



Capítulo 2

**Diseño y control de mezclas de
microconcreto**

En el presente capítulo se muestran los procesos de diseño y control durante el proceso de fabricación de microconcreto como una matriz de mortero fino para ser fibro-reforzada con fibras de vidrio y fibras de origen natural. Además, se describirá de forma general la elaboración, colocado, curado y propiedades mecánicas del microconcreto simple sin fibras de refuerzo.

Composición: diseño de mezcla de microconcreto

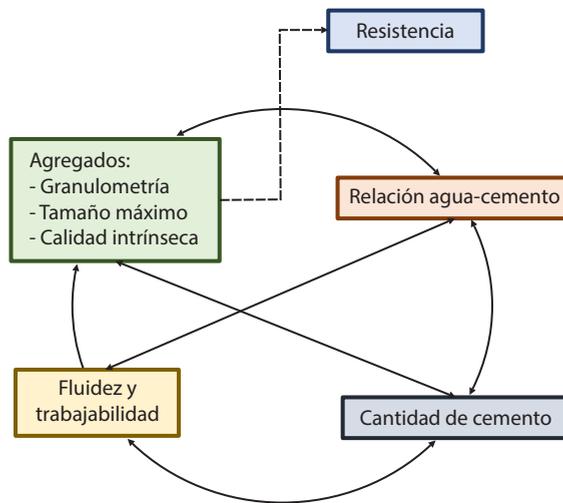
El microconcreto, como la mayoría de los materiales de ingeniería, debe presentar un proceso metodológico en el cual se determinen las características requeridas, a este proceso se le conoce como diseño de mezcla (Instituto del Concreto, 1997). Las características para el diseño de mezcla pueden incluir propiedades físicas del microconcreto fresco, propiedades mecánicas del microconcreto endurecido y la inclusión, exclusión o límites de componentes específicos (Sánchez, 2001). La composición de del microconcreto, proporcionado a través del diseño de mezclas, especifica las cantidades de cada uno de los componentes que lo conforman. El proporcionamiento de la mezcla es el proceso de determinación de las cantidades de materiales de la mezcla, ya sea mediante el uso de materiales locales como de materiales importados para que se logren las características especificadas (Kosmatha *et al.*, 2004). Según metodologías internacionales estandarizadas, un microconcreto adecuadamente proporcionado debe presentar cualidades cuantificables para el concreto fresco o el concreto ya endurecido. A continuación, se mencionan algunas de las características propias del microconcreto bien proporcionado:

- Fluidez y manejabilidad aceptable del microconcreto fresco
- Propiedades de durabilidad y resistencia del material endurecido
- Bajo costo de construcción comparable con su funcionalidad

Selección de las características de la mezcla

Como se mencionó anteriormente, el diseño de mezclas se realiza en función de las características propias esperadas en el microconcreto, desde su elaboración hasta su utilización, por lo que antes de determinar las cantidades y proporción de los materiales propios para la fabricación de la mezcla de microconcreto, se deben seleccionar las diferentes características que se esperan de este (Shetty, 2006). Las características del microconcreto se seleccionan de acuerdo con la finalidad y uso que se le vaya a dar, puesto que las características propias del compuesto endurecido -como lo son la exposición al ambiente, el tamaño y forma del elemento construidos, además del comportamiento físico, mecánico y químico del microconcreto- son las que darán los parámetros de resistencia y durabilidad que deberá tener el mismo (Li, 2011). Las características deben reflejar las necesidades de la estructura, por ejemplo, para un sistema de entrepiso es vital conocer el límite a flexión de los elementos y su rigidez en función de la elasticidad del material y forma. La Figura 20 muestra un esquema con las variables que se generalmente influyen en las características del microconcreto.

Figura 20. Esquema simplificado de las variables que se generalmente influyen en las características del microconcreto



Fuente: Adaptado de Porrero *et al.* (2009).

Una vez se haya determinado las características de la mezcla, tanto fresca como endurecida, se procede a proporcionar las cantidades de cada componente que forma el compuesto. Por lo general, las propiedades esperadas en el microconcreto endurecido dependen principalmente de la calidad de la pasta, siendo la relación agua-cemento la que da el punto de partida para la proporción de los materiales (Sánchez, 2001). En el caso del microconcreto para fabricación de GRC se espera que la cantidad de cemento sea igual a la cantidad de agregado fino en peso, según Comino (1995), Purnell *et al.* (1999) y Lalinde (2020). Las mezclas de microconcreto se deben mantener lo más sencillas posible, pues un número excesivo de componentes dificulta el control de calidad del compuesto en la obra; sin embargo, no se debe descuidar en ningún caso la tecnología del concreto como tal (Kosmatha *et al.*, 2004).

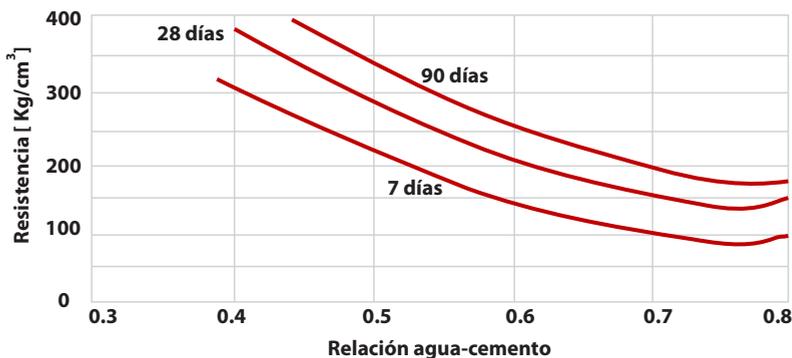
- **Relación agua-cemento según la relación de resistencia**

La relación agua-cemento es el parámetro más relevante al momento de iniciar con el diseño de la mezcla., esto se debe a que esta característica se relaciona directamente con la capacidad de resistencia a la compresión del microconcreto (Instituto del Concreto, 1997). Aunque se debe considerar que la relación agua-cemento es inversamente proporcional a la capacidad de resistencia a la compresión del compuesto, ya que a menor relación agua cemento, mayor será la resistencia a la compresión. Por otra parte, existen otros factores de igual o mayor importancia para el diseño de mezclas de concreto, dentro de las cuales se encuentra: durabilidad, permeabilidad, resistencia al desgaste, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, entre otros (Kosmatha *et al.*, 2004).

Los microconcretos que siguen las recomendaciones estandarizadas por metodologías internacionales como ASTM, es decir, que estén totalmente compactados, producidos con agregados no fracturados o desgastados, su diseño lo gobierna el agua de mezclado (Li,

2011). Se debe considerar que la resistencia de la pasta (cemento y agua) en el microconcreto dependerá directamente de la calidad y de la cantidad de componentes reactivos en la pasta y de su grado de hidratación (Sánchez, 2001). La Figura 21 muestra tres curvas que relacionan la resistencia a la compresión y la relación agua-cemento del concreto en diferentes edades de secado; se evidencia que a mayor relación agua-cemento, menor será la resistencia que alcance el compuesto.

Figura 21. Curvas de relación entre la resistencia a la compresión y la relación agua-cemento



Fuente: adaptado de Porrero *et al.* (2009).

Ahora bien, aunque la relación agua-cemento es determinante en la resistencia del material, como ya se mencionó, se deben considerar otros factores que afectan también a la resistencia. De tal forma que no es posible estandarizar que cierta relación agua-cemento “óptima” resulte en una resistencia específica (Shetty, 2006). Esto se debe a que la diferencia en la resistencia –ya sea por compresión, tracción o flexión del microconcreto para una dada relación agua-cemento– puede diferir por variaciones en la calidad de los materiales. Un cambio del tamaño, diferente granulometría, rugosidad en la textura superficial, forma, resistencia y rigidez de los agregados puede generar un compuesto frágil, mal compactado y sin adherencia entre sus componentes. Además, las diferencias en los tipos y fuentes de del cemento, contenido de aire incluido, ya sea incorporado por diseño, o aire no extraído por ausencia de vibrado, la presencia de aditivos en grandes cantidades y una curado mal ejecutado, pueden afectar otros factores como la durabilidad e ineficiencia durante la vida útil del compuesto (Kosmatha *et al.*, 2004).

Por otra parte, aunque no se pueda estandarizar la relación agua-cemento para determinada resistencia, sí se puede dar un punto de partida que se aproxime a la resistencia a la cual se espera llegar. El libro *Diseño y control de mezclas de concreto* de Kosmatha *et al.* (2004) presenta diferentes relaciones agua-cemento para determinado tipo de resistencia y condición de exposición que tendrá el concreto endurecido. A continuación, se presenta la Tabla 9 que indica la relación agua-cemento máxima y resistencia de diseño mínima para varias condiciones de exposición.

Tabla 9. Relación agua-cemento máxima y resistencia de diseño mínima para varias condiciones de exposición

Condición de exposición	Relación agua-cemento máxima por masa de concreto	Resistencia a compresión de diseño mínima f_c' , kg/cm ² (MPa) [lb/pulg ²]
Protegido de exposición a congelación-deshielo, de sales y de sustancias agresivas.	Dependerá de la trabajabilidad del material, sin superar 0.65.	Según requisitos estructurales.
Baja permeabilidad.	0.50	280 (28) [4000]
Expuesto a congelación-deshielo.	0.45	320 (31) [4500]
Para protección de corrosión del refuerzo (armadura). Expuesto a cloruro de las sales descongelantes. Agua salobre, agua del mar.	0.40	350 (35) [5000]

Fuente: Kosmatha *et al.* (2004).

Por otra parte, los microconcretos son materiales que no incluyen agregado grueso dentro de sus mezclas, por lo que la relación agua-cemento debe ser inferior para mantener la resistencia esperada. En su mayoría, los diferentes manuales y estándares de fabricación de microconcreto sugieren que la relación agua-cemento no supere 0.35 o una relación 1:3, es decir, que por cada parte de agua se agreguen tres partes de cemento en peso.

- **Agregados y contenido de aire en la mezcla**

Los agregados son aquellos materiales de origen pétreo que se utilizan para dar consistencia y adherencia a las mezclas de concreto. Dependiendo de su tamaño puede categorizar al concreto como un microconcreto, es decir, el microconcreto es un tipo de concreto que cuenta solo con agregado fino (Neville y Brooks, 2010). En la práctica al microconcreto se le conoce como mortero, el cual es una matriz que se conforma por una pasta de cemento, agua y aditivos y agregados finos (Sánchez, 2001). Los agregados presentan dos características que tienen una influencia significativa dentro de las mezclas, ya que dichas características afectan directamente la trabajabilidad del microconcreto fresco. Por un lado, está la granulometría, que es la forma, distribución y tamaño de las partículas; y, por otro lado, está la naturaleza de la partícula, su textura, porosidad, dureza, resistencia y procedencia (Instituto del Concreto, 1997).

La granulometría de las partículas es una de las características más importantes, ya que de esta depende el costo del compuesto y la correcta funcionalidad de la matriz, puesto que al tener partículas del mismo tamaño y forma, no se ocuparían correctamente los espacios haciendo que no se distribuyan los componentes de la mezcla de forma correcta generando

una ineficiencia en la funcionalidad del mortero (Porrero *et al.*, 2009). Por otra parte, una granulometría distribuida en varios tamaños y forma de las partículas presentará una mejor distribución de los componentes, generando una matriz de mortero eficiente y menos costosa que la matriz de mortero sin granulometría específica (Li, 2011). Además, se debe mencionar que el contenido de aire en las mezclas depende directamente de la granulometría de los agregados, de tal forma que se debe evitar dejar contenido de aire por falta de una correcta granulometría. En el caso de los concretos especiales que requieren inclusión de aire por exposición a condiciones de congelación-deshielo, se deben utilizar aditivos que controlen la correcta distribución de los vacíos y no debe utilizarse la granulometría del agregado para conseguir tal fin (Grijalva, 2020).

Como se ha mencionado anteriormente, para el microconcreto solo se ocupa agregado fino, en el caso más común es la arena y con excelentes propiedades mecánicas se tiene la arena de cuarzo. Aunque se puede utilizar otros agregados como arcilla calcinada, roca triturada, viruta de plástico molido, concreto reciclado, entre otros. Según diferentes manuales y estándares de fabricación de microconcreto, se sugiere el uso de arena con tamaño de partícula entre 300 μm y 600 μm . En la práctica se clasifica este material con lo que pasa el tamiz 30 y se retiene en el tamiz 50 (Instituto del Concreto, 1997).

- **Aditivos para mezclas de microconcreto**

Los aditivos que se añadan al concreto durante la etapa de mezclado dependerán directamente del propósito para el que se esté añadiendo. Teniendo en cuenta que en el mercado actual existen aditivos plastificantes, fluidizantes, retardantes, acelerantes, resinas, epóxicos, aglutinantes, autocompactantes, entre otros. Se debe considerar según las necesidades el tipo de aditivo a utilizar. En el caso del microconcreto, se requiere de buena trabajabilidad, lo cual no se logra con la relación agua-cemento, que es baja y, por lo tanto, sin aditivos se tendrá un mortero endurecido con poca trabajabilidad, de tal forma que se debe añadir un aditivo fluidizante y/o plastificante. Otros aditivos como las resinas dispersoras serán requeridas cuando se desea adicionar fibras de refuerzo a la mezcla de microconcreto (Neville y Brooks, 2010).

Figura 22. Tipos de aditivos para variar o modificar las características del concreto



Fuente: Tecnología del conocimiento (2016).

Proporcionamiento de la mezcla de microconcreto

El proporcionamiento de la mezcla de microconcreto es la etapa en la que se definen las cantidades de cada uno de los materiales que serán incluidos dentro del compuesto (Kosmatha *et al.*, 2004). El proporcionamiento se puede hacer de varias formas siguiendo los parámetros establecidos desde investigaciones empíricas hasta estudios de laboratorio más complejos que presenten un procedimiento estandarizado por alguna norma o por algún manual metodológico (Instituto del Concreto, 1997). Dentro de los métodos más comunes están el método de proporcionamiento a través de la masa y método del volumen absoluto. Para los dos métodos se debe definir una cantidad total de concreto a diseñar, dicha cantidad será definida por el total de compuesto a utilizar o por una medida arbitraria que sea práctica para el entendimiento del fabricante (Li, 2011).

El método de proporcionamiento de mezcla de concreto, a través de masa o del peso, es relativamente sencillo en comparación con otros métodos, además, son rápidos para estimar las proporciones de la mezcla. Este método parte de una masa supuesta o conocida de concreto por unidad de volumen, generalmente se supone que se va a realizar un metro cúbico de concreto, y luego se proporciona a la cantidad de compuesto que se requiera (Harmsen, 2002). Por otra parte, se tiene el método del volumen absoluto, el cual es un método más preciso, ya que requiere de las densidades aparentes o gravedad específica de todos los componentes, de tal forma que se pueda calcular el volumen absoluto que cada uno ocupará en una unidad de volumen de concreto (Sánchez, 2001). Aunque se debe considerar que en la práctica los materiales se encuentran en forma suelta y será difícil tener en la práctica un volumen preciso que sea comparable con los cálculos realizados; por tal motivo, lo que se hace en la práctica es realizar el diseño de la mezcla por el método del volumen absoluto (que es más preciso) y hacer la conversión de las cantidades a peso utilizando la densidad de los materiales. De esta forma, se evitará tener discrepancias entre lo diseñado, la mezcla del compuesto y la colocada en el sitio.

Otra forma de proporcionar las cantidades de materiales para la elaboración de concreto y/o microconcreto, es a partir de datos de campo, es decir, para este método se parte de una mezcla base utilizada en algún otro proyecto (Kosmatha *et al.*, 2004). La proporción de los materiales debe satisfacer las necesidades básicas de resistencia y durabilidad, por lo que se debe seguir, además de la misma proporción, los mismos procedimientos de mezclado y colocación, de tal manera que se debe controlar la mezcla elaborada teniendo en cuenta que al ensayar el concreto replicado se obtenga una variación máxima de 7 MPa en la resistencia a la compresión (Instituto del Concreto, 1997) (Shetty, 2006).

Por último, se permite también el uso del proporcionamiento a través de mezclas de prueba, este método se utiliza cuando no se dispone de ensayos de campo previos, por lo que, a tanteo o con metodología empírica, se proporcionan las cantidades de material del compuesto, luego se realizan, por lo menos, tres mezclas con tres relaciones agua-cemento distintas y tres contenidos de cemento diferentes, con el fin de producir un rango de resistencias (Kosmatha *et al.*, 2004). Las mezclas de prueba deben tener una trabajabilidad que no supere el 0,5 % del máximo permitido y se deben producir y curar tres probetas para cada relación agua-cemento siguiendo los procedimientos del curado que están estipulados en la Norma Técnica Colombiana NTC 1377 (1994) y el estándar internacional ASTM C192/C192M (2019).

Dosificación y mezclado del microconcreto

La dosificación es el proceso de medida, por masa o por volumen, de los componentes del microconcreto y su introducción en la mezcladora (Kosmatha *et al.*, 2004). Dependiendo de la cantidad de material compuesto que se requiera y del tamaño y capacidad de la mezcladora, podrán hacerse más de una amasada del compuesto, por lo que, para garantizar una homogeneidad en todo el microconcreto, cada vez que se haga una amasada deberá medirse con la mayor precisión posible los componentes del microconcreto y seguir un procedimiento de amasado estándar. Aunque se mencionó que los materiales se pueden medir por masa o por volumen, se debe tener cuidado con las medidas que pueden llegar a ser no precisas. En el caso de los materiales sueltos, como el cemento y la arena, dependiendo de su compactación cambian el volumen, estos materiales deben medirse por su masa y así evitar errores en las cantidades. Por otra parte, los materiales líquidos, al tener una densidad constante, pueden medirse por masa o por volumen, lo cual no afectará la medida (Instituto del Concreto, 1997).

En ocasiones se tiene que las cantidades en volumen de los elementos que se van a realizar de concreto son mayores a la cantidad que se puede mezclar, lo que ocurre en la práctica cuando se mezcla el concreto en la obra, por lo que se debe garantizar que todas las mezclas sean lo más similares que se pueda para tener homogeneidad en los procesos (Neville y Brooks, 2010). Es por ello que para estandarizar los márgenes de errores, los manuales y procedimientos metodológicos internacionales recomiendan que entre amasadas individuales se mantenga una precisión de medida de la siguiente forma: para el cemento $\pm 1\%$, para agregados $\pm 2\%$, para el agua $\pm 1\%$ y para los aditivos $\pm 3\%$ (Sánchez, 2001). Por lo tanto, los equipos de medición utilizados deben tener la capacidad de medir las cantidades con las tolerancias del margen de error mencionadas para la menor cantidad de mezcla que se desea amasar, así como para mezclas mayores (Grijalva, 2020).

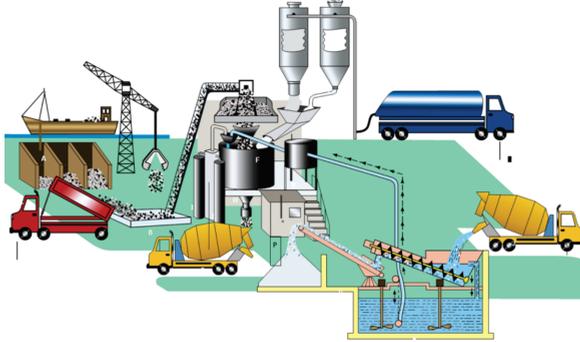
Es imperativo no solo contar con las propiedades propias de los materiales, sino que, a su vez, se debe caracterizar la zona o sitio en el cual se colocará el concreto teniendo cuenta parámetros como la temperatura, tipo de suelo, tipo de ambiente y clima (Li, 2011). Por ejemplo, un clima cálido y seco puede generar que se evapore el agua muy rápidamente, implicando que el concreto pierda trabajabilidad, siendo un error común solucionar esta falencia con la adición de agua, lo que se traduce en pérdida de resistencia; de tal forma que en climas extremos se debe considerar el uso de aditivos (Sánchez, 2001). Los aditivos químicos que tiene presentación en forma líquida se deben adicionar a la mezcla de concreto o microconcreto en soluciones acuosas, es decir, dichos aditivos se deben incorporar al agua de mezclado para verterlo durante el amasado. Por lo tanto, para no variar las cantidades calculados en el proporcionamiento de la mezcla se debe abstraer de la cantidad de agua de mezclado la cantidad de aditivo suministrado (Kosmatha *et al.*, 2004).

Microconcreto premezclado

El microconcreto premezclado es aquel material que se mezcla fuera de la obra o del sitio destino, dicho concreto se entrega en la construcción fresco y no endurecido (Li, 2011). Los componentes del microconcreto se mezclan previamente en una mezcladora estacionaria vertical y luego es entregada a un camión agitador transportador que garantizará la llegada

del concreto fresco al sitio donde será vertido (Harmsen, 2002). La Figura 23 presenta el prototipo de una planta central de microconcreto premezclado.

Figura 23. Etapas de la producción del microconcreto en una planta mezcladora



Fuente: Kosmatha *et al.* (2004).

Es relevante mencionar que el microconcreto, al ser un mortero fino y con una fluidez elevada, no se mezcla como se hace convencionalmente en una mezcla de concreto, sino que debe ser amasado en una mezcladora vertical con aspas de la misma forma que se mezclan las pastas, los estucos y las pinturas (ver Figura 24).

Figura 24. Prototipo de mezclador vertical con aspas



Fuente: Internáquinas (s.f.).

Ahora bien, el microconcreto debe seguir un procedimiento de mezcla requerido para una alta trabajabilidad o fluidez, puesto que a este material se le añaden otros aditivos como las fibras de refuerzo. Por lo tanto, según recomendaciones de manuales y procedimientos estandarizados internacionales, se debe seguir el siguiente proceso de mezclado.

El procedimiento a realizar es: primero se obtiene un mortero rígido, mezclando 3/4 partes de la cantidad total del agua con la arena y el cemento y luego de 45 segundos de mezclado se añade el resto del agua a la mezcla (normalmente el agua se añade durante periodos de 30 segundos). Si se adiciona aditivos a la mezcla, estos se deben diluir con la primera porción de agua mezclada.

- **Paso 1:** pese o dosifique todos los materiales (cemento, arena, agua y aditivos).
- **Paso 2:** agregue 3/4 partes de todos los líquidos. Incluyendo el agua y los aditivos.
- **Paso 3:** encienda la mezcladora en baja velocidad (300 – 500 rpm)
- **Paso 4:** agregue la arena.
- **Paso 5:** agregue el cemento y aumente la velocidad de la mezcladora (1000 – 1800 rpm)
- **Paso 6:** mezcle durante 45 segundos o un minuto.
- **Paso 7:** agregue el restante de líquidos. Cuidando que el proceso de haga en un lapso de tiempo de 30 segundos.
- **Paso 8:** realizar el ensayo de trabajabilidad de la mezcla realizada.
- **Paso 9:** (opcional) si en el paso 8 la mezcla tiene la trabajabilidad requerida se procede a hacer el vaciado y colocación del microconcreto. De lo contrario se deberá ajustar la cantidad de plastificante utilizado y se deberá repetir el paso 8.

Colocado del microconcreto

En la etapa de colocación del microconcreto se deberá tener en cuenta diversos factores que pueden afectar el comportamiento del material. Un mal vaciado del microconcreto puede conllevar a daños tempranos en el material que no podrán corregirse después (Kosmatha *et al.*, 2004). Por lo tanto, a continuación se describe la preparación que se deberá y tener en cuenta para la colocación del microconcreto, así como las técnicas de colocación en casos especiales según recomendaciones de manuales y procedimientos metodológicos internacionales.

Preparación de la colocación

La preparación del sitio de colocación final del concreto para su endurecimiento y funcionalidad dependerá directamente del destino del material. Si se trata de concreto dispuesto sobre terreno -como lo es el caso de los contrapisos, andenes, pavimentos, cimentaciones, entre otros- se deberá garantizar un estrato firme de suelo compactado y nivelado con material seleccionado que no presente cambios de volumen por variación de la humedad (Li, 2011). Además, se deberá humedecer la subrasante con el fin de evitar que el terreno absorba agua del concreto y por ende este pierda eficiencia, especialmente en climas cálidos y áridos (Instituto del Concreto, 1997).

Si el destino del concreto es sobre un concreto ya endurecido, se debe garantizar una correcta adherencia entre los dos concretos, el nuevo y el viejo, esto se puede lograr de dos formas: la primera, a través del uso de epóxicos que ayuden a mejorar la junta de construcción; la segunda, es picando la capa superficial del concreto ya endurecido, con el fin de tener una superficie rugosa que contribuya con la adherencia en la junta de construcción (Sánchez, 2001).

Cuando se trata de un concreto armado se deberán fijar formaletas, encofrados o cimbras, ya sean de madera, acero, plástico, piedra, entre otros. Dichas formaletas se deben colocar, limpiar, fijar, apuntalar y/o arriostrar adecuada y precisamente con el fin de dar la forma

esperada en el elemento que se está fabricando. Una vez endurecido el concreto se puede revocar o revestir de acuerdo al acabado que se espera dar al elemento fabricado (Neville y Brooks, 2010); sin embargo, antes de fundir el colocado del concreto, se debe verificar el tipo de formaleta que se va a utilizar, de tal forma que la formaleta no afecte las propiedades del concreto, por ejemplo, las cimbras de madera se deben humedecer antes de la colocación del concreto para que no absorban el agua y no se hinchen, además, se deben aceitar con algún material desmoldante con el fin de que las fibras de la madera no se adhieran al concreto y pueda modificar el aspecto exterior del concreto ya endurecido (Harmsen, 2002).

Por último, si se trata de un concreto lanzado o proyectado, se debe garantizar la fluidez correcta del material para que pueda ser transportado y lanzado a su destino. Para el caso del microconcreto fibro-reforzado, dependiendo si es premezclado o proyectado, se seguirán las mismas recomendaciones descritas en los párrafos anteriores (Shetty, 2006).

Técnicas especiales de colocación

Una vez se ha colocado el concreto o microconcreto en su destino, se deberá seguir un procedimiento de consolidación, de tal forma que se retire del concreto el aire atrapado que pueda generar perjuicios en la calidad del material. La técnica de consolidación del concreto más común es el vibrado, el cual puede ser externo o interno (Instituto del Concreto, 1997).

La vibración es una agitación que se introduce en la estructura del compuesto fresco recién colocado, generando que la fricción interna entre las partículas de agregado se destruya temporariamente y el concreto se comporta como un material fluido. El microconcreto se vierte en los moldes o formaletas bajo la acción de la gravedad, ya sea por medio de una manguera de bombeo o puesto de forma manual, lo que genera vacíos grandes de aire atrapado entre los agregados (Kosmatha *et al.*, 2004). El método de la vibración ayuda a que las burbujas de aire atrapado suban hacia la superficie más fácilmente. La fricción interna se reestablece cuando la vibración se interrumpe.

Los vibradores son aparatos que generan frecuencias altas de agitación, lo cual se mide en una cantidad de vibraciones por unidad de medida de tiempo (Harmsen, 2002). Generalmente se expresa en vpm o vps, vibración por minuto o vibración por segundo, respectivamente (Porrero *et al.*, 2009).

- **Compactación de microconcreto con el método de vibrado**

Diversos estudios han sido desarrollados con el fin de estudiar la variación en la estructura interna de las mezclas de concreto y mortero cuando se utiliza vibradores durante la etapa de colocación. Tal es el caso de lo estudiado por Teranishi *et al.* (1995), donde se realizó la prueba de levantamiento de esferas de mortero fresco bajo vibración, para lo cual se colocó el recipiente con la muestra de microconcreto fresco en una mesa vibradora, encontrándose que, en el rango de velocidad de deformación cortante baja, la consistencia del fluido Bingham bajo vibración era una curva a través del origen, pero la viscosidad aparente aumentaba en comparación con el mismo concreto en estado no vibrado.

Por otra parte, Tattersall y Baker (1988) midieron las propiedades reológicas del hormigón fresco vibrado con el reómetro impulsor, cuyo recipiente estaba montado sobre una mesa

vibratoria. Los resultados muestran que cuando se aplica vibración al concreto fresco, las propiedades de flujo ya no están representadas por el modelo lineal simple de Bingham, sino que se aproximan a las de un pseudoplástico de ley de potencia con valor de fluencia cero y que la efectividad de la vibración debe ser evaluada en términos de su velocidad máxima. Confirmaron, además, que utilizando un aparato de tubería vertical colocado sobre una mesa vibratoria a velocidades de deformación por cortante baja del orden de las que prevalecen en muchas circunstancias prácticas, el hormigón fresco bajo vibración se comporta como un líquido newtoniano, lo que explica por qué fluiría bajo sí mismo (Tattersall y Baker, 1989).

Durante el proceso de colocación se utilizan diferentes metodologías de vibración que contribuyen con la acomodación de los componentes del microconcreto para la eliminación de los vacíos de aire que puedan afectar con la resistencia del compuesto. La vibración interna es un tipo de vibración que se hace por inmersión de una maquina vibradora y, según el elemento que se vaya a vibrar, se varía el tipo de vibrador (Porrero *et al.*, 2009). Generalmente, se utiliza un vibrador de eje flexible, el cual consiste en una cabeza vibratoria que se encuentra conectada al motor por medio del eje. El principio por el cual funciona este tipo de vibrador es sencillo: se compone principalmente de una cabeza que contiene un contrapeso que, al rotar a velocidad constante, produce variación en el centro de masa de la vibración, generando rotaciones que producen pulsos vibratorios dentro del compuesto fresco (Kosmatha *et al.*, 2004).

Otra forma común de vibrado utilizada durante la etapa de fundición de concreto y microconcreto, es a través de vibra externo. Este tipo de vibrado se realiza mediante la aplicación de pulsaciones o agitaciones en la formaleta directamente. A diferencia del vibrado por inmersión, el equipo utilizado para este proceso puede ser manual o mecánico dependiendo del tamaño del elemento que se espera vibrar (Porrero *et al.*, 2009). A escala de laboratorio el vibrado se realiza con mesas vibratorias, las cuales se componen de una placa que oscila por la acción de un motor.

Curado del microconcreto

Uno de los procesos de mayor relevancia durante la etapa de colocación y endurecimiento de los microconcretos, es el curado, el cual se puede definir como el proceso donde se le da un mantenimiento inicial en la vida útil del concreto, de tal forma que se mantengan las condiciones ideales de temperatura y contenido de humedad que contribuyan al compuesto la capacidad de alcanzar la resistencia para la que fue diseñado (Kosmatha *et al.*, 2004). En múltiples estudios que se han desarrollado a lo largo de la historia reciente, se ha demostrado que el curado tiene una influencia directa sobre las propiedades del concreto endurecido, puesto que un curado bien ejecutado permite que el compuesto tenga las características y condiciones de diseño, lo que garantiza durabilidad, resistencia, impermeabilidad, resistencia a abrasión y estabilidad dimensional (Neville y Brooks, 2010).

Una vez se ha realizado la mezcla de los componentes del concreto, entre ellos la mezcla del cemento hidráulico con el agua, inicia una reacción química y térmica entre los dos componentes. El agua inicia su evaporación y, por lo tanto, el concreto se seca (Shetty, 2006). El cemento, al ser hidráulico, requiere de agua para desarrollar al 100 % su efectividad,

proceso que dura 28 días, aproximadamente, a menos que se utilicen aditivos acelerantes o se siga un proceso de maduración del concreto. De tal forma que, para evitar que el secado del concreto por la evaporación del agua afecte el desarrollo del cemento, se debe realizar un proceso denominado “curado” (Li, 2011).

El curado se refiere a los procedimientos para mantener un ambiente adecuado en el concreto fresco para que se produzcan las reacciones de hidratación. El curado es un procedimiento simple y con frecuencia se ignora; sin embargo, es más importante en la producción de un hormigón resistente, duradero e impermeable. En el curado del concreto lo crítico es mantener una condición suficientemente húmeda para el concreto, para que la hidratación no se detenga (Neville y Brooks, 2010). El curado húmedo se proporciona rociando con agua, estancando o cubriendo la superficie del concreto con arena húmeda, láminas de plástico, arpillera o esteras. Los compuestos de curado, que se pueden rociar sobre la superficie de concreto para formar una lámina continua delgada, también se usan comúnmente, especialmente para superficies verticales como paredes y columnas, ya que se debe minimizar la pérdida de agua a las áreas circundantes. Si se vierte hormigón sobre una subrasante del suelo, la subrasante debe humedecerse para evitar la absorción de agua. En áreas expuestas (como una pendiente) a menudo se construyen cortavientos y parasoles para reducir la evaporación del agua. Para el concreto de cemento Portland, generalmente se recomienda un período mínimo de 7 días de curado en húmedo (Li, 2011).

Si el microconcreto fresco no se cura correctamente la evaporación del agua superficial es rápida y la interna casi no cambia. La contracción plástica puede ocurrir si la tasa de pérdida de agua, debido a la evaporación, excede la tasa de sangrado (Instituto del Concreto, 1997). La contracción es la reducción de volumen debido a la pérdida de agua, esta contracción temprana ocurre cuando el concreto aún se encuentra en estado plástico (no completamente endurecido), especialmente en el interior del concreto, por lo que se denomina contracción plástica. La pequeña cantidad de reducción de volumen, debido a la contracción plástica, está acompañada por el movimiento hacia abajo del material de la capa superficial (Sánchez, 2001); si este movimiento se restringe mediante refuerzos de acero o agregados grandes y se formarán grietas siempre que se exceda la baja resistencia del concreto. Las grietas por contracción plástica a menudo corren perpendiculares a la superficie del hormigón, por encima de las armaduras de acero. La presencia de grietas por retracción plástica puede afectar la durabilidad de la estructura, ya que permiten que los agentes corrosivos alcancen fácilmente el acero. Si se tiene cuidado de cubrir la superficie de concreto y reducir otras pérdidas de agua (como la absorción por el encofrado o la subrasante) se puede evitar el agrietamiento por contracción plástica. Si se nota en una etapa temprana puede eliminarse mediante revibración (Li, 2011).

Cambios volumétricos en el microconcreto

El microconcreto, así como el concreto, es un material compuesto que cambia ligeramente su volumen desde su amasado hasta su endurecimiento. Cambios que deben ser tenidos en cuenta para su correcta aplicación en las obras de construcción, puesto que en las construcciones el microconcreto se vierte dentro de elementos que se están confinando entre ellos y no se permite la expansión o contracción libre del material, lo que implica que

el compuesto no se mueva libremente, generando tensiones y contracciones que pueden afectar significativamente en la estructura interna del concreto (Kosmatha *et al.*, 2004).

Principalmente, el microconcreto presenta cambios de volumen durante dos etapas: la primero es un cambio de volumen durante la edad temprana, es decir, durante la fase de amasado y endurecimiento, etapa en la que el material presenta una contracción por fraguado; la segundo se presenta cuando hay cambios de humedad y temperatura, en la cual se puede presentar una contracción o expansión térmica (Li, 2011). Los cambios de volumen en el microconcreto ya endurecido pueden generar problemas de comportamiento mecánico como lo es la aparición de fisuras y grietas que disminuyen la capacidad de resistencia y durabilidad del compuesto (Neville y Brooks, 2010).

Es relevante mencionar que los cambios volumétricos se deben a factores químicos y exotérmicos, por lo que controlarlos resulta difícil, sobre todo cuando se trata de un concreto restringido en cuando a su espesor; es por ello que una de las soluciones más favorables que se ha estudiado en las últimas décadas, además del uso de aditivos, es el uso de fibras internas que controlen la aparición de fisuras tempranas, prolongando la vida útil del microconcreto, así como mejorar las propiedades físicas y mecánicas del material (Porrero *et al.*, 2009).

Propiedades mecánicas del microconcreto

Las propiedades mecánicas del concreto son principalmente la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la deflexión y el módulo de rotura. Con estas propiedades se puede conocer la capacidad a compresión, tracción, flexión, cortante y torsión que tendrá el material para ser utilizado en la construcción.

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es uno de los parámetros mundialmente utilizado para describir las características de los microconcretos, así como de los concretos. Esto se debe a que, aunque no es el único parámetro relevante del compuesto, sí es la propiedad con la que se correlacionan las demás características del material, es decir, propiedades como el módulo de elasticidad y el módulo de rotura y flexibilidad se relacionan directamente con la resistencia a la compresión a través de ecuaciones que correlacionan las características (Instituto del Concreto, 1997).

La resistencia a la compresión de un material se determina por medio de una máquina de compresión hidráulica en la cual se estudia la carga máxima que soporta el elemento antes de fallar. Para el caso de los concretos se mide a través de cilindros con relación altura, diámetro 2:1. Según estándares internacionales para el concreto se utilizan cilindros de 4" (10.16 cm) de diámetro y 8" (20.32 cm) de altura o 6" (15.24 cm) de diámetro y 12" (30.48 cm) de altura. Se debe tener en cuenta que para determinar cuál de los dos cilindros es el mejor se debe conocer el tamaño del agregado grueso. Por otra parte, para el caso de los microconcreto o morteros, es decir, aquellos compuestos que no contienen agregado grueso, se debe hacer uso de cubos de 2" (5.08 cm) de lado (Kosmatha *et al.*, 2004).

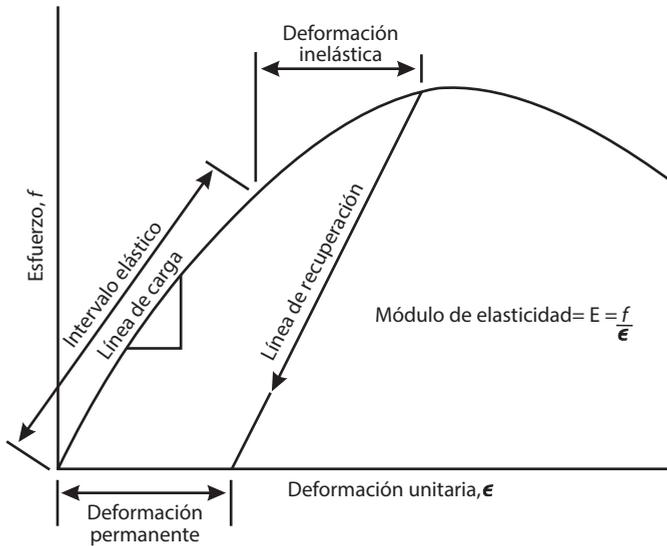
La carga máxima debe estar dividida entre el área de contacto de la probeta. A la relación entre la carga y el área se le conoce como esfuerzo, por lo que es correcto afirmar que la resistencia a la compresión se representa por el esfuerzo máximo que soporta el material (Porrero *et al.*, 2009). A continuación, se muestra la ecuación que describe la resistencia a la compresión de un microconcreto o concreto:

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

Donde, f'_c es la resistencia a la compresión, P es la carga máxima y A es el área de transversal a la dirección de la carga.

Módulo de elasticidad

Figura 25. Curva genérica de esfuerzo-deformación unitaria del concreto



Fuente: Kosmatha *et al.* (2004).

El módulo de elasticidad es una propiedad del material con el cual se define el rango elástico del microconcreto, es decir, indirectamente el módulo de elasticidad representa la rigidez que le aporta el material a una estructura. El cálculo del módulo de elasticidad se obtiene relacionando el esfuerzo a la compresión con la deformación unitaria en el rango elástico del material, es decir, cuando el material no presenta deformaciones permanentes por la acción de un esfuerzo (Sánchez, 2001).

La Figura 25 muestra una curva genérica con la que se calcula el módulo de elasticidad, teniendo en cuenta que este módulo es la pendiente de una línea tangente a la curva en la zona elástica. La ecuación para calcular el módulo de elasticidad se expresa de la siguiente forma:

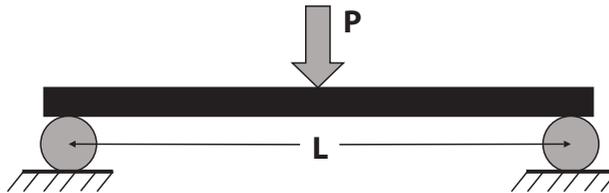
$$E_c = \frac{f}{\epsilon} = \frac{\Delta P}{\Delta \epsilon}$$

Donde E_c es el módulo de elasticidad, $f = \Delta P$ es el diferencial de carga y $\epsilon = \Delta \epsilon$ es el diferencial de deformación unitaria medida en la pendiente de una línea tangente a la curva en la zona elástica.

Deflexión y módulo de rotura

La deflexión de vigas y de losas de concreto es uno de los movimientos más comunes en las estructuras que depende de las cargas de servicio. La deflexión es una curvatura que se presenta en los elementos que están sometidos a fuerzas y cargas ortogonales a la dirección del elemento, como se aprecia en la Figura 26. Estas deformaciones son la consecuencia de la flexión que se desarrolla bajo cargas muertas (peso propio) y vivas, lo cual puede conllevar al agrietamiento en la zona de tensión de los miembros de concreto (Kosmatha *et al.*, 2004). Se debe tener un control en los primeros años de vida de la estructura con el fin de evitar la fisuración y/o agrietamiento temprano de las particiones frágiles que soportan los miembros estructurales susceptibles a las deflexiones (Harmsen, 2002).

Figura 26. Esquema de ensayo a flexión



Fuente: elaboración propia.

Para calcular el módulo de rotura se deben construir probetas en forma de vigas a escala teniendo una relación 1:4, donde la longitud de la viga sea 4 veces el tamaño del lado de la sección cuadrada. Siguiendo las recomendaciones de normativas internacionales se pueden utilizar vigas de 4 cm de lado y de 16 cm de longitud y se determina en un equipo de compresión la carga máxima de rotura que soporta la viga. La fuerza se aplica perpendicular a la longitud de la viga en el centro y los apoyos se ubican en los extremos, tal y como se muestra en la Figura 26. La expresión con la que se calcula es el módulo de rotura se muestra a continuación:

$$F_{cr} = \frac{3PL}{2B^3}$$

Donde F_{cr} es el módulo de rotura, P es la carga máxima de rotura a la flexión, L es la longitud entre apoyos y B es la dimensión del lado de la sección de la viga.