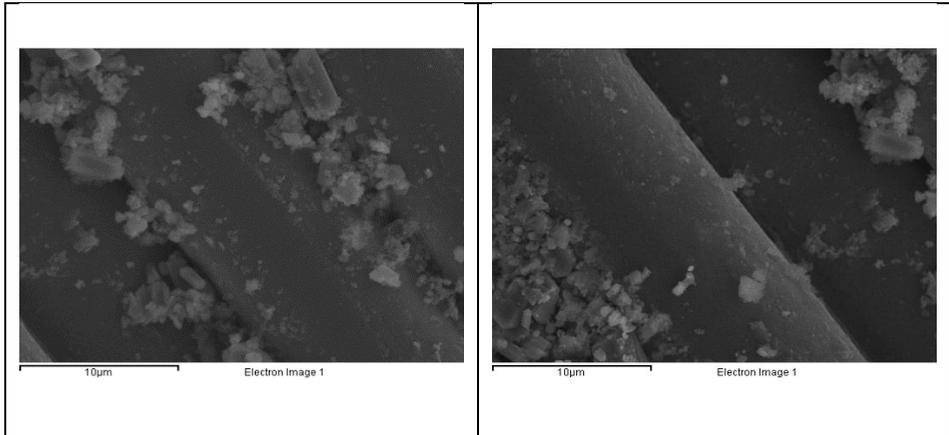


Figura 4.5.29. Micrografías SEM de fibras procedentes del residuo de la capa zona exterior de la probeta con mortero control sumergido 28 días en disolución de H_2SO_4 (0,5M).

Caso contrario el observado en la figura 4.5.30 donde se aprecia la matriz entre las fibras de la zona central de las probetas con mortero control luego de 28 días de exposición. En esta zona aún no se presenta ataque por la acción del ácido, pero en las fibras se aprecia un ataque debido medio alcalino que usualmente genera su deterioro. Si se observa el microanálisis se identifica en la imagen una cantidad importante de cristales de etringita entre las fibras, lo cual podría provocar una acción expansiva en el compuesto, esta acción puede debilitar el compuesto intensificando el ataque del agente agresivo y generando una pérdida mayor de masa que incide en la pérdida de propiedades mecánicas.

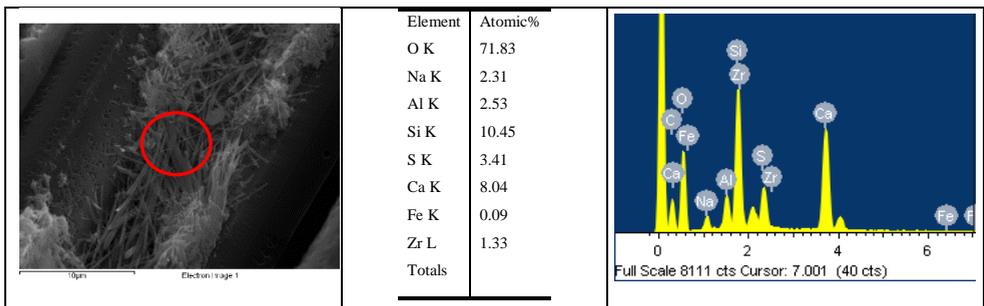


Figura 4.5.30. Composición y espectro EDS para matriz entre fibras procedentes de la zona central de la probeta con mortero control sumergido 28 días en disolución de H₂SO₄ (0,5M).

En la figura 4.5.31 se presenta el resultado de la impregnación con fenolftaleína. Los resultados indican como el compuesto control ve reducida de forma notoria su sección por pérdida de masa debido a la neutralización de hidróxido cálcico por el ácido sulfúrico, y quizá también un deterioro de los geles cementantes que hace que se pierda masa. Una matriz más porosa permite el ingreso del agresivo, este factor es evidente si se compara su respuesta con los compuestos puzolánicos que, aunque también presentan pérdidas importantes éstas son menores que las del compuesto control, lo cual indica una matriz más densa y resistente que dificulta la penetración del agresivo. Por otra parte, se observa que los composites con puzolana son neutralizados en gran medida, pero se mantiene una integridad superior de la matriz cementante.

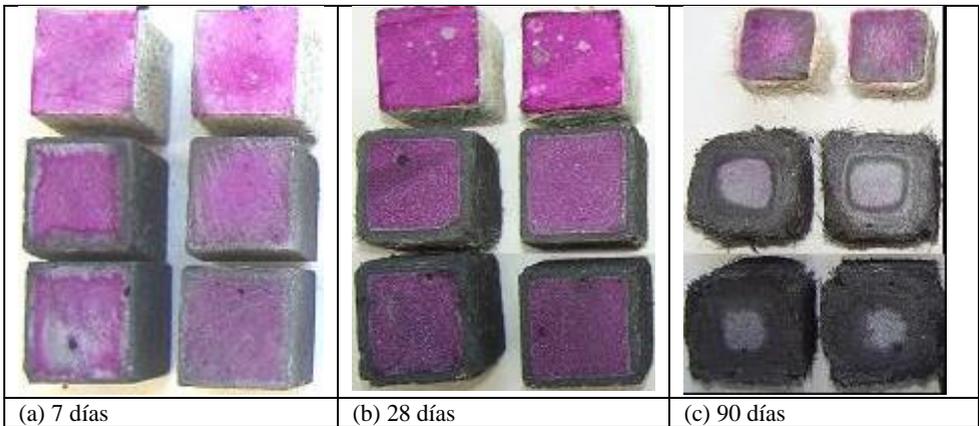


Figura 4.5.31. Fotografías de probetas sumergidas en disolución de H₂SO₄ (0,5M) luego de exposición a prueba con fenolftaleína. De parte superior a inferior control, CVm y HSS-CVm.

4.5.4. Conclusiones

4.5.4.1. Porcentaje de absorción y densidad seca

Los compuestos con sustitución puzolánica con el proceso de envejecimiento disminuyen el porcentaje de absorción e incrementa su densidad a valores similares al control, el proceso de envejecimiento activa la reacción puzolánica, originando una densificación de la matriz cementante.

La mejora y el incremento de los productos hidratados aumentan el nivel de resistencia de los compuestos, debido a la mayor fuerza de cohesión en la interfase pasta-árido y

matriz-fibra. De esa forma se permite una mejora progresiva de las propiedades mecánicas, pero más importante aún su mantenimiento en el tiempo.

Es evidente el deterioro de la superficie de las fibras en el compuesto control después del curado correspondiente a pérdida del ensamaje, situación se incrementa durante el proceso de aceleración de la reacción de hidratación del cemento donde se observa la acumulación de productos de hidratación entre los filamentos de la fibra, situación que afecta el comportamiento mecánico.

4.5.4.2. *Exposición de fibras AR a diferentes ambientes agresivos*

Al exponer las fibras a una disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se observa el ataque generado por la solución alcalina en forma de cráteres sobre la superficie, efecto del ataque se incrementa con el envejecimiento conectando las zonas afectadas e incrementando su profundidad. Con la exposición a una disolución de NaOH se identifica un deterioro diferente que genera la pérdida de masa por desprendimiento de anillos a lo largo de la longitud de la fibra. Se identificó mayor concentración de Si en la zona interna que en el anillo exterior de la fibra, que presenta mayor riqueza de Zr. Esto permite deducir que el proceso de fabricación de los filamentos se genera mayor concentración de Zr en el perímetro exterior para brindar mayor capacidad resistente al ambiente alcalino de la matriz cementante.

4.5.4.3. *Ciclos de humectación-secado*

Es evidente que el proceso de humectación-secado afecta de forma decisiva la estabilidad del composite control, se aprecia una caída significativa del comportamiento mecánico del mortero control después de los 10 ciclos; además, se identifica que el proceso de afecta de forma notable la integridad de las fibras para el mortero control. Por el contrario, queda demostrado que la incorporación de cantidades importantes de puzolanas supone una mejora en el comportamiento de los composites con fibras AR frente a los procesos de humectación-secado. El comportamiento observado para los compuestos luego de ciclos de humectación-secado con sales como NaCl , afecta ligeramente a las ventajas que aporta el uso de puzolanas en porcentajes elevados.

4.5.4.4. *Ciclos de hielo-deshielo*

Con el inicio de los ciclos se aprecia una disminución significativa del comportamiento mecánico, tanto para el mortero control como para los compuestos con sustitución puzolánica. En general, la disminución de las propiedades mecánicas se debe al efecto que tiene la congelación del agua presente en los poros del compuesto, que al incrementar

su volumen inicia un proceso de deterioro progresivo de la matriz del compuesto: ese efecto es mucho más notable para los composites con puzolana y curado estándar, puesto que presentan mayor absorción de agua.

Se observa en los compuestos puzolánicos con curado estándar (CVm y mezcla HSS-CVm) una cantidad importante de fisuras en el canto de las probetas generados por el incremento volumétrico al interior de la matriz. Es notorio que, debido a que la matriz con puzolana con curado estándar no estaba completamente desarrollada, se ha producido un debilitamiento por el efecto de la congelación del agua presente en los poros; en el caso de los especímenes con aceleración de la reacción puzolánica (A) se confirma que la aceleración de la reacción puzolánica es un factor positivo en relación con la durabilidad en hielo-deshielo.

4.5.4.5. *Exposición de morteros de GRC a disolución de NH_4Cl*

Para los 28 días de estar sumergidos en la disolución, todos los morteros disminuyen su comportamiento mecánico, debido a la reducción de masa inicial, pero un hecho notorio y muy importante, es que los morteros con sustitución igualan o se mantienen sobre el mortero control, presentando mayores resistencias los morteros con curado acelerado. Esto se debe a la relación directa con el incremento de la densidad y la disminución de grado de absorción del compuesto con la sustitución puzolánica.

El mortero control muestra un peor comportamiento mecánico debido a que el hidróxido cálcico presente en los morteros se disuelve al reaccionar con el cloruro amónico, aumentando la porosidad; los compuestos puzolánicos también son atacados pero su mejor comportamiento se debe a la presencia de productos hidratados más resistentes al ataque del cloruro amónico, generados por la reacción de la portlandita con las puzolanas.

Se aprecia que las fibras presentes en el mortero control están atacadas, en cambio las fibras presentes en los morteros con sustitución se encuentran en buen estado, este hecho nos indica que el cloruro amónico ataca directamente a la matriz cementante y no a la fibra; en el caso del mortero control, el ataque sobre la fibra se genera por la presencia de portlandita en la matriz, la cual en los morteros con sustitución ha sido fijada por las puzolanas.

4.5.4.6. *Exposición de morteros de GRC a disolución de H_2SO_4*

Se observa que las probetas control, al ser expuestas al agresivo, sufren una pérdida importante de masa; por el contrario, se observa un comportamiento estable para las probetas con sustitución puzolánica durante los primeros días de exposición, luego se

genera un significativo incremento de la masa después de los 28 días de exposición. Las diferencias en la evolución de la pérdida de masa, mayor para el control que para los morteros con sustitución, se ve reflejada en un mejor comportamiento mecánico para los compuestos puzolánicos.

El incremento de masa de los compuestos puzolánicos se debe a la acción de los sulfatos presentes en la solución: debido a la mayor cantidad de alúmina en estos conglomerantes con ceniza volante, se produce la formación de etringita que puede desencadenar la acción expansiva en el compuesto.

4.5.5. Bibliografía

1. Norma UNE-EN 1170-5: 1998. Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de la resistencia a flexión, método denominada ensayo completo a flexión.
2. P. Purnell, N.R. Short, C.L. Page. (2001) A static fatigue model for the durability of glass fibre reinforced cement. *Journal of Materials Science*, 36, pp. 5385-5390.
3. Norma UNE-EN 1170-6:1998. Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Determinación de la absorción de agua por inmersión y determinación de la densidad seca
4. Norma UNE-ENV 1170-8:1998. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Ensayo de tipo de envejecimiento a la intemperie cíclico.
5. Norma ASTM C1185-03. Standard Test Methods for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber-Cement Flat Sheet, Roofing and Siding Shingles, and Clapboards.
6. I. Girbés. (2004) Evaluación del uso de subproductos industriales de carácter puzolánico en conglomerantes de cemento Pórtland. Influencia de su utilización sobre la durabilidad de los materiales. Tesis doctoral UPV. Valencia, España.
7. V.T. Yilmaz, E.E. Lachowski, F.P. Glasser. "Chemical and microstructural changes at alkali-resistant glass fiber-cement interfaces". *J. Am. Ceram. Soc.*, 74 (12), 1991, 3054-3060.
8. J. Orlowsky, J. Orlowsky, M. Raupach, H. Cuypers, J. Wastiels. Durability modelling of glass fibre reinforcement incementitious environment. *Materials and Structures*, 38, 2005, 155-162
9. F. Puertas, A. Gil-Maroto, M. Palacios, T. Amat. "Morteros de escoria activada alcalinamente reforzados con fibra de vidrio AR. Comportamiento y propiedades". *Materiales de Construcción* 56, 2006, 79-90.

4.6. GRC proyectado: estancia en empresa Saint Gobain Vetrotex España

En este apartado final, se presenta la experiencia desarrollada durante las sesiones de trabajo en laboratorio de la empresa Saint Gobain Vetrotex España. Se elaboraron morteros de GRC mediante la técnica de proyección simultánea manual (con fibras AR de 30 mm de longitud), fabricados con cemento Pórtland sustituido por ceniza volante (CV), ceniza volante molida 40 minutos (CVm), catalizador de craqueo catalítico molido 20 minutos (FCC) y la mezcla de CVm y FCC. El tratamiento de sonicación del humo de sílice densificado (HSD) debe ser realizado justo antes de la fabricación de la mezcla, por este motivo no fue posible desarrollarlo en el laboratorio de Saint Gobain Vetrotex España, en su reemplazo se decide utilizar catalizador de craqueo catalítico molido (FCC), puzolana que también presenta reactividad elevada a edades tempranas de curado.

Para el caso particular del FCC, se puede decir que se trata de partículas que presentan forma esférica y en algunos casos irregulares, con alto grado de porosidad y de superficie específica. Adicionalmente presenta un índice de blancura con valores mínimos de 75, característica que favorece su uso como sustitución del cemento blanco, el cual requiere un índice de blancura mínimo de 85 de acuerdo con la norma UNE 80305:2001 [1]. De acuerdo con los resultados expuestos en capítulos anteriores, el mejor comportamiento de los compuestos de GRC con sustitución puzolánica se debe a varios factores:

- Los compuestos con sustitución puzolánica con el proceso de envejecimiento disminuyen el porcentaje de absorción e incrementa su densidad a valores similares al control, el proceso de envejecimiento activa la reacción puzolánica, originando una densificación de la matriz cementante.
- La mejora e incremento de los productos hidratados aumentan el nivel de resistencia del compuesto, debido a la mayor fuerza de cohesión en la interfase pasta-árido y matriz-fibra, permitiendo una mejora progresiva de las propiedades mecánicas, pero más importante aún su mantenimiento en el tiempo.
- El efecto puzolánico de la CVm, permite que la resistencia a flexión mejore con el tiempo, incluso al someter los morteros a procesos de envejecimiento. La CVm al estar molida, contribuye a la formación de una matriz más densa, por la generación de productos hidratados provenientes de la combinación con el hidróxido cálcico presente entre las fibras, favoreciendo notablemente el buen estado de la fibra después de 28 días de envejecimiento a 55°C. Adicionalmente, porcentajes altos de sustitución (60%) favorecen el proceso de fijación de cal.
- Se genera una acción conjunta entre las reacciones de la CV y el FCC, que se manifiesta en un incremento drástico de las resistencias en los primeros días del envejecimiento. La actividad puzolánica de las sustituciones, a pesar de reaccionar a intensidades y edades diferentes, permiten la reducción de la

portlandita presente por los procesos de hidratación del cemento habiéndose consumido prácticamente de forma total a los 28 días de envejecimiento.

Por lo expuesto anteriormente, el planteamiento que se desarrolla en este apartado consiste en estudiar si las adiciones minerales pueden contribuir positivamente en la mejora de las propiedades mecánicas de los compuestos de GRC proyectado, incluso después de ser sometidos a procesos de envejecimiento. Se fabricaron probetas 1,2x5x30 cm de morteros de GRC proyectado, compuestas por los siguientes materiales:

- ✗ Cemento Pórtland blanco tipo CEM BL I / 42,5R.
- ✗ Cemento Pórtland gris tipo CEM II / B – LL 42,5.
- ✗ Ceniza volante tipo F según la clasificación ASTM C-618 molida durante 40 minutos (CVm) y sin moler (CV) según características y procedimiento descrito en epígrafes 4.1.1.4 y 3.2.1 respectivamente.
- ✗ Catalizador gastado de craqueo catalítico molido durante 20 minutos (FCC).
- ✗ Árido síliceo AFA80, con un módulo de finura de 3,1.
- ✗ Fibras de vidrio AR ND de 30 mm de longitud (5% del peso del mortero).
- ✗ Superplastificante Melment L240.
- ✗ Relación agua/material cementante de 0,34, constante para todos los morteros.
- ✗ Relación árido/material cementante de 0,8, constante para todos los morteros.

Las probetas se elaboraron de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1170-5 [2], el curado de los morteros se realizó en cámara húmeda durante 100 días sumergidos en agua en las instalaciones del laboratorio de Vetrotex y en la UPV, el tiempo de curado se determinó teniendo en cuenta que los especímenes fueron fabricados en diferentes sesiones de trabajo y el tiempo para el traslado de muestras; luego las dosificaciones seleccionadas fueron sometidas a un proceso de envejecimiento controlado sumergidas en agua a 55°C durante 28 días. En la tabla 4.6.1 se detalla la dosificación empleada en la fabricación de los morteros para proyección simultánea manual.

Tabla 4.6.1. Dosificación morteros para proyección (valores en gr).

Porcentaje sustitución	Cemento CEM BL I / 52,5R	Cemento CEM II / B-L 42,5R	Sustitución puzolánica	Árido síliceo AFA80	Aditivo Melment L240	Agua de amasado
0%	1250		0	1000	12,5	425
15% FCC	1062,5		187,5	1000	25	425
30% FCC	875		375	1000	30	425
0%		1250	0	1000	13,75	425
60% CV	500		750	1000	3,75	425
60% CVm40min	500		750	1000	10	425
10%FCC50%CVm40min	500		125-625	1000	13,75	425

4.6.1. Generalidades sobre el proceso de fabricación

Los sistemas de proyección simultánea manual son utilizados cuando se requieren elementos de gran tamaño y resistencia (figura 4.6.1 a). La preparación de las probetas de mortero se realizó tomando como base el procedimiento conocido como “sprayed”, según el catálogo de fibras AR Saint-Gobain, Vetrotex S.A. [3], mediante la proyección de capas compactadas entre sí hasta formar el espesor de la lámina o panel de GRC, generalmente entre 10 y 15mm. Para lograr resultados óptimos, se realizaron modificaciones teniendo en cuenta los materiales ya descritos y las condiciones habituales de fabricación dispuestas por el laboratorio. La fabricación de los prototipos de GRC proyectado se realizó mediante un proceso de proyección manual utilizando un equipo integrado por la mezcladora de concreto de eje vertical, el contenedor para el mortero, el dispositivo de proyección, la zona de proyección y lavado (figura 4.6.1 a). En el proceso se distinguen tres fases fundamentales, la elaboración de la mezcla de un mortero convencional sin fibra, la calibración de la pistola de proyección para la fibra y para el mortero (figura 4.6.1 b), y la elaboración de los prototipos mediante la proyección manual.

4.6.1.1 Fase 1. Fabricación mortero sin fibra

Para el procedimiento de amasado del mortero se debe disponer de una mezcladora de eje vertical de alto rendimiento, el amasado se realiza a velocidad constante (figura 4.6.1 c). A continuación, se describe el proceso:

- Durante 30 segundos se ingresa primero el agua de amasado, luego la mitad del árido y seguido por 1/3 del material cementante.
- Luego durante el minuto siguiente, se adiciona lentamente la cantidad restante de árido y los 2/3 de material cementante seguidos por el aditivo plastificante (generalmente corresponde al 1% del material cementante). Se continúa mezclando entre 0,5 y 1 minuto, luego se deja en reposo 30 segundos.
- Se realiza la prueba de trabajabilidad tomando la lectura del anillo ocupado por la mezcla luego de retirado el tubo contenedor (norma UNE EN 1170-1 [4]). Se busca que la mezcla se ubique entre los anillos 4 y 6 equivalentes a 14,5 y 18,5 cm diámetro aproximadamente, condición que nos permite obtener una consistencia adecuada para el proceso proyección con la pistola.
- Después del proceso de mezclado se procede a depositarlo en la tolva de la máquina de proyección (figura 4.6.1 d). La tolva está conformada por rejillas y mallas que retienen material particulado o grumos superiores al admitido por el dispositivo de proyección (1mm) y así evitar taponamientos (figuras 4.6.1 e y f).



(a) Equipo para proyección de GRC



(b) Pistola de proyección



(c) Mezcladora de eje vertical



(d) Tolva equipo de proyección



(e) Rejilla superior tolva



(f) Rejilla intermedia y fondo tolva

Figura 4.6.1. Equipos de mezcla mortero y proyección simultánea [Elaboración propia].

4.6.1.2 Fase 2. Calibración de la pistola de proyección para la fibra y para el mortero

Antes de iniciar el proceso de preparación del mortero y depositarlo en la tolva, es necesario realizar un chequeo de operación con agua y aire para verificar que el equipo de proyección no presenta obstrucciones o fugas, además de realizar una limpieza previa. Luego se procede con la calibración de la pistola de proyección verificando el caudal de salida de mortero mediante la prueba del cubo, y la velocidad de corte y salida de la fibra mediante la prueba de la bolsa descritas en el catálogo de fibras AR Saint-Gobain Vetrotex S.A. [3].



(a) Pistola concéntrica



(b) Acceso roving de fibra a pistola



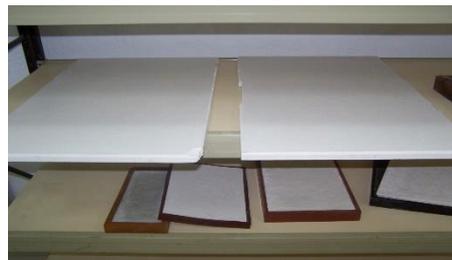
(c) Calibración caudal de salida



(d) Compactación por capas



(e) Acabado final placa



(f) Proceso de curado cámara húmeda

Figura 4.6.2. Pistola de proyección y proceso fabricación placas [Elaboración propia].

Estas pruebas se deben realizar siempre que se generen cambios en la mezcla y mínimo una vez al día. En las figuras 4.6.2 a y b, se aprecia una pistola de proyección concéntrica que permite la salida por una sola vía tanto de la fibra cortada como del mortero, se observa el punto de acceso a la pistola del roving de fibra para ser cortado por los rodillos; en la figura 4.6.2 c se muestra la prueba de caudal de salida.

4.6.1.3 Fase 3. Elaboración de prototipos por proyección manual

La proyección se realiza de manera concéntrica, proporcionando hilos cortados simultáneamente con el mortero desde la pistola generando un refuerzo en forma bidireccional. Un operario dirige la pistola en sentido longitudinal y trasversal con desplazamientos de lado a lado sobre los moldes rectangulares generando capas solapadas entre sí, la primera capa aplicada sobre el molde no contiene fibra y con la ayuda de un

rodillo se realiza la compactación de mínimo 3 capas de mortero con fibra adicionales (4.6.2 d); otro operario se encarga de controlar el espesor de la placa y el acabado final (4.6.2 e). Finalmente, las placas ya terminadas son llevadas a la cámara húmeda para iniciar el proceso de curado (4.6.2 f).

4.6.2. Propiedades mecánicas

Para el análisis del comportamiento se presentan el módulo de rotura (MOR, MPa), el módulo de elasticidad en GPa, la tenacidad en Julios (J), el grado de ganancia de resistencia de los morteros puzolánicos y el aporte a la resistencia por el efecto puzolánico y por la hidratación del cemento. En la tabla 4.6.2 se presentan los resultados generales para cada propiedad y se especifican los prototipos estudiados.

Tabla 4.6.2. Propiedades mecánicas morteros de GRC curados a 20° y envejecidos a 55°C.

DESCRIPCIÓN MORTERO	Días		MOR		GG	GCEP	GCH	Tenacidad		Módulo elasticidad	
	20°C	55°C	MPa	σ		%	%	(J)	σ	(GPa)	σ
CONTROL BLANCO	100	0	22,68	1,93	1,0	0,0	100,0	4,47	0,48	6,5	0,55
15%FCC	100	0	22,22	1,09	1,15	13,2	86,8	4,50	0,42	7,0	1,23
30%FCC	100	0	21,46	1,79	1,35	26,0	74,0	4,14	0,83	5,2	0,23
CONTROL BLANCO	100	28	14,74	0,93	1,0	0,0	100,0	1,62	0,33	11,6	1,61
15%FCC	100	28	14,78	0,73	1,18	15,2	84,8	0,91	0,29	18,7	1,75
30%FCC	100	28	26,63	1,51	2,58	61,2	38,8	7,62	1,96	8,6	0,77
CONTROL GRIS	100	0	21,04	1,40	1,0	0,0	100,0	3,58	0,46	9,7	0,63
60%CV	100	0	14,91	0,86	1,77	43,6	56,4	2,11	0,29	7,1	0,84
60%CVm40min	100	0	16,99	0,87	2,02	50,5	49,5	2,58	0,31	6,9	0,95
10%FCC-50%CVm40min	100	0	14,57	0,58	1,73	42,2	57,8	2,07	0,42	6,3	0,53
CONTROL GRIS	100	28	16,02	0,83	1,00	0,0	100,0	1,97	0,19	14,0	1,58
60%CV	100	28	18,98	1,03	2,96	66,3	33,8	3,15	0,28	8,9	0,6
60%CVm40min	100	28	23,51	1,51	3,67	72,6	27,3	4,46	0,45	9,4	1,15
10%FCC-50%CVm40min	100	28	20,17	0,85	3,15	68,2	31,8	3,27	0,31	9,0	0,68

4.6.2.1. Módulo de rotura

Se estudia el comportamiento a flexión de los compuestos mediante la evaluación del módulo de rotura (MOR), el grado de ganancia y el grado de contribución tanto por la hidratación del cemento (GCH) como por efecto puzolánico (GCEP).

Si evaluamos la figura 4.6.3, observamos a la izquierda los compuestos fabricados con cemento blanco y sustituidos por 15 y 30% de FCC. Para el tiempo de curado de 28 días el compuesto control presenta valores levemente superiores a los compuestos puzolánicos

que se ubican entre los 22,7 y 21,5 MPa; para el tiempo de envejecimiento el comportamiento del control disminuye de forma notable, igualmente para la sustitución 15%FCC (15 MPa); en cambio, para el 30%FCC la resistencia aumenta considerablemente sobre los 26,6 MPa superando la resistencia obtenida por el control durante el curado. A la derecha se aprecian los compuestos fabricados con cemento gris y sustituidos por CV, CVm y la mezcla FCC-CVm; en este caso, para el tiempo de curado la diferencia de resistencia es mayor entre el compuesto control y los compuestos puzolánicos, entre estos se destaca la CVm con el mejor comportamiento, el compuesto con FCC se ubica levemente por debajo del que contiene CV. Después del envejecimiento, de nuevo el control manifiesta una notable caída de resistencia, en cambio los compuestos puzolánicos demuestran una evolución importante siendo el que contiene CV el de menor resistencia, la cual con el proceso de molienda supera la resistencia obtenida por el control durante el curado.

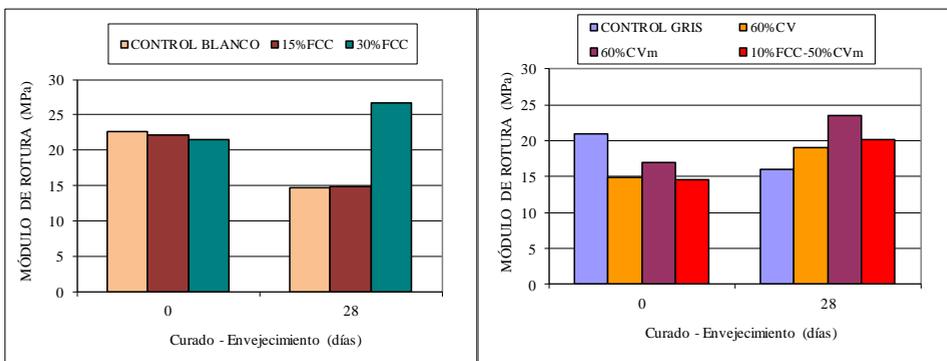


Figura 4.6.3. Módulo de rotura (MOR) compuestos de GRC curados a 20°C (100 días) y envejecidos a 55°C (28 días).

El mejor comportamiento de los compuestos con sustitución puzolánica se debe a varios factores: el efecto puzolánico de la CVm permite que la resistencia se mantenga en el tiempo, incluso al someter los morteros a procesos de envejecimiento. El efecto puzolánico se incrementa cuando la ceniza se encuentra molida (mayor superficie específica), y contribuye a la formación de una matriz más densa; las propiedades puzolánicas de la CVm facilitan la creación de productos hidratados provenientes de la reacción con el hidróxido cálcico presente entre las fibras. Es interesante destacar la influencia que tiene el porcentaje de sustitución de cemento portland por puzolana en el caso de los morteros blancos con FCC. Se observa que el proceso de envejecimiento produce una caída importante de la resistencia a flexión cuando el porcentaje de sustitución es del 15%, del mismo modo que se observa para el mortero control blanco. Sin embargo, al incrementar el porcentaje de sustitución al 30% el comportamiento cambia radicalmente: en este caso, la resistencia a flexión no solamente no disminuye, si no que aumenta alrededor de 5 MPa. Este comportamiento demuestra que la presencia de

suficiente cantidad de puzolana es clave para controlar el deterioro del composite por envejecimiento. El 30% de sustitución de cemento portland reduce la cantidad de portlandita generada en su hidratación y, por otra parte, la alta reactividad puzolánica de FCC hace que se consuma esa portlandita, dando lugar a un material compuesto estable mecánicamente.

Si evaluamos el grado de ganancia de los morteros puzolánicos (figura 4.6.4), a la izquierda se muestran los compuestos fabricados con cemento blanco y sustituidos por FCC: observamos cómo desde el curado se obtienen valores de 15 y 35% de ganancia correspondiente a los compuestos con 15%FCC y 30%FCC respectivamente superiores a la unidad correspondiente al control; con el envejecimiento el comportamiento permanece prácticamente igual para el compuesto con sustitución por 15%FCC, comportamiento diferente el que sucede al incrementar el porcentaje de sustitución a 30% de FCC, factor que incrementa de notablemente la ganancia de resistencia.

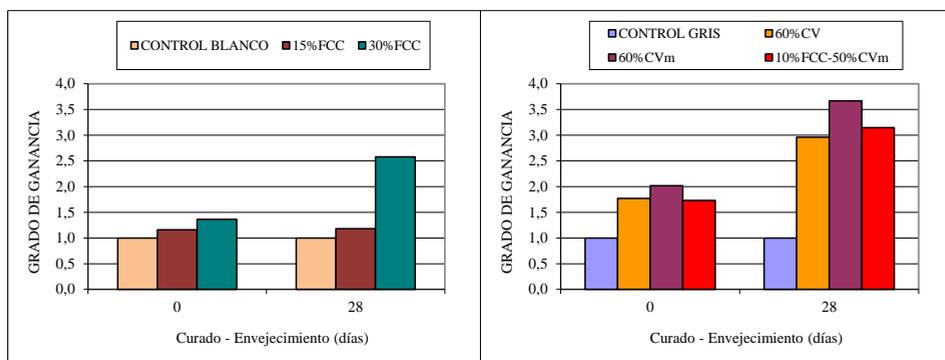


Figura 4.6.4. Grado de ganancia de compuestos de GRC curados a 20°C (100 días) y envejecidos en agua a 55°C (28 días).

A la derecha se aprecian los compuestos fabricados con cemento gris y sustituidos en un 60% por CV, CVm y la mezcla FCC-CVm; en este caso, para el tiempo de curado se presenta un comportamiento diferente al caso anterior presentando valores de ganancia superiores a la unidad para los compuestos puzolánicos entre un 50 y 100%; con el envejecimiento el control y los compuestos puzolánicos siguen el mismo comportamiento únicamente diferenciado por la magnitud de la ganancia que se ubica sobre un 200% para CV y la mezcla FCC-CV y sobre el 250% para la CVm. El mayor grado de ganancia de los compuestos puzolánicos se debe al elevado porcentaje de sustitución de cemento Portland por los materiales puzolánicos descritos; además, es importante resaltar que la pérdida de resistencia que se produce en el control con el envejecimiento es compensada solamente por la puzolana en altos porcentajes de sustitución.

En la figura 4.6.5 se observa el grado de contribución a la resistencia de los morteros. Se observa a la izquierda los compuestos fabricados con cemento blanco y sustituidos por 15 y 30% de FCC: la resistencia obtenida por el mortero control se debe en su totalidad a la hidratación del cemento, seguidas por el compuesto 15%FCC el cual debe casi un 90% de su resistencia a la hidratación del cemento tanto durante el curado y como el envejecimiento; en cambio, para el compuesto con el doble de sustitución (30%FCC) el grado de contribución del efecto puzolánico es mayor al de la hidratación del cemento que se ubica en un 74% para el tiempo de curado y disminuye a un 39% con el envejecimiento. A la derecha se aprecian los compuestos fabricados con cemento gris y sustituidos en un 60% por CV, CVm y la mezcla FCC-CVm; en este caso para el tiempo de curado se aprecia como la hidratación del cemento Portland contribuye entre un 50 y 60% a la resistencia de los compuestos, luego con el envejecimiento la mayor contribución se da por el efecto puzolánico con porcentajes entorno al 70%, siendo el caso de la CVm la que supera el 70% de contribución por la acción de la puzolana.

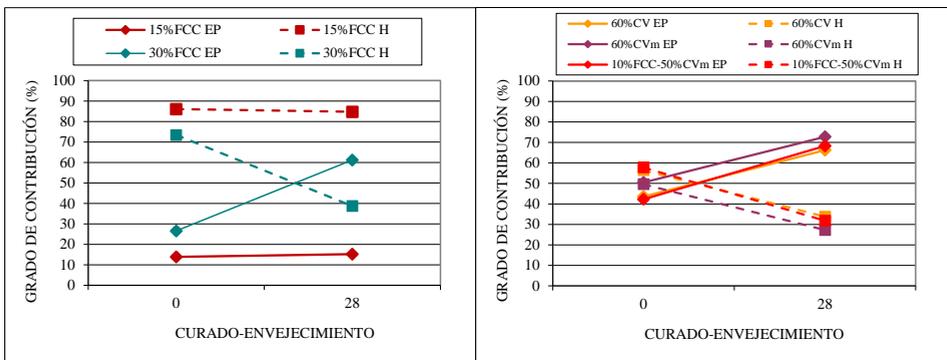


Figura 4.6.5. Grado de contribución del efecto puzolánico (EP) y la hidratación del cemento (H) de compuestos de GRC curados a 20°C (100 días) y envejecidos en agua a 55°C (28 días).

4.6.2.2. Módulo de elasticidad

En la figura 4.6.6, en general se puede observar como a los 100 días de curado el mortero control blanco y gris presentan valores 6,5 y 9,7 GPa respectivamente, valor que evoluciona a los 28 días de envejecimiento ubicándose cerca de los 11 GPa para el compuesto con cemento blanco y en 14 GPa para el compuesto con cemento gris; por el contrario, para los morteros puzolánicos se obtienen valores menores al control tanto para el curado como para el envejecimiento, sólo el compuesto 30%FCC logra valores notablemente superiores al control. Esta propiedad a diferencia de los compuestos de GRC premezclados, no mejora con el tiempo de envejecimiento para los compuestos puzolánicos, demostrando una pérdida de rigidez si los comparamos con el compuesto control.

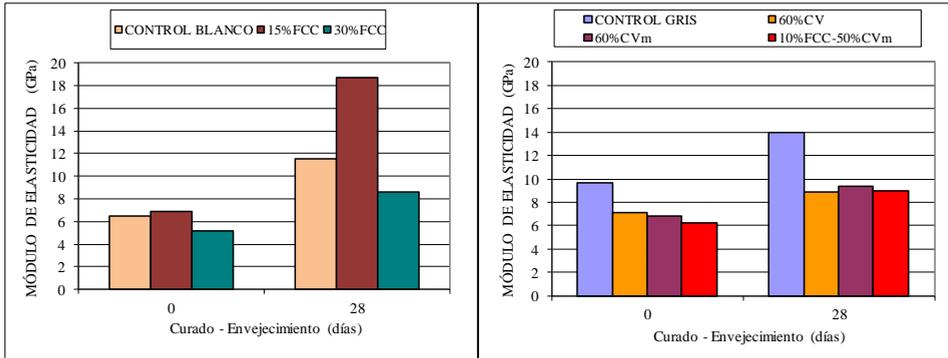


Figura 4.6.6. Módulo de elasticidad compuestos de GRC curados a 20°C (100 días) y envejecidos en agua a 55°C (28 días).

4.6.2.3. Tenacidad

Se aprecia en la figura 4.6.7 para los compuestos con fabricados con cemento blanco, una vez finalizado el proceso de curado, que la tenacidad es similar entre control y compuestos puzolánicos, sólo el 30%FCC se ubica ligeramente por debajo; con el envejecimiento se presenta una caída drástica de esta propiedad para el control y para el compuesto con 15%FCC que se ubica por debajo; para el compuesto 30%FCC el cambio es notable pasando de una tenacidad de 4J para el curado a 7,6J después del envejecimiento. Si evaluamos los compuestos con fabricados con cemento gris, para el tiempo de curado la tenacidad es muy inferior para los compuestos puzolánicos; para el tiempo de envejecimiento se presenta una caída drástica de esta propiedad para el control, caso contrario el de los compuestos puzolánicos, que mejoran notablemente destacándose el compuesto con sustitución por CVm.

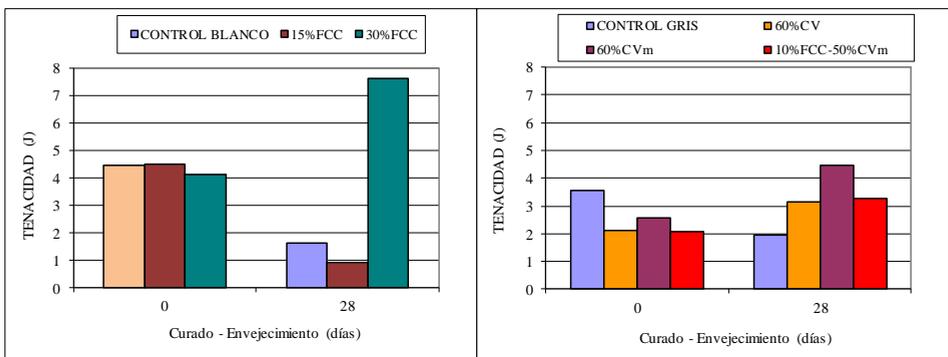


Figura 4.6.7. Tenacidad compuestos de GRC, curados a 20°C (100 días) y envejecidos en agua a 55°C (28 días).

La mejora en la tenacidad de los compuestos puzolánicos se ve favorecida por los productos de hidratación generados, evitando la presencia excesiva de portlandita entre

las fibras, hecho que genera menor agresividad del medio alcalino durante el proceso de envejecimiento por la reacción de la puzolana, evitando el deterioro de las fibras; contrario a esto, en el mortero control la presencia de portlandita entre las fibras que genera la incrustación de cristales sobre la superficie y su corrosión, generan la rotura de éstas evitando la absorción de energía.

4.6.3. Conclusiones

En general, se confirma el comportamiento mecánico de los compuestos de GRC proyectado si se compara con los resultados de los compuestos de GRC premezclado evaluados en capítulos anteriores, sólo el módulo de elasticidad demuestra un comportamiento que difiere de los resultados previos. Se debe resaltar el valor que representa este análisis, ya que se obtiene una similitud en los resultados obtenidos mediante los procedimientos seguidos en el laboratorio de la UPV comparados con las prácticas desarrolladas por el laboratorio de materiales de la empresa Saint Gobain Vetrotex España, para evaluar prototipos comerciales para la industria. A continuación, se destacan los resultados más importantes:

- El mejor comportamiento mecánico de los compuestos con sustitución se debe al efecto puzolánico de la sustitución, que permite que la resistencia se mantenga incluso con el envejecimiento; la actividad puzolánica se incrementa con la molienda de las puzolanas y cuando se adiciona en porcentajes altos. Todo esto contribuye a la formación de una matriz más densa, las puzolanas facilitan la creación de productos hidratados provenientes de su reacción con el hidróxido cálcico presente en la matriz, en especial en la cercanía o entre las fibras.
- El mayor grado de ganancia de los compuestos puzolánicos se debe al elevado porcentaje de sustitución de cemento Pórtland por los materiales puzolánicos, resaltando que la pérdida de resistencia que se produce en los compuestos control tanto blanco como gris con el envejecimiento es compensada solamente por la puzolana en altos porcentajes de sustitución. Adicionalmente, se determina que con el envejecimiento la mayor contribución a la resistencia se da por el efecto puzolánico que se incrementa a mayor porcentaje de sustitución.
- El módulo de elasticidad de los compuestos de GRC proyectado no mejora con el tiempo de envejecimiento para los compuestos puzolánicos, demostrando una pérdida de rigidez si los comparamos con el compuesto control.
- Si evaluamos la tenacidad de los compuestos, para el curado la tenacidad similar para los compuestos con cemento blanco y muy inferior para los compuestos puzolánicos, pero con el envejecimiento se presenta una caída drástica de esta propiedad para ambos compuestos control, caso contrario el de los compuestos

puzolánicos que mejoran notablemente destacándose el compuesto con sustitución por CVm y para el composite con 30%FCC.

4.6.4. Bibliografía

1. L. Soriano Martínez. Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizadores de craqueo catalítico usado (FCC). Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia. 2007.
2. Norma UNE-EN 1170-5: 1998. Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de la resistencia a flexión, método denominada ensayo completo a flexión.
3. Cem-FIL reinforcement. Catálogo de fibras AR. Saint-Gobain. España, Vetrotex S.A, 2000.
4. Norma UNE-EN 1170-1: 1998. Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de la consistencia de la matriz, método denominado por exposición.

5. CONCLUSIONES GENERALES

5.1. Caracterización físico - química

El proceso de caracterización físicoquímica de las materias primas que constituyen los compuestos de GRC en estudio, confirma el grado de amorficidad de los materiales puzolánicos estudiados; además, se comprueba la efectividad que tienen los procesos utilizados para disminuir el tamaño de partícula y aumentar la superficie específica de las puzolanas utilizadas: la molienda para la ceniza volante (CV) y el catalizador (FCC), y el proceso de sonicación para el humo de sílice densificado (HSD). Estas características favorecen la reacción puzolánica y las propiedades de los morteros de GRC.

Para el caso particular de la fibra AR ND, se identifica la presencia de los componentes mayoritarios, silicio, sodio y zirconio, este último responsable de la condición de álcali resistencia de éstas. Además, se ha demostrado que el proceso de amasado prolongado genera defectos en las fibras, separación de filamentos y roturas.

5.2. Conocimiento del GRC y adiciones activas. estudios preliminares sobre probetas 4x4x16cm

La actividad puzolánica de las sustituciones por ceniza volante molida (CVm) y su mezcla con el FCC, a pesar de reaccionar a intensidades y edades diferentes, permiten la reducción de la portlandita presente por los procesos de hidratación del cemento habiéndose consumido prácticamente de forma total a los 28 días de envejecimiento; esta condición genera matrices no agresivas durante el tratamiento de envejecimiento y ello se traduce en mejora o al menos mantenimiento de las prestaciones a flexión. La reacción del FCC, usual en los primeros días de curado, se desplaza al realizar la mezcla con la CV, presente en mayor cantidad y con mayor superficie específica, por este motivo se genera una acción conjunta entre las reacciones de la CV y FCC, que se manifiesta en un incremento drástico de las resistencias en los primeros días del envejecimiento.

5.3. GRC premezclado: mezcla de fibras y envejecimiento acelerado

Es notable la disminución de las propiedades para las diferentes longitudes de fibra AR cuando se trata de las fibras dispersables (D); contrario a esto, la combinación de fibras AR no dispersables (ND) puede mejorar ligeramente las propiedades del GRC antes de envejecer, es por eso por lo que las mejores propiedades las presentan los morteros con mezcla de fibras ND de 6 - 12 mm y 12 - 24 mm, aunque con el envejecimiento no se logra evitar la caída en la resistencia a flexión ni la baja tenacidad.

El efecto puzolánico de la CVm, permite que la resistencia a flexión mejore con el tiempo, incluso al someter los morteros a procesos de envejecimiento. La CVm, al estar molida, tiene una elevada superficie específica y contribuye a la formación de una matriz más densa, por la generación de productos hidratados provenientes de la combinación con el hidróxido cálcico presente entre las fibras, favoreciendo notablemente el buen estado de la fibra después de 28 días de envejecimiento a 55°C. Situación similar al evaluar la tenacidad de los morteros de GRC, los compuestos que no contienen puzolanas disminuyen su tenacidad a valores cercanos al cero, con el envejecimiento; en cambio los morteros puzolánicos siguen manteniendo valores significativos.

5.4. GRC premezclado y adiciones activas: propiedades mecánicas y envejecimiento acelerado

El mejor comportamiento de los compuestos con sustitución puzolánica se debe a varios factores: el efecto puzolánico de la CVm permite que la resistencia se mantenga en el tiempo; la actividad puzolánica de la CVm facilita la creación de productos hidratados, factor que contribuye a la formación de una matriz más densa; se genera una acción conjunta entre las reacciones de la CV y HSS que continua incluso después de los 28 días permitiendo la obtención de las resistencias mecánicas altas para los primeros días de envejecimiento y su mantenimiento en el tiempo. El grado de contribución a la resistencia debido al efecto puzolánico es mayor que el de la hidratación del cemento en los morteros con altos porcentajes de sustitución: durante el envejecimiento más del 70% de la resistencia se debe al efecto puzolánico.

Al estudiar el diagrama “carga-flecha” de morteros de GRC control y con sustitución puzolánica, se aprecia que el mortero control curado 28 días presenta un comportamiento dúctil, cualidad que se ve disminuida de forma importante con el proceso de envejecimiento al presentar una fuerte caída de la carga después del punto máximo (MOR), demostrando una fractura frágil. Caso contrario si evaluamos los compuestos con sustitución puzolánica, los cuales desde el proceso de curado presentan un comportamiento dúctil y desplazamientos luego de la rotura significativamente mayores al control, propiedad que se conserva después del proceso de envejecimiento, obteniendo mejoras de la resistencia a flexión, con mayor cantidad de energía absorbida, propiedad característica de un compuesto tenaz.

Al evaluar la resistencia al impacto se destaca que el mortero control presenta una respuesta al impacto superior a los compuestos con CVm y similar a los compuestos con HSS-CVm después del curado; después del proceso de envejecimiento, el comportamiento se invierte, es así como los compuestos puzolánicos presentan mejor comportamiento siendo el más notable el material que contiene CVm. Al observar la zona

de fractura en los morteros con sustitución puzolánica por CVm y la mezcla HSS-CVm curados y envejecidos se puede observar un número importante de fibras en buen estado que no se rompieron y se deslizaron saliendo de la matriz durante la rotura por el impacto, comportamiento muy diferente al del mortero control envejecido.

5.5. Compuestos de GRC y adiciones activas: envejecimiento acelerado y durabilidad

Los compuestos con sustitución puzolánica con el proceso de envejecimiento disminuyen el porcentaje de absorción e incrementa su densidad a valores similares al control: el proceso de envejecimiento activa la reacción puzolánica, originando una densificación de la matriz cementante. La mejora y el incremento de los productos hidratados aumentan el nivel de resistencia de los compuestos, debido a la mayor fuerza de cohesión en la interfase pasta-árido y matriz-fibra. De esa forma se permite una mejora progresiva de las propiedades mecánicas, pero más importante aún su mantenimiento en el tiempo.

El fenómeno de degradación de la fibra AR se confirma con la exposición directa de la fibra a disoluciones de alta basicidad; al exponer las fibras a una disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se observa el ataque generado por la solución alcalina en forma de cráteres sobre la superficie, y efecto del ataque se incrementa con el envejecimiento conectando las zonas afectadas e incrementando su profundidad; con la exposición a una disolución de NaOH se identifica un deterioro diferente que genera la pérdida de masa por desprendimiento de anillos a lo largo de la longitud de la fibra, identificando mayor concentración de Si en la zona interna que en el anillo exterior de la fibra, que presenta mayor riqueza de Zr.

El proceso de humectación-secado afecta de forma decisiva la estabilidad del composite control, se aprecia una caída significativa del comportamiento mecánico después de los 10 ciclos; además, se identifica que el proceso de afecta de forma notable la integridad de las fibras. Por el contrario, queda demostrado que la incorporación de cantidades importantes de puzolanas supone una mejora en el comportamiento de los composites con fibras AR frente a los procesos de humectación-secado. El comportamiento observado para los compuestos luego de ciclos de humectación-secado con sales como NaCl, afecta ligeramente a las ventajas que aporta el uso de puzolanas en porcentajes elevados.

Luego de los procesos de hielo-deshielo, con el inicio de los ciclos se aprecia una disminución significativa del comportamiento mecánico, tanto para el mortero control como para los compuestos con sustitución puzolánica. En general, la disminución de las propiedades mecánicas se debe al efecto que tiene la congelación del agua presente en los poros del compuesto, que al incrementar su volumen inicia un proceso de deterioro progresivo de la matriz del compuesto: ese efecto es mucho más notable para los

composites con puzolana y curado estándar, puesto que presentan mayor absorción de agua.

Luego de la exposición de los morteros de GRC a una disolución NH_4Cl , todos los morteros disminuyen su comportamiento mecánico debido a la reducción de masa inicial; pero un hecho notorio y muy importante, es que los morteros con sustitución igualan o se mantienen sobre el mortero control, presentando mayores resistencias los morteros con curado acelerado. Esto se debe a la relación directa con el incremento de la densidad y la disminución de grado de absorción del compuesto con la sustitución puzolánica. El mortero control muestra un peor comportamiento mecánico debido a que el hidróxido cálcico presente en los morteros se disuelve al reaccionar con el cloruro amónico, aumentando la porosidad; los compuestos puzolánicos también son atacados pero su mejor comportamiento se debe a la presencia de productos hidratados más resistentes al ataque del cloruro amónico, generados por la reacción de la portlandita con las puzolanas.

Al evaluar los morteros luego de la exposición de los morteros de GRC a una disolución H_2SO_4 , se observa que las probetas control, al ser expuestas al agresivo, sufren una pérdida importante de masa; por el contrario, se observa un comportamiento estable para las probetas con sustitución puzolánica durante los primeros días de exposición; luego se genera un significativo incremento de la masa después de los 28 días de exposición debido a la acción de los sulfatos presentes en la solución y a la mayor cantidad de alúmina por la presencia de ceniza volante, lo cual se traduce en la formación de etringita que puede desencadenar la acción expansiva en el compuesto. Las diferencias en la evolución de la pérdida de masa, mayor para el control que para los morteros con sustitución, se ve reflejada en un mejor comportamiento mecánico para los compuestos puzolánicos.

5.6. GRC proyectado: estancia en empresa Saint Gobain Vetrotex España

Se debe resaltar el valor que representa este análisis, ya que se obtiene una gran similitud en los resultados obtenidos mediante los procedimientos seguidos en el laboratorio de la UPV (compuestos de GRC premezclado) comparados con las prácticas desarrolladas por el laboratorio de materiales de la empresa Saint Gobain Vetrotex España (compuestos de GRC proyectado), para evaluar prototipos comerciales para la industria.

Se confirma el mejor comportamiento mecánico de los compuestos con sustitución puzolánica debido al efecto puzolánico de la sustitución, que permite que la resistencia se mantenga incluso con el envejecimiento. La actividad puzolánica se incrementa con la molienda de las puzolanas y cuando se adiciona en porcentajes altos, a excepción del módulo de elasticidad que no mejora con el tiempo de envejecimiento. El mayor grado de ganancia de los compuestos puzolánicos se debe al elevado porcentaje de sustitución

de cemento Pórtland por los materiales puzolánicos, resaltando que la pérdida de resistencia que se produce en los compuestos control tanto con cemento blanco como con cemento gris con el envejecimiento es compensada solamente por la puzolana en altos porcentajes de sustitución. Adicionalmente, se determina que con el envejecimiento la mayor contribución a la resistencia se da por el efecto puzolánico que se incrementa a mayor porcentaje de sustitución. Se ha demostrado que los composites blancos adicionados con 30% de FCC presentan unas cualidades excepcionales, lo que permite la elaboración de composites durables con fines estéticos.

5.7. Conclusión final

Se ha demostrado la viabilidad de fabricación de GRC con adiciones puzolánicas, ceniza volante molida, residuo de catalizador FCC y humo de sílice sonicado. La dosificación con elevados porcentajes de sustitución de cemento Portland por puzolanas permite disminuir de forma radical el contenido en portlandita, componente muy dañino ára la estabilidad de las fibras AR. Se ha demostrado la ventaja de este tipo de dosificaciones en cuanto al comportamiento frente al envejecimiento, de modo que los composites mantienen niveles aceptables de tenacidad y resistencia a flexión. Los GRC con puzolanas en elevado porcentaje tienen un buen comportamiento frente a procesos de humectación secado, ataque por cloruro amónico y ácido sulfúrico. Este tipo de dosificaciones permite elaborar excelentes composites tanto en premezcla como en proyección.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.5.1. Representación esquemática de compuestos reforzados con fibras	6
Figura 6.1.2. (a) esfuerzo de corte en la matriz, (b) esfuerzo de tensión en la fibra en función de la longitud de la fibra.....	7
Figura 2.1.7. Escala relativa de la fisura con interacción de la fibra.....	9
Figura 2.1.8. Mecanismos de endurecimiento en compuestos.....	10
Figura 2.1.6. Proceso de proyección simultánea automática.....	15
Figura 2.1.7. Colado y vibrado mortero preparado por el proceso de premezcla.	16
Figura 2.3.1. Microfotografía muestra embutidas en resina.....	36
Figura 2.3.2. Relación entre: (a) respuesta mecánica y desarrollo de la fisura, (b) escala relativa de la fisura con interacción de la fibra.....	41
Figura 2.3.3. Curva tensión deformación compuesto con 10% de metacaolín.....	45
Figura 2.3.4. Compuestos con 20% de metacaolín.....	46
Figura 2.3.5. Representación gráfica de la curva típica para el proceso de extracción de la fibra.....	47
Figura 2.3.6. Representación fuerza de extracción (N) vs. Apertura de fisura	48
Figura 2.3.7. (a) Relación entre módulo de ruptura y tiempo de curado; (b) relación entre energía de fractura y tiempo de curado, en condiciones naturales durante 28, 180 y 360 días y envejecimiento durante 8 días a 80.....	51
Figura 3.2.1. (a) molino de bolas, (b) molde de metacrilato, (c) mesa de vibración, (d) molde metálico, (e,) compactadora, (f) amasadora.....	59
Figura 3.2.2. Pruebas de trabajabilidad para morteros de GRC.....	60
Figura 3.2.3. (a) TG, (b) SEM, (c) Granulómetro, (d) DRX.....	63
Figura 3.2.4. Termograma o curva de descomposición térmica.....	64
Figura 3.2.5. (a) SONICATOR3000, (b) Sonda de ultrasonidos.....	66
Figura 3.2.6. Equipos utilizados para los ensayos a flexión y compresión.....	68
Figura 3.2.7. Variables curva Carga vs. Flecha.....	68
Figura. 3.2.8. (a) Péndulo Izod, (b) esquema ensayo impacto caída libre de peso.....	70
Figura 3.3.1. Fases de estudio proyecto.....	75
Figura 4.1.1. Curvas TG y DTG de las puzolanas utilizadas.....	78
Figura 4.1.2. Curvas SDTA de las puzolanas utilizadas.....	79
Figura 4.1.3. Difractograma de rayos X de la CV.....	79
Figura 4.1.4. Difractograma de rayos X del FCC.....	80
Figura 4.1.5. Difractograma de rayos X del HS.....	80
Figura 4.1.6. Diámetro medio y distribución de tamaños de partícula de acuerdo con deciles.....	82
Figura 4.1.7. Micrografías obtenidas por SEM.....	83
Figura 4.1.8. Micrografías de mezclas FCC-CV.....	84
Figura 4.1.9. Micrografía de filamento de fibra AR en matriz de cemento y mapas de distribución de elementos químicos.....	85
Figura 4.1.10. (a) filamentos fibra AR, (b) capa de ensimaje sobre fibras, (c, d) fibras dispersables AR-D, (e, f) fibras no dispersables AR-ND.....	86
Figura 4.1.11. Fibras AR-ND después del proceso de amasado con árido.....	87
Figura 4.2.1. Grado de ganancia morteros con 25%CV de sustitución.....	93

Figura 4.2.2. Grado de ganancia morteros con 50%CV de sustitución.....	94
Figura 4.2.3. Grado de ganancia de morteros con sustitución por mezcla 10%FCC-25%CV.....	96
Figura 4.2.4. Grado de ganancia morteros con sustitución por mezcla 10%FCC-50%CV.....	98
Figura 4.2.5. Grado de ganancia de morteros con mejor comportamiento a flexión.....	100
Figura 4.2.6. Grado de contribución a flexión de morteros con diferentes sustituciones.....	101
Figura 4.2.7. Grado de ganancia de morteros con mejor comportamiento a compresión.....	103
Figura 4.2.8. Grado de contribución a compresión de morteros con diferentes sustituciones.....	103
Figura 4.2.9. Fotografías probeta sometidas a varias cargas.....	104
Figura 4.2.10. Comportamiento a flexión de los morteros sometidos a varias cargas, en función del tiempo de envejecimiento.....	105
Figura 4.2.11. (a y b) Mortero control 7d 55°C, (c-d) mortero control 28d 55°C	106
Figura 4.2.12. (a) Mortero 25%CV 7d55°C, (b) mortero 25%CVm20min 7d55°C, (c) mortero 25%CVm40min 7d55°C, (d) mortero 25%CVm40min 28d55°C.....	107
Figura 4.2.13. (a, b) Mortero 50%CV 7d 55°C, (c-d) mortero 50%CVm20min 7d 55°C, (e) mortero 50%CVm40min 7d 55°C, (f) mortero 50%CVm40min 28d 55°C.....	108
Figura 4.2.14. (a) Mortero 10%FCC-25%CV 7d 55°C, (b) mortero 10%FCC- 25%CV 28d 55°C, (c) mortero 10%FCC-50%CVm40min 7d 55°C, (d) mortero 10%FCC-50%CVm20min 28d 55°C.....	109
Figura 4.2.15. Representaciones curvas DTG para diferentes sustituciones y tiempos de curado (20°C) y tiempos de envejecimiento (55°C).....	111
Figura 4.2.16. Porcentaje de cal fijada para pasta con sustitución por CV.....	113
Figura 4.2.17. Porcentaje de cal fijada para pasta con sustitución por CV y FCC.....	114
Figura 4.2.18. Pastas envejecidas 28 días a 55°C.....	115
Figura 4.3.2. Curva carga vs desplazamiento de morteros GRC con proporción variable de fibra de vidrio AR de 6 mm, D y ND.....	125
Figura 4.3.3. Propiedades mecánicas de morteros GRC con porcentaje variable de fibra de vidrio AR y E de 12mm, D y ND.....	126
Figura 4.3.4. Curva carga vs desplazamiento de morteros GRC con proporción variable de fibra de vidrio AR y E de 12mm, D y ND.....	126
Figura 4.3.5. Fotografías microscopio óptico de la zona de fractura de morteros GRC.....	127
Figura 4.3.6. Propiedades mecánicas de morteros GRC con tamaño creciente de la longitud de fibra de vidrio álcali resistente (AR) y E, dispersable en agua (D) y no dispersable (ND) a 28 días de curado a 20°C.....	128
Figura 4.3.7. Curva carga vs desplazamiento de morteros GRC con tamaño creciente de la longitud de fibra de vidrio álcali resistente y E, dispersable en agua y no dispersable a 28 días de curado a 20°C.....	129

Figura 4.3.8. Fotografías microscopio óptico zona de fractura de morteros GRC con fibras AR D y ND de 6mm y ND de 12 y 24 mm.....	130
Figura 4.3.9. Propiedades mecánicas de morteros GRC con tamaño creciente de longitud y mezcla de fibras álcali resistente (AR), dispersable en agua (D) y no dispersable (ND) a 28 días de curado a 20°C.....	131
Figura 4.3.10. Fotografías microscopio óptico zona de fractura de morteros GRC con mezcla de fibras AR D y ND de 12 y mezcla fibras AR ND de 12 y 24 mm.....	131
Figura 4.3.11. Curva carga vs desplazamiento de morteros GRC con tamaño creciente de longitud y mezcla de fibras de vidrio álcali resistente (AR), dispersable en agua (D) y no dispersable (ND) a 28 días de curado a 20°C.....	132
Figura 4.3.12. Resistencia a flexión morteros GRC seleccionados con fibras de 6 – 12 y 24 mm no dispersables (ND): antes y después de envejecimiento.....	133
Figura 4.3.13. Tenacidad morteros de GRC seleccionados con mezclas de fibras de 6, 12 y 24 mm no dispersables (ND).....	134
Figura 4.3.14. Curva carga vs desplazamiento de morteros GRC seleccionados con fibras de 6 – 12 y 24 mm no dispersables, antes y después del envejecimiento.....	135
Figura 4.3.15. Fibras en morteros con fibras AR ND envejecido en agua 28 días a 55°C.....	135
Figura 4.3.16. Resistencia a flexión de morteros de GRC con fibras ND de 12mm y la mezcla 6-12 mm, sin y con sustitución por CVm, antes y después del envejecimiento.....	137
Figura 4.3.17. Tenacidad de morteros de GRC con fibras ND de 12mm y la mezcla 6-12 mm, sin y con sustitución por CVm.....	13
Figura 4.3.18. Curva carga vs desplazamiento de morteros GRC con fibras ND de 12mm con sustitución por CVm envejecidos en agua 28 días a 55°C.....	139
Figura 4.3.19. Morteros de GRC con fibras ND de 12mm (a) y la mezcla 6-12 mm (b) con sustitución de cemento por CVm, después del envejecimiento durante 28 días a 55°C.....	139
Figura 4.4.1. Curva Carga vs. Flecha (desplazamiento).....	143
Figura 4.4.2. Módulo de rotura (MOR) compuestos de GRC curados a 20° y envejecidos a 55°C.....	146
Figura 4.4.3. Grado de ganancia de compuestos de GRC curados a 20° y envejecidos en agua a 55°C.....	147
Figura 4.4.4. Grado de contribución del efecto puzolánico y la hidratación del cemento de compuestos de GRC curados a 20° y envejecidos a 55°C.....	148
Figura 4.4.5. Módulo de elasticidad compuestos de GRC.....	149
Figura 4.4.6. Imágenes de microscopio electrónico del compuesto control con y sin envejecimiento.....	150
Figura 4.4.7. Imágenes de microscopio electrónico de los compuestos puzolánicos con envejecimiento.....	151
Figura 4.4.8. Tenacidad de los compuestos de GRC con el tiempo de curado y el envejecimiento.....	152
Figura 4.4.9. Fotografías microscopio óptico para la zona de fractura de morteros GRC.....	153

Figura 4.4.10. Proceso de extracción de la fibra: (a) Curvas ancho de fisura vs carga [10], (b) Curvas tensión vs deformación	154
Figura 4.4.11. Curvas carga-desplazamiento de morteros de GRC con y sin envejecimiento.....	156
Figura 4.4.12. Resistencia al impacto Péndulo Izod, composites de GRC.....	158
Figura 4.4.13. Fotografías microscopio óptico de la zona de fractura de morteros GRC.....	159
Figura 4.4.14. Resistencia al impacto de compuestos de GRC por caída de peso (esfera de 108 gr) a una altura de 100 cm sobre probetas de 10x10x1cm	160
Figura 4.4.15. Resistencia al impacto de compuestos de GRC por caída de peso (540 gr) a una altura de 100 cm sobre probetas de 15x15x2cm	161
Figura 4.4.16. Evolución de las fisuras durante los impactos por caída de peso sobre compuestos de GRC envejecidos.....	162
Figura 4.5.1. Absorción y densidad seca para compuestos de GRC con sustitución por CVm y la mezcla HSS-CVm.170	170
Figura 4.5.2. Módulo de rotura para compuestos de GRC curados, con aceleración de la reacción puzolánica y envejecidos.....	171
Figura 4.5.3. Módulo de elasticidad para compuestos de GRC curados, con aceleración de la reacción puzolánica y envejecidos.....	171
Figura 4.5.4. Tenacidad para compuestos de GRC curados, con aceleración de la reacción puzolánica y envejecidos.....	172
Figura 4.5.5. Fibras AR extraídas de morteros curados 28 días a 20°C (a, b y c) y envejecidos 28d55°C (d, e y f).....	172
Figura 4.5.6. Mecanismo de degradación de los filamentos de las fibras.....	174
Figura 4.5.7. Fibras AR sumergidas en disolución saturada de Ca (OH) ₂	175
Figura 4.5.8. Fibras AR sumergidas en disolución de NaOH.....	176
Figura 4.5.9. Descripción ciclo de humectación – secado.....	177
Figura 4.5.10. Módulo de rotura para morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con agua.....	178
Figura 4.5.11. Tenacidad de morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con agua.....	178
Figura 4.5.12. Micrografías SEM de las fibras procedentes de diferentes tipos de morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con agua.....	179
Figura 4.5.13. Módulo de rotura para morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con NaCl.....	180
Figura 4.5.14. Tenacidad para morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con NaCl.....	181
Figura 4.5.15. Micrografías SEM de las fibras procedentes de diferentes tipos de morteros GRC sometidos a pruebas de humectación - secado con NaCl.....	182
Figura 4.5.16. Curvas DTG para morteros control y puzolánicos sometidos a 50 ciclos de humectación - secado con NaCl.....	183
Figura 4.5.17. Descripción de los ciclos de hielo - deshielo.....	184
Figura 4.5.18. Módulo de rotura para morteros sometidos a pruebas de hielo - deshielo.....	185
Figura 4.5.19. Tenacidad para morteros sometidos a pruebas de hielo - deshielo.....	185

Figura 4.5.20. Fotografías de las probetas sometidas a 50 ciclos de hielo - deshielo.....	186
Figura 4.5.21. Variación de masa para morteros de GRC sumergidos en disolución de NH_4Cl	188
Figura 4.5.22. Módulo de rotura para morteros GRC sumergidos en disolución de NH_4Cl	188
Figura 4.5.23. Tenacidad para morteros GRC sumergidos en disolución de NH_4Cl	189
Figura 4.5.24. Micrografías SEM de las fibras procedentes de diferentes tipos de morteros sumergidos 28 días en disolución de NH_4Cl (1M).....	190
Figura 4.5.25. Curvas DTG para morteros control y puzolánicos sometidos a ataque con NH_4Cl 1M.....	191
Figura 4.5.26. Variación de masa para morteros sumergidos en disolución de H_2SO_4 (0,5M).....	192
Figura 4.5.27. Curvas carga-desplazamiento para morteros sumergidos 28 días en disolución de H_2SO_4 (0,5M).....	193
Figura 4.5.28. Tenacidad de morteros sumergidos en disolución de H_2SO_4 (0,5M).....	193
Figura 4.5.29. Micrografías SEM de fibras procedentes del residuo de la capa zona exterior de la probeta con mortero control sumergido 28 días en disolución de H_2SO_4 (0,5M).....	194
Figura 4.5.30. Composición y espectro EDS para matriz entre fibras procedentes de la zona central de la probeta con mortero control sumergido 28 días en disolución de H_2SO_4 (0,5M).....	194
Figura 4.5.31. Fotografías de probetas sumergidas en disolución de H_2SO_4 (0,5M) luego de exposición a prueba con fenoltaleína.....	195
Figura 4.6.1. Equipos de mezcla mortero y proyección simultánea.....	202
Figura 4.6.2. Pistola de proyección y proceso fabricación placas.....	203
Figura 4.6.3. Módulo de rotura (MOR) compuestos de GRC curados a 20°C (100 días) y envejecidos a 55°C (28 días).....	205
Figura 4.6.4. Grado de ganancia de compuestos de GRC curados a 20°C (100 días) y envejecidos en agua a 55°C (28 días).....	206
Figura 4.6.5. Grado de contribución del efecto puzolánico (EP) y la hidratación del cemento (H) de compuestos de GRC curados a 20°C (100 días) y envejecidos en agua a 55°C (28 días).....	207
Figura 4.6.6. Módulo de elasticidad compuestos de GRC curados a 20°C (100 días) y envejecidos en agua a 55°C (28 días).....	208
Figura 4.6.7. Tenacidad compuestos de GRC, curados a 20°C (100 días) y envejecidos en agua a 55°C (28 días).....	208

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.6.1. Eficiencia del reforzamiento de compuestos con fibras orientadas en varias direcciones.....	7
Tabla 2.1.7. Principales componentes del ensimaje	12
Tabla 2.1.8. Componentes del vidrio E.....	13
Tabla 2.1.9. Componentes del vidrio álcali-resistente	13
Tabla 2.1.10. Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio AR.....	14
Tabla 2.1.6. Propiedades mecánicas GRC	17
Tabla 2.3.1. Clasificación, composición y características de las partículas de adiciones activas para cemento.....	24
Tabla 2.3.2. Composición química promedio de las cenizas volantes.....	29
Tabla 2.3.3. pH pastas de cemento sometidas 21 días a proceso de envejecimiento a 80°C.....	43
Tabla 3.1.1. Composición química promedio de los cementos (% en peso).....	55
Tabla 3.1.2. Composición de fibras vidrio AR y fibras vidrio E.....	56
Tabla 3.1.3. Granulometría árido AFA80.....	56
Tabla 3.1.4. Análisis promedio de agua potable.....	57
Tabla 3.1.5. Características técnicas aditivos.....	57
Tabla 3.1.6. Características de los reactivos utilizados.....	57
Tabla 3.2.1. Procesos de molienda utilizados	58
Tabla 3.2.2. Fórmulas para el cálculo de la cantidad de hidróxido cálcico, cal fijada y agua combinada de los hidratos.....	62
Tabla 3.2.3. Resistencia a flexión (UNE-EN 1170-5:1998 y 196-1:1996).....	69
Tabla 3.2.4. Índices específicos de resistencia para evaluar el comportamiento mecánico de los morteros.....	69
Tabla 3.2.5. Equivalencia en días para los procesos de envejecimiento acelerado.....	71
Tabla 3.2.6. Fórmulas para el cálculo del % de absorción y la densidad seca....	72
Tabla 4.1.1 Composición química de los materiales puzolánicos (%).....	77
Tabla 4.1.2. Parámetros granulométricos de muestras estudiadas.....	81
Tabla 4.1.3. Composición química fibras AR (%).....	85
Tabla 4.2.1. Dosificación morteros de GRC fabricados	91
Tabla 4.2.2. Resistencias a flexión de morteros con 25% de sustitución por CV	92
Tabla 4.2.3. Resistencias a flexión de morteros con 50% de sustitución por CV	94
Tabla 4.2.4. Resistencias a flexión morteros con sustitución por mezcla 10% FCC-25% CV.....	95
Tabla 4.2.5. Resistencias a flexión de morteros con sustitución por mezcla 10% FCC-50% CV.....	97
Tabla 4.2.6. Morteros que presentan mejor comportamiento a flexión.....	99
Tabla 4.2.7. Morteros que presentan mejor comportamiento a compresión.....	102
Tabla 4.2.8. Porcentajes hidróxido cálcico y cal fijada para pastas con sustitución puzolánica.....	112
Tabla 4.3.1. Dosificación morteros de GRC fabricados	121

Tabla 4.3.2. Propiedades mecánicas mortero de GRC curados a 20°C con diferentes longitudes y tipos de fibra: fibra de vidrio álcali resistente (AR), fibra vidrio E (E), dispersables en agua (D) y no dispersables (ND).....	123
Tabla 4.4.1. Dosificación morteros de GRC fabricados.....	142
Tabla 4.4.2. Resistencia a flexión según norma UNE-EN 1170-5:1998.....	143
Tabla 4.4.3. Propiedades mecánicas morteros de GRC curados a 20° y envejecidos a 55°C.....	145
Tabla 4.4.1. Dosificación morteros de GRC fabricados.....	168
Tabla 4.5.2. Resultados de termogravimetría sobre morteros sometidos a pruebas de Humectación - secado con NaCl.....	182
Tabla 4.5.3. Resultados de termogravimetría para morteros sumergidos en disolución de NH ₄ Cl (1M).....	190
Tabla 4.6.1. Dosificación morteros para proyección.....	200
Tabla 4.6.2. Propiedades mecánicas morteros de GRC curados a 20° y envejecidos a 55°C.....	204