DISEÑO Y CONTROL DEL INYECTADO EMPLEANDO EL PRINCIPIO "GIN"

Water Power & Dams Construction
Junio de 1993

Por Dr. Ing. G. Lombardi y D. Deere

Traducción: Ing. Ulrich Hungsberg
Cónsultivo Técnico, IMTA. MEXICO
Julio de 1993
DISEÑO Y CONTROL DEL INYECTADO EMPLEANDO EL PRINCIPIO "GIN"

Por G. Lombardi* y D. Deere**

Tomado de: Water Power & Dam Construction, de junio de 1993. Traducción: Ulrich Hungsberg, Consultivo Técnico, IMTA. MEXICO.

Se deriva y presenta aquí el método del número de intensidad de inyectado (GIN) para el inyectado con mezcla de cemento de masas rocosas. Las características principales únicas del método son: (1) una sola mezcla de inyectado estable para todo el proceso (relación agua:cemento por peso de 0.67 a 0.8:1) con un aditivo superplastificante para incrementar la penetrabilidad; (2) una velocidad constante baja a mediana de bombeo de la lechada conduce con el tiempo, a una presión que se incrementa gradualmente conforme la lechada penetra mas dentro de las fracturas de la roca; (3) el monitoreo de la presión, la velocidad de flujo, el volumen inyectado y la penetrabilidad contra el tiempo, en tiempo real, por medio de gráficos en una computadora PC; y (4) la terminación del inyectado cuando la trayectoria de inyectado registrada sobre el diagrama de presión contra volumen total (por metro de intervalo inyectado) intersecta a una de las curvas de volumen limitante, presión limitante o intensidad de inyectado limitante como queda dado por la curva hiperbólica seleccionada de GIN (una curva de un valor constante de $p \cdot V$, presión x volumen, una medida de la energía empleada). La experiencia en varios países en proyectos hidroeléctricos mayores indica que el método es técnica y económicamente efectivo.

El inyectado de masas de roca con lechadas de cemento para mejorar sus propiedades mecánicas e hidráulicas es una práctica bien establecida en la ingeniería civil. Sin embargo, esta práctica ha estado dominada por mucho tiempo por reglas empíricas y experiencias personales o institucionales, que conducen frecuentemente a creencias dogmáticas.

*Studio d’Ingegneria, Giovanni Lombardi, R. Simen 19, CH 6648 Locarno, Switzerland.
** Gainesville, Florida, USA.
Durante esta década, los autores han tenido la oportunidad de trabajar en una serie de proyectos hidroeléctricos mayores en construcción en diferentes países, con proyectistas, ingenieros geotécnicos y geólogos, así como ingenieros de control de campo en el desarrollo de una comprensión mejor del proceso de inyectado mediante una combinación de investigaciones de laboratorio, teóricas y de campo.

La información ganada por los estudios de laboratorio de la cohesión (resistencia a la fluencia) y la viscosidad dinámica de diferentes mezclas de inyectado, por medio de estudios teóricos de flujo y penetración de lechada, y por el monitoreo de campo de presiones de inyectado y absorciones (tomadas), ha conducido al concepto del Número de Intensidad de Inyectado (GIN), como se discutirá en este artículo.

Por simplicidad, este trabajo tratará únicamente del inyectado de cemento de masas de roca, aunque algunas de las consideraciones presentadas pueden ser también aplicadas a suelos granulares y al inyectado con otros materiales. Se da un mayor énfasis a las pantallas de inyectado para cortinas de presas que al inyectado de consolidación o de obras subterráneas, a pesar del hecho de que el método GIN ha sido empleado también algunas veces para este tipo de obras.

No es el objeto de este artículo el resumir el estado de arte actual del inyectado, ya que una serie de libros recientes lo han hecho bastante bien ¹⁴. Se dará más bien un fundamento teórico breve seguido por conceptos tanto teóricos como prácticos que conducen al desarrollo del procedimiento de inyectado GIN. La efectividad comprobada del concepto para lograr resultados mejores de inyectado y operaciones de inyectado más sencillas y más económicas, ha sugerido a los autores, que el método debería presentarse a un auditorio mayor.

Conceptos teóricos del flujo de lechada y su penetración

A diferencia de los fluidos newtonianos, tales como agua o aceite, en donde el comportamiento reológico puede caracterizarse únicamente por el parámetro de viscosidad, una lechada de inyectado "estable" se comporta como un fluido Binghamiano durante el flujo, teniendo ambos viscosidad y cohesión (resistencia a la fluencia).
Mientras que ambos son parámetros de resistencia al flujo, la viscosidad gobierna la velocidad de flujo y la cohesión gobierna la distancia máxima de penetración (para una presión de inyectado aplicada dada y una apertura dada de la fisura en la roca). Se han desarrollado y presentado en otro lado ecuaciones para calcular la distancia máxima de penetración, el volumen máximo de lechada inyectada y la fuerza máxima total de levantamiento ejercida sobre el área de inyección.

Será suficiente aquí hacer notar que la distancia máxima de penetración lograda por una lechada de inyectado es directamente proporcional a la presión aplicada y a la apertura de las fisuras y es inversamente proporcional a la cohesión de la lechada de inyectado. De esta manera, para mejorar la penetración de la lechada en fisuras de roca finas, es necesario incrementar la presión de inyectado o reducir la cohesión de la lechada, o ambos.

Quizás el mayor valor de las ecuaciones de flujo Binghamiano consiste en proporcionar una visión del proceso de inyectado con relación a los factores que influencian la penetracion de la lechada en una fisura de roca y la extensión de las fuerzas de levantamiento creadas por el proceso de inyectado. Mientras que las lechadas estables (definidas como aquellas que exhiben en dos horas una decantación menor del 5% de agua clara en la parte superior de un cilindro de 1000 ml) pueden aproximarse al comportamiento de un fluido Binghamiano, no es razonable aplicar las ecuaciones a lechadas delgadas y acuosas. Tales mezclas delgadas o lechadas son suspensiones inestables de partículas de cemento en agua, que, durante el flujo de la lechada a través de las fisuras de roca, pueden mostrar un comportamiento de sedimentación errática; erosión, re-suspensión y re-sedimentación. Este comportamiento es imposible de predecir y caracterizar con las ecuaciones de flujo Binghamianas o cualquiera otra.

En la sección siguiente se presentan factores adicionales que entran en la selección de un diseño de una mezcla de inyectado.

Selección de la mezcla de inyectado

La controversia sobre mezclas espesas contra delgadas (lechadas) seguramente continuará por varios años más. Los autores han expresado en la literatura su preferencia por mezclas más espesas.
desde 1985 5-11. La práctica de agregar del 1 a 2% de bentonita para estabilizar la mezcla y para reducir la sedimentación, está siendo reemplazada progresivamente por el empleo de mezclas de contenidos de cemento más elevados, pero con aditivos superplastificantes. Estas últimas mezclas son estables, ya que poseen menos cohesión y son más penetrantes, también tienen una mayor resistencia después del fraguado.

Tradicionalmente, los abogados de mezclas más espesas han indicado varias ventajas que exhiben las mezclas espesas, ambas durante el proceso de inyectado o durante la vida útil de la masa de roca inyectada, después de que se haya endurecido la lechada.

Durante el inyectado una lechada moderadamente espesa, estable tiene las siguientes ventajas comparada con una lechada delgada:

- Menor sedimentación de los granos de cemento durante condiciones de flujo lento.

- Menos agua de sangrado que acomodar como resultado de la exprimida o filtración en zonas estrechas en las trayectorias de flujo, con menor bloqueo prematuro;

- Mayor estabilidad en el tiempo y distancia como un fluido predecible (fluído Binghamiano con una cohesión y una viscosidad dinámica dadas); y

- Menos riesgo de hidrofracturamiento (también denominado partición hidráulica o efecto de gato hidráulico) y levantamiento de los estratos geológicos, debido a una caída rápida de presión alejada de la perforación de inyectado como resultado de la cohesión de la lechada (y el llenado de la fractura con una lechada de alta calidad en el caso de tal ocurrencia).

Durante la vida útil de una lechada endurecida en fisuras de roca, la lechada espesa tiene las siguientes ventajas en comparación con una lechada delgada:

- Menos contracción durante el fraguado y con esto una mayor liga a lo largo de las paredes de la fisura en la roca y menos riesgo de una reabertura;
Mayor densidad y mayor resistencia mecánica, debido al mayor contenido de cemento y con ello una mayor resistencia a la erosión física y tubificación.

Menor porosidad, menor permeabilidad, y una mayor resistencia de liga y con esto una resistencia química mayor contra la lixiviación y una mayor durabilidad de la pantalla de inyectado durante la vida útil de la presa.

La lechada estable, debido a su cohesión, requiere presiones de inyectado mayores para alcanzar la misma distancia de penetración comparada con una lechada delgada. Sin embargo, por medio del empleo de una pequeña cantidad de aditivo superplastificante, ambos parámetros, su cohesión y su viscosidad, pueden reducirse dramáticamente.

La práctica actual en una serie de proyectos mayores es la de emplear una relación de mezcla de 0.67:1 a 0.8:1 (agua:cemento por peso) para obtener la mayor densidad y resistencia deseables de la lechada endurecida y un superplastificante para reducir la cohesión y viscosidad durante la colocación de la lechada. Se emplean pruebas de laboratorio para determinar las propiedades de flujo, sedimentación, fraguado y de resistencia de diferentes mezclas de inyectado para diferentes cementos y diferentes aditivos superplastificantes.

Los valores de cohesión y viscosidad pueden obtenerse en el laboratorio, empleando un viscosímetro rotatorio con cilindros concéntricos. Sin embargo, puede emplearse también el medidor sencillo de placa de cohesión $^5$. Este es una pieza de una placa de acero rugosa, de 100 mm por 100 mm por un espesor de alrededor de 1.5 mm, que se pesa antes y después de sumergirla por unos segundos en la mezcla de inyectado. La diferencia en peso, dividida entre el área de ambos lados da el parámetro de cohesión en unidades de resistencia al esfuerzo cortante. Es conveniente dividir la cohesión $C$ entre el peso unitario de la lechada $\gamma$, expresando la cohesión relativa $C_c=C/\gamma$, que es la que normalmente se reporta. Se da generalmente en mm, y los valores típicos son de 90.2 a 0.35 mm para lechadas espesas sin aditivo superplastificante. Con aditivos, la cohesión aparente, baja a valores de 0.08 a 0.15 mm, para el rango recomendado. Es de interés notar que el valor de $C_c$ es de hecho el espesor de la
lechada de cemento, que se adhiere a cada lado de la placa de cohesión. La placa de cohesión debe ser suficientemente rugosa, cortando pequeñas ranuras que se intersectan sobre su superficie, de manera que la adhesión entre la superficie del acero sea mayor que la cohesión entre la capa superficial de la lechada adherida y el resto de la lechada; de otra manera la lechada se deslizará de la placa.

Otros valores típicos de laboratorio son: peso específico de la lechada, 1.59 a 1.67 t/m³ (99.2 a 104.2 lb/ft³); tiempo de flujo del embudo Marsh de 29 a 32 s; y resistencia a la compresión a los 28 días de 15 a 20 MPa (2250 a 3000 lb/in²).

Otro punto que deberá mantenerse en mente, es la pérdida potencial de agua al inyectar roca seca, arriba del nivel de agua subterránea. En el caso de que se espesará la lechada por esta razón, se incrementaría su cohesión (se aumentaría la fricción interna) al grado que ya no se podría inyectar más lechada. Una práctica prudente es la de inyectar agua por un periodo de tiempo para obtener una saturación parcial de la masa rocosa, precisamente antes del inyectado. También se pueden emplear aditivos retenedores de agua en la lechada.

Al inyectar fisuras finas en roca, deberá recordarse que la penetración de la lechada depende más del tamaño de los granos de cemento y partículas de cemento aglutinadas que de la dilución de la mezcla con agua en exceso. De esta manera, en vez de tratar de obtener una penetración mayor, diluyendo la mezcla, debería emplearse un cemento más fino con aditivo superplastificante junto con presiones de inyectado mayores.

Una vez que se haya determinado una mezcla aceptable, por medio de pruebas de laboratorio, con sus propiedades mecánicas en los rangos deseados, esta mezcla deberá emplearse para todo el inyectado en el proyecto: el empleo de una sola mezcla simplifica grandemente el procedimiento de inyectado.

Diseño de obras de inyectado

El diseño de una pantalla de inyectado incluye la selección de las siguientes características principales: mezcla de inyectado, espaciamiento y profundidad de las perforaciones de inyectado,
secuencias de inyectado, procedimiento de inyectado (incluyendo la limitación de volumen y presión) y el control de campo. Se requiere un buen conocimiento de la geología del sitio al seleccionar algunos de estos parámetros, en especial, las características físicas de las discontinuidades de la masa de roca que deberá inyectarse (tipos, frecuencia, abertura de fisura, rugosidad, alteración o relleno, y extensión). El estado esfuerzos insitu de y las condiciones de agua subterránea existentes también deberán considerarse.

Además de un conocimiento de las condiciones geológicas y geotécnicas existentes, deberán tomarse en cuenta los cambios inducidos por el estado de esfuerzos del proyecto y las presiones hidráulicas y su variación en el tiempo (tales como durante el llenado y abatimiento del vaso). Finalmente, deberá definirse de una manera mejor la meta que deberá lograrse: en términos de consolidación o efectos de densificación, como es el caso en general.

Este trabajo no pretende dirigirse a todos estos puntos en detalle, pero se concentra en varios de los más importantes.

Desarrollo del método GIN

*Inyectado de fisuras amplias abiertas*

Ambos, las observaciones prácticas y los estudios teóricos, indican que las fisuras más amplias abiertas en una masa rocosa son aquellas que se inyectan más fácilmente. La penetración de la lechada también puede ser considerable (algunas decenas de metros). Por lo tanto, existen tanto razones prácticas como económicas para reducir la penetración de la lechada y el volumen de lechada inyectada. Hay tres maneras de lograr esta reducción: empleando una lechada menos penetrante (más espesa con mayor cohesión); limitando la presión de inyectado o limitando el volumen de lechada inyectado.

Antes de seleccionar el criterio limitante, deberá considerarse que también pueden existir fisuras más finas en el intervalo de roca que se está inyectando. Estas son más difíciles de inyectar y probablemente no se inyectarán bien hasta una etapa posterior, cuando ya se hayan rellenado las fisuras más abiertas. Sin
embargo, durante la primera etapa de inyectado, es deseable lograr algún llenado de estas fisuras finas. De esta manera, la mezcla de inyectado no deberá espesarse, pero deberá permanecer una lechada moderadamente espesa estable con un aditivo superplastificante. La alternativa de limitar la presión tampoco es muy atractiva, ya que esto reduciría el inyectado de las fisuras finas. La alternativa restante de colocar una limitación de volumen parece ser el mejor camino*.

*Inyectado de Fisuras finas*

Después de que se hayan inyectado las fisuras más abiertas, o si no existieron originalmente en la zona por inyectar fisuras abiertas de abertura amplia, el inyectado de las fisuras finas se hace una prioridad. Tal inyectado puede realizarse, ya sea utilizando una mezcla más delgada con una cohesión menor, o inyectando a presiones mayores. Es más conveniente elevar la presión y mantener la mezcla moderadamente espesa de alta calidad con el aditivo superplastificante. En vista de que las fisuras más finas tendrán una menor penetración de lechada, y ya que la presión de inyectado se reduce rápidamente conforme se aleja de la perforación, la fuerza total de levantamiento aún a presiones de inyectado elevadas será, como regla, mucho más baja que el peso de la sobre carga; el hidrofracturamiento de las juntas y planos de estratificación en la roca es raras veces un problema (con excepción de los 5 a 10 m superiores). Consecuentemente, son aceptables presiones de inyectado bastante elevadas, aún de hasta 30 a 40 bar, es decir, de 3 a 4 MPa (425 a 570 lb/in²) calculados en el intervalo de inyectado en el caso de que la toma de lechada sea pequeña.

Al considerar estos factores se sugiere un límite superior para la presión de inyectado, cuando las tomas de lechada son pequeñas en el rango de 30 a 50 bar (3 a 5 MPa), dependiendo de la geología (intemperización, estratificación, zonas débiles, estado de esfuerzos insitu, etc.), la presión de agua futura y la intensidad deseada del inyectado.

*por ejemplo, 200-400 l de lechada por metro de perforación (2.15-4.3 ft³ por ft) en el intervalo que se inyecte o en términos de peso, suponiendo una relación agua:cemento de 0.75 por peso, 185-370 kg de cemento por m de perforación (1.34-2.68 sacos por ft con sacos de 94 lb).*

8
De esta manera, están empezando a emerger los primeros dos elementos del principio GIN: una limitación de volumen, cuando la lechada entra fácilmente a bajas presiones, y una limitación de presión cuando la lechada penetra únicamente con dificultad. Queda por enfocarse a los rangos intermedios. Sin embargo, antes de continuar con este rango intermedio es conveniente revisar otras consideraciones sobre el inyectado.

**La reducción del espaciamiento de las perforaciones del inyectado por etapas**

En la práctica usual, se inyectan las perforaciones primarias, con un espaciamiento bastante abierto (tales como 10 a 12 m) de manera que el inyectado en el primer barreno primario no interfiera con el siguiente. Frequentemente se especifica que se perfure e inyecte cada tercer o cuarto barreno primario antes de los demás primarios, para servir como perforaciones primarias "exploratorias". Estas perforaciones serán frecuentemente perforaciones con núcleo y se probarán con pruebas de agua a presión hasta una profundidad total de 0.75 x H (en donde H es la altura del vaso futuro en el punto en cuestión). El resto de las perforaciones primarias podrá ajustarse en profundidad de acuerdo a los resultados de las perforaciones exploratorias primarias.

La siguiente serie (etapa) de perforaciones, los llamados barrenos secundarios, se inyectan a continuación en una localización intermedia de espaciamiento entre los primarios. Ya que estas perforaciones se encuentran únicamente de 5 o 6 m de las perforaciones primarias, encontrarán con frecuencia lechada endurecida en algunas de las fisuras más amplias. En general, sus "tomas" serán más bajas que las de las primarias. Frecuentemente se requieren perforaciones terciarias, nuevamente a un espaciamiento intermedio (2.5 a 3 m), generalmente con tomas aún menores; eventualmente se podrán requerir aún perforaciones cuaternarias (de 1.25 a 1.5 m de cada perforación terciaria), resultando generalmente en una absorción aceptablemente baja de lechada.

Ya que la roca se hace más cerrada con cada fase (etapa) de perforaciones, las fisuras no inyectadas encontradas en las últimas perforaciones generalmente serán más finas; por lo tanto, las
presiones más altas serían benéficas y producirían una operación de inyectado más eficiente.

De esta manera, se identifica el tercer ingrediente del procedimiento GIN: una presión progresivamente más elevada conforme se consolida la roca, de manera de que se inyecten progresivamente fisuras más finas.

**Pruebas de Presión de agua (Lugeon)**

Se han empleado frecuentemente pruebas de presión de agua (pruebas Lugeon) en cada intervalo de inyectado para ayudar a seleccionar la mezcla de inyectado. Sin embargo, la experiencia y la teoría han indicado una correlación muy pobre de los valores Lugeon con las absorciones de lechada. Sin embargo, todavía se podrán emplear las pruebas Lugeon o similares en las perforaciones exploratorias primarias, para obtener una imagen general de la permeabilidad a través del empotramiento y el área de cimentación de la cortina principal. Luego se podrán efectuar comparaciones con pruebas Lugeon llevadas a cabo como comprobación o barrenos de control después del inyectado, para ver si se ha logrado una reducción suficiente en la permeabilidad.

**El Método GIN**

**Energía específica empleada**

Para inyectar una zona de roca en forma más intensiva, se requiere emplear más energía. En un intervalo de inyectado progresión dado, la energía empleada es aproximadamente proporcional al producto de la presión $p$ del inyectado final y del volumen de inyectado de $V$ dando un producto de $p \cdot V$. Este número $p \cdot V$ se llama el número de intensidad de inyectado o GIN (Grouting Intensity Number). El volumen puede normalizarse con la longitud del intervalo de inyectado como litros/m (o en forma intercambiable por peso de cemento inyectado en kg/m, ya que para mezclas moderadamente espesas los valores numéricos son similares dentro de un 5 al 10%). La presión ha sido utilizada tradicionalmente como bar, resultando en $p \cdot V$ o unidades GIN siendo bar·litros/m, aunque obviamente se pueden utilizar otras unidades, haciendo las conversiones apropiadas.
Ventajas de mantener un valor constante de GIN

El método GIN requiere que, una vez que se haya seleccionado el nivel de intensidad de inyectado (por ejemplo una intensidad alta GIN de 2000 bar·l/m), este valor deberá utilizarse, tanto para las fisuras fácilmente inyectables con grandes volúmenes de absorción a baja presión como para las fisuras más finas con tomas bajas pero con presiones considerablemente más elevadas. De esta manera, se mantiene un valor constante de GIN.

Al mantener un valor constante de GIN durante el proceso de inyectado para todos los intervalos, se obtiene una penetración casi constante de la lechada y se limita casi automáticamente el volumen en una fisura abierta amplia, pero se permiten presiones incrementadas en zonas más apretadas y fisuras menos inyectables. También, se eliminan las combinaciones de presión elevada y volumen grande, una condición que conduciría a esfuerzos tremendos de levantamiento o de hidropartición. De una manera similar, se eliminan las combinaciones de presión baja con una toma baja, las cuales inyectarían las fisuras finas de una manera inadecuada.

Un valor constante de GIN, cuando se dibuja en una gráfica de presión contra volumen, produce una curva hiperbólica: mientras más elevada la intensidad de inyectado o el valor GIN, más grande es la distancia del origen de la curva. De esta manera la curva GIN completa el ingrediente faltante para juntar los otros dos límites discutidos en párrafos anteriores: la línea del volumen limitante y la línea de la presión limitante. La combinación de los tres da una envolvente limitante compuesta para el inyectado.

Envolventes limitantes compuestas para diferentes intensidades de inyectado

En la figura 1 se muestran las trayectorias p-V de tres tipos de fisuras. Una fisura abierta con abertura amplia se representa en la curva 1, que demuestra un volumen creciente de lechada inyectada con solo un incremento ligero de la presión. La curva 2 representa una fisura promedio, en donde la presión se incrementa gradualmente conforme el volumen de lechada inyectada aumenta; únicamente en el
punto a' se eleva rápidamente la presión conforme la resistencia a la penetración de la lechada se incrementa en una forma desproporcionada. La curva 3 representa una fisura cerrada, en donde la presión de inyectado se eleva rápidamente con tomas de lechada pequeñas. De una manera similar, la curva 4 representa una fisura extremadamente cerrada con una toma de lechada muy pequeña y una presión elevada de rechazo.

La figura 2 ilustra 5 envolventes limitantes sugeridas para diferentes intensidades de inyectado. El valor GIN, la presión límite y el volumen límite; son de hecho 3 parámetros más o menos independientes, que definen la curva envolvente limitante para el inyectado. En la definición propuesta se relacionan entre sí pero no necesitan estarlo. La envolvente superior representa un inyectado de muy alta intensidad, con un valor de GIN de 2500 bar·l/m, una presión límite muy elevada de 50 bar y un volumen límite muy elevado de 300 l/m. La envolvente más baja representa una intensidad muy baja con un valor GIN de 500 bar·l/m, una presión máxima de 15 bar y un volumen límite de 100 l/m. Para la mayoría de las condiciones, los autores recomendarían la envolvente de intensidad moderada con un valor dado de 1500 bar·l/m, una presión límite de 30 bar y un volumen límite de 200 l/m.

Para áreas geológicamente críticas (cerca de la superficie o sobre taludes parados), sería aplicable la curva muy baja. Se comprende fácilmente, de la combinación de las figuras 1 y 2, que el proceso de inyectado se detendrá en diferentes puntos dependiendo del valor seleccionado para la envolvente de inyectado.

En la curva 1 (fig.1), el inyectado se terminaría en el punto a para un inyectado de baja intensidad, debido al volumen límite de 150 l/m con una presión resultante de 3 bar. Sin embargo, si el diseñador especificó la envolvente de intensidad moderada, el inyectado continuaría hasta el punto b, el volumen límite de 200 l/m, y nuevamente la presión final sería alrededor de 3 bar. Si se hubiera seleccionado un inyectado de alta intensidad, el inyectado continuaría hasta el punto c, el volumen límite de 250 l/m, siendo la presión final alrededor de 6 bar. Finalmente, si se hubiera seleccionado una intensidad muy elevada, el inyectado continuaría hasta el punto d. La trayectoria no se terminaría por el volumen límite, sino más bien por la intersección con la curva GIN 2500. En este punto, el volumen total inyectado sería de 285 l/m y la
presión final de inyectado sería de 9 bar. De esta manera, habría un rango de volumen inyectado de 150 a 285 l/m y un rango de la presión final de inyectado de 3 a 9 bar, dependiendo del GIN especificado.

Para la curva 2 (fig.1), el volumen inyectado en el punto a', sería de alrededor de 60 l/m, y la presión final de inyectado sería de 13 bar. Si se hubiera continuado el inyectado hasta el punto d', que representa una intensidad muy elevada (p·V=2500), la toma de lechada se hubiera incrementado únicamente hasta 90 l/m, pero la presión hubiera alcanzado 28 bar, considerablemente menos que el valor límite de 50 bar. De una manera similar, para la curva 3, se detendría el inyectado entre el punto a'' y d'' dependiendo de los criterios de GIN y de la presión límite previamente seleccionados. La porción x-y representa un ejemplo de hidrofracturamiento o un evento de partición por presión hidráulica, en donde una junta o plano de estratificación se forza repentinamente abierto con una caída resultante de presión y un incremento en la velocidad de absorción. Se podría continuar el inyectado a velocidades bajas, para tratar de alcanzar la curva GIN seleccionada, pero, si la presión se incrementara, se presentaría probablemente otro evento de hidrofracturamiento aproximadamente a la misma presión o un poco mayor. Es cuestionable, si el inyectado debería continuarse bajo tales circunstancias. Sin embargo, muchas veces se ha hecho sin ningún problema serio. En cualquier caso, tarde o temprano se alcanza la curva límite y el inyectado se detiene.

Selección del valor GIN

El proyectista de la presa y su grupo geotécnico y de inyectado deberán seleccionar el valor de GIN para la pantalla de inyectado proyectada. Mientras que estos autores recomiendan el valor de GIN moderado de 1500 bar·l/m, como un inicio, deberán tomarse en cuenta las condiciones geológicas, el valor de las futuras perdidas de agua y las presiones de subpresión después del llenado. Los límites superiores de presión y los límites superiores de volumen también pueden ser modificados por los proyectistas y los ingenieros de control de campo para casos especiales. Probablemente el mejor procedimiento es el de llevar a cabo uno o dos tramos de inyectado de prueba antes de seleccionar la envolvente limitante de inyectado.
El límite superior de presión puede ser menor en los empotramientos que aquel seleccionado para el fondo del valle, debido a diferencias en la carga del embalse. Una meta que vale la pena, es una presión límite de aproximadamente 2 veces la carga del vaso, pero puede ser difícil lograr esto sin inducir un hidrofracturamiento no deseable.

**Inyectado controlado por computadora**

Ya que actualmente se pueden instalar y operar computadoras PC fácilmente en el sitio de inyectado mismo, existe ahora la posibilidad de un control continuo, en tiempo real, del proceso de inyectado. Solamente se deberán leer de una manera continua dos valores por medio del sistema: la presión actual p y la velocidad de flujo q, de la cual se puede obtener por medio de integración el volumen acumulado V por unidad de longitud (inyectado desde el inicio del inyectado de la progresión en cuestión). Si se desea, puede medirse directamente el volumen V de lechada inyectada; y la velocidad de flujo se podrá obtener por derivación.

Empezando desde los valores medidos de p y q, se pueden mostrar y graficar una serie de gráficas de tiempo sobre la pantalla del monitor (por ejemplo presión, velocidad de flujo, volumen acumulado y penetrabilidad contra el tiempo). La figura 3 muestra tal serie de gráficas. Llama la atención la curva (d), que representa el flujo específico \( q/p \) o penetrabilidad (es decir, la velocidad de flujo dividida entre la presión) contra el tiempo. Esta curva muestra claramente el llenado progresivo de los huecos y fisuras y el crecimiento de la resistencia al inyectado, causada en primer lugar por el incremento de la fuerza total cohesiva, conforme se extiende el flujo de lechada más adelante a lo largo de las fisuras de la roca. Se observa fácilmente un evento de hidrofracturamiento o hidroelevación por la presencia de un pico en la gráfica.

**Las Curvas GIN y de penetrabilidad-volumen como controles prácticos del inyectado.**

La figura 4 representa las gráficas principales de control que puede presentar la computadora. Estas curvas pueden utilizarse para controlar el proceso de inyectado. La figura 4(a) muestra la envolvente limitante de inyectado que ha sido seleccionada para el
proyecto (o para una zona dada del proyecto), incluyendo la presión límite \( p_{\text{max}} \), el volumen límite de \( V_{\text{max}} \) por unidad de longitud y la curva hiperbólica GIN seleccionada. Esta envolvente puede meterse en el programa y puede presentarse a petición. En general, estas curvas de la envolvente limitante, se les llama simplemente curvas GIN.

La curva irregular 2 mostrada en la figura 4(a) representa la trayectoria real del inyectado graficada en pequeños incrementos de tiempo, de la presión instantánea de inyectado contra el volumen acumulado de inyectado de lechada por unidad de longitud. La curva irregular de la trayectoria de inyectado intersecta la curva GIN en el punto \( F \), y el inyectado se detiene a una velocidad de flujo "cero", con una presión final \( p_f \) y un volumen total unitario acumulado de lechada inyectada \( V_f \).

La figura 4(b) también es una curva importante de monitoreo en tiempo real. La penetrabilidad \( q/p \) se gráfica contra el volumen acumulado de lechada inyectada en vez de, contra el tiempo, como en la figura 3(d), dando sin embargo curvas tipo similares. Conforme se desarrolla la curva, se observa normalmente un descenso en la penetrabilidad, lo que indica que la eficiencia del inyectado está disminuyendo. De esta manera, a una presión constante de inyectado, la velocidad de flujo va disminuyendo o bien, si se mantiene una velocidad constante de flujo (casi al final), la presión de inyectado va creciendo. La decisión de cual de estas combinaciones es aplicable, depende de ambos, el tipo de bomba y los detalles de la operación de inyectado (tuberías, válvulas).

El descenso de la curva de penetrabilidad-volumen indica que el proceso de inyectado está caminando normalmente. Deberá monitorearse y controlarse la presión de inyectado para detener el proceso en los límites de inyectado sobre la curva GIN.

Como se indicó en la sección anterior, la trayectoria de inyectado llegará a la curva GIN en diferentes puntos, en función de la abertura de las fisuras de roca (fisura amplia cerca del punto B y fisuras finas cerca del punto A; Fig. 4a). Conforme avance la trayectoria de inyectado hacia la curva GIN, las velocidades de bombeo deberían ser tan bajas como sea practicable, mientras todavía se logre una penetración de lechada (por ejemplo 500 l/h es
decir 17.6 ft³/h o 2.2 gals/min). La experiencia ha demostrado, que estas diferentes gráficas ayudan a controlar el proceso de inyectado de una manera efectiva y continua.

Aplicación a pantallas de inyectado

El método GIN, tal como se presenta, ha tratado principalmente con consideraciones para un solo intervalo de inyectado o progresión. El método también es aplicable a todos los intervalos de una perforación de inyectado y a todas las perforaciones primarias y con espaciamientos intermedios. El procedimiento de reducción de espaciamientos en una pantalla de una línea, es un método comprobado eficiente basado en un razonamiento teórico fundamentado.

En ciertas rocas altamente permeables o caveñas (flujos de lavas, algunas calizas, areniscas fracturadas), se han construido pantallas de tres líneas. Generalmente se inyecta primero la línea de agua abajo, seguido por la línea de aguas arriba y finalmente por la línea central. Se considera que las dos líneas exteriores se comportan como líneas de barrera (confinamiento) y con frecuencia se inyectan únicamente las perforaciones primarias y secundarias, con la intención de rellenar la mayoría de las fisuras o huecos mayores. La línea central puede tratarse entonces como una pantalla normal de una sola línea con perforaciones primarias hasta terciarias y aún cuaternarias o quinarias, si se requieren.

En el método de reducción de espaciamientos, las perforaciones primarias rellenarán parcial o totalmente y obturarán únicamente las fisuras más amplias de la roca. La serie (etapa) siguientes de perforaciones secundarias nuevamente obturarán únicamente las fisuras más amplias, que todavía no se taparon en la primera serie, y así sucesivamente. En la figura 5 se grafican las posiciones finales probables de las perforaciones primarias, secundarias, terciarias y adicionales (cuaternarias o perforaciones de comprobación) sobre la curva GIN. El volumen promedio de lechada absorbida disminuirá de una serie a la siguiente, mientras que obviamente la presión final de inyectado se incrementará de una manera correspondiente de una serie a la siguiente. Esto sucede en forma automática cuando se sigue el procedimiento GIN.

Con un espaciamiento de perforaciones primarias de 10 a 12 m, es
probable que se requerirán ambos, la serie (etapa) secundaria y terciaria. Las perforaciones terciarias estarían a una distancia de 2.5 a 3 m de la perforación adyacente más cercana; estas perforaciones podrían ser más cortas, dependiendo de la geología y de los resultados de las perforaciones secundarias.

Es posible que no se requieran las perforaciones cuaternarias. Por lo menos se requerirían algunas perforaciones de comprobación, para llevar a cabo pruebas Lugeon, para ver si se logró una permeabilidad baja aceptable de la masa de roca; para una pantalla muy "cerrada", los requisitos pueden ser tan severos como que el 90% de todas las pruebas deberán estar cerca o abajo de 1 Lugeon ($1 \times 10^5$ cm/s), con ningún valor mayor de 3 Lugeon.

**Relación de espaciamiento de los barreos y el GIN**

Es obvio que debe existir una relación entre el espaciamiento de las perforaciones y el GIN requerido. Por ejemplo, si el espaciamiento primario es demasiado amplio y el GIN seleccionado demasiado bajo, no resultará ningún decremento significativo de la toma de lechada de la serie primaria a la secundaria, o aún hasta la terciaria. En tal caso, no se puede dar ninguna garantía para una pantalla exitosa, aunque se hayan efectuado gastos considerables de perforación e inyectado.

Si el espaciamiento primario es demasiado cercano o el GIN es demasiado elevado, las tomas de lechada serán muy bajas después de las primeras dos series y las perforaciones terciarias serían esencialmente un desperdicio. El GIN también está relacionado con la distancia que viaja la lechada y por lo tanto, con el espesor de la pantalla en roca o "el muro".

Una regla empírica, que funciona, es el seleccionar los valores de GIN y el espaciamiento de tal manera, que el volumen inyectado por metro de progresión de inyectado se reduzca de una serie de perforaciones a la otra en alrededor del 50% (de una manera realista en el rango del 25 al 75%). Tal comportamiento daría confianza de que está ocurriendo un cierre progresivo en la pantalla. Se podrán emplear uno o más tramos de inyectado de prueba durante la fase de diseño o en la primera parte del contrato de inyectado, para definir mejor el espaciamiento óptimo de las perforaciones primarias y el valor de GIN.
Criterios para el cierre

Si las trayectorias de inyectado de las perforaciones de la última serie (digamos la serie terciaria) no alcanzan la línea de la presión límite superior del GIN seleccionado (y preferentemente en la mitad izquierda de la línea), se deberán inyectar perforaciones adicionales en ambos lados de estas perforaciones que no cumplan estos criterios. De esta manera, todas las partes de la pantalla (aunque no todas las perforaciones primarias, secundarias y terciarias), se habrán inyectado a la presión límite máxima de inyectado con absorciones de lechada razonablemente bajas (menos de 25 kg/m o 0.18 sacos/ft, por ejemplo).

Si se efectuó una selección no óptima del espaciamiento entre los barrenos, el método propuesto, es por lo menos hasta cierto grado un procedimiento que se regula por sí solo. Esto es como un resultado de la técnica de reducción de espaciamiento, la curva GIN y el requisito de la última serie de perforaciones de alcanzar la presión límite con tomas unitarias mínimas.

En conclusión se cree que, si uno sigue los conceptos y reglas presentadas, se puede lograr una distribución bastante óptima del volumen total inyectado a lo largo de la pantalla. El procedimiento toma en cuenta, casi en forma automática, las irregularidades reales de las condiciones geológicas en la masa de roca. Al hacer esto, se puede maximizar la relación beneficio costo de la pantalla de inyectado.

Puntos principales del método GIN

Varios conceptos y procedimientos son básicos en la aplicación del método de inyectado GIN. Estos se resumen a continuación bajo cuatro encabezados.

Conceptos básicos

- Se emplean únicamente mezclas estables moderadamente espesas de lechada: (a) para reducir la sedimentación y el bloqueo prematuro; y (b) para obtener una lechada endurecida densa y resistente.
Se usa, hasta donde sea posible, sólo una mezcla única para todo el trabajo de inyectado: para (a) proporcionar un sólo fluido Binghamiano con propiedades conocidas; y (b) para simplificar el procedimiento de inyectado, mejorando así la eficiencia y reduciendo errores.

Se emplea la curva GIN para monitoreo de la presión de inyectado: (a) para que se permita la aplicación de una presión elevada donde se requiera; y (b) para evitar la presión elevada donde sería dañina o un desperdicio.

Se controla el proceso de inyectado por medio de una computadora de campo: (a) para seguir en tiempo real la presión y la velocidad de flujo; (b) para graficar la trayectoria p-V sobre la curva GIN seleccionada; y (c) para indicar la terminación del inyectado, utilizando la trayectoria de inyectado p-V y la curva de penetrabilidad-volumen.

**Diseño de la mezcla**

Se usan aditivos para obtener las características deseadas de la lechada: (a) aditivo superplastificante para reducir la cohesión y viscosidad de la mezcla de manera de incrementar la penetrabilidad de la lechada; y (b) posiblemente un agente retenedor de agua, para reducir la pérdida de agua durante el exprimido.

Se lleva a cabo una serie amplia de pruebas de laboratorio en el periodo inicial con varias mezclas de lechada con una relación agua:cemento (por peso) que varía de 0.7:1 a 1:1. Esto es para: (a) probar diferentes cementos disponibles de finura variable; (b) probar diferentes aditivos en diferentes porcentajes; y (c) obtener valores de prueba del peso unitario de la lechada, viscosidad aparente del embudo Marsh, sedimentación a las dos horas, cohesión, tiempos iniciales y finales de fraguado, resistencias a la compresión a los 7 y 28 días y pérdida de agua en pruebas de exprimido.

**Arreglo de las perforaciones de inyectado**

Se adopta el método normal de reducción de espaciamientos desde las perforaciones primarias a través de las terciarias o hasta cuaternarias: (a) para proporcionar una cobertura mínima uniforme
en todo; y (b) permitir de que haya perforaciones con
espaciamientos más cercanos, en donde las condiciones geológicas y
los resultados del inyectado así lo indiquen.

- Se llevan a cabo pruebas de inyectado de campo, ya sea durante la
  fase final de diseño de la cortina o durante la primera parte de la
  fase de construcción: (a) para probar las diferentes zonas del
  sitio, que tengan condiciones geológicas o topográficas diferentes
  (por ejemplo, fondo del valle y cada empotramiento); (b) para
  seleccionar el espaciamiento óptimo de las perforaciones
  primarias, de manera que las perforaciones secundarias y terciarias
  posteriores muestren una disminución continuada del 25 al 75% por
  serie (considerese un espaciamiento preliminar de las perforaciones
  primarias de 10 a 12 m); y (c) para permitir que se prueben
  diferentes curvas GIN (por ejemplo graficando la trayectoria p-V
  para cada etapa de inyectado hasta la intensidad de inyectado
  anticipada o hasta el primero o segundo evento de
  hidrofracturamiento).

**Control de campo**

- Se definen los elementos de control de la curva GIN a partir de
  los resultados del programa de inyectado de prueba, así como
  cualquier consideración especial ingenieril, de mecánica de rocas
  o geológica: (a) para garantizar que los límites de volumen y
  presión sean razonables para las carecterísticas geológicas
  existentes; y (b) para evaluar la necesidad de diferentes valores
  de GIN en diferentes partes de la obra.

- Se inyecta cada cuarta perforación primaria primero como
  perforaciones de inyectado exploratorias, excepto en áreas de un
  inyectado de prueba previo: (a) para permitir una mejor definición
  por áreas de las condiciones geológicas y geohidrológicas (por
  medio de perforación rotatoria con recuperación de núcleos y
  pruebas de presión de agua Lugeon hasta una profundidad igual a la
  altura futura del embalse arriba del punto del terreno en
  cuestión); (b) para permitir una selección final de la profundidad
  de los barrenos para las perforaciones primarias restantes
  (probablemente un rango de profundidad de 0.5 a 0.8 de la altura
  del embalse); y (c) para asegurarse de que la curva GIN
  seleccionada sea apropiada.
Se controla el proceso de inyectado por medio de una computadora de campo, utilizando la curva GIN y la curva de penetrabilidad: (a) para permitir un monitoreo en tiempo real de la trayectoria de inyectado; y (b) para permitir que se anticipe la terminación del inyectado a partir de la curva de penetrabilidad declinante y del acercamiento de la trayectoria de p contra V hacia la curva GIN controladora (incluyendo el volumen límite y las porciones de presión límite de la curva).

Se inyecta previamente agua antes del inyectado de cualquier progresión arriba del nivel del agua subterránea, para saturar parcialmente la roca, de manera de reducir el riesgo de pérdida del agua de la lechada junto con un bloqueo prematuro.

Se emplean pruebas de presión de agua Lugeon únicamente en las perforaciones exploratorias primarias y en las perforaciones de comprobación, para comparar las permeabilidades iniciales y finales de la masa de roca.

Se resumen los resultados del inyectado por medio de métodos estadísticas gráficos, para asegurarse de un cierre progresivo de las fisuras de la roca con una permeabilidad residual resultante aceptablemente baja.

**Ejemplo**

Durante la última década este procedimiento de inyectado fue introducido paso a paso en una serie de sitios en Argentina, Austria 12-13, Ecuador, México, Suiza y Turquía. En el futuro cercano, el método continuará siendo utilizado en proyectos planeados en varios países.

En el inyectado en proceso en la presa Aguamilpa en México puede mencionarse como un ejemplo sobresaliente. Esta presa de 180 m de altura, propiedad de la Comisión Federal de Electricidad, será la presa más alta de enrocamiento con cara de concreto en el mundo. Su llenado se iniciará durante 1993.

El método GIN se está empleando actualmente para ambos, la consolidación de roca abajo del plinto de la cimentación de la cara de concreto y para la pantalla de inyectado profunda. Después de
pruebas extensas de laboratorio y de campo, se seleccionó una sola mezcla "normal". Tiene las siguientes características:

Cemento: cemento puzolanico fino con valor Blaine alrededor de 5100 cm²/g
Relación agua-cemento: 0.9:1 (un poco mayor que el normal, debido al valor elevado de Blaine)
Aditivo superplastificante: 1.6% del peso de cemento de de Sikament NZ
Densidad de la mezcla: 1.5 a 1.55 g/cm³
Decantación: 4% en 2 horas
Tiempo de flujo en embudo Marsh: 28 a 32 s
Cohesión relativa (C/γ): 0.08 a 0.2 mm, aumentando a 0.2 hasta 0.3 en 2 horas
Resistencia de la mezcla endurecida: 9 a 10 MPa a los 7 días y 13 a 17 MPa a los 28 días.

Corresponde a una mezcla estable, pero muy fluida con propiedades de alta penetración durante la primera hora y una resistencia excelente tanto mecánica como contra lixiviación.

Para la pantalla de inyectado se especifica como regla lo siguiente:

- Procedimiento: progresiones ascendentes de 5 m;
- Método de reducción de espaciamientos, iniciando con perforaciones primarias a una distancia de 24 m;
- Se perforan barrenos adicionales de orden mayor, mientras que la toma sea mayor de 25 l/m;
- Saturación de la masa de roca (arriba del nivel del agua) durante una hora a una presión de 2 bar, inmediatamente antes del inicio del inyectado para cada progresión de 5 m;
- Intensidad de inyectado: 2500 bar·l/m (reducido a 1500 debajo del plinto);
- Límite máximo de presión: 40 bar (reducido cerca de la superficie a 10 bar y aumentando a 40 bar a una profundidad de 20 m y también reducido en forma adecuado en sitios geológicamente delicados);
- Límite máximo de absorción: 400 l/m, en efecto, 2000 litros por 5 m de progresión (se reduce localmente a 300 l/m); y
- Criterio de suspensión: velocidad de flujo menor de 3 l/m min para una progresión de 5 m a la presión final de inyectado.

Estas especificaciones son fáciles de manejar en el sitio, especialmente porque únicamente se utiliza una sola mezcla.

Como un ejemplo, la figura 6 muestra la trayectoria del inyectado de consolidación abajo del plinto de una progresión. Las lecturas fueron tomadas en forma intermitente a intervalos de alrededor de 5 minutos, ya que no había disponibilidad de monitoreo por computadora PC. En la parte superior figura 6 (a) las trayectorias de la presión $p$ así como la velocidad de flujo $q$ se grafican contra el volumen $V$ de lechada inyectada. La trayectoria de presión puede compararse con la frontera limitante del GIN.

La meta del inyectado fue una intensidad de 1500 bar·l/m. Sin embargo, se alcanzó una intensidad de 2510 bar·l/m y se excedió ligeramente el volumen límite de 300 l/m. Este exceso fue causado por un retraso en la transmisión del sitio de inyectado al operador de la bomba, o debido a una reacción lenta del operador mismo de la bomba. (Esto indica la deseabilidad de un monitoreo continuo en tiempo real y una presentación por computadora PC, así como el tener un paro automático de la bomba, cuando se alcance la curva GIN controladora.)

En la parte inferior figura 6 (b), se gráfica la penetrabilidad contra el volumen tomado $V$. Al principio del proceso de inyectado, la penetrabilidad se incrementa (de 0.2 a 0.5 l/min·m·bar), debido a la apertura progresiva de las discontinuidades de la masa de roca. Después de una toma de 200 l/m, se disminuye la penetrabilidad en forma regular a 0 para un volumen de 320 l/m. En efecto, el proceso de inyectado se detuvo justamente antes de alcanzar este valor.

Se considera que algunas de las irregularidades mostradas en la curva de penetrabilidad son causadas por el redondeo de algunas lecturas por los operadores. También, es probable que ocurrieron dos o más eventos de hidrofracturamiento, que no se detectaron completamente por el monitoreo intermedio.
Comparación con el inyectado usual

Un proceso de inyectado "tradicional" consiste en definir una presión de inyectado y el empleo de diferentes tipos de lechada, por ejemplo, lechadas con una relación sucesivamente menor de agua:cemento (4:1, 3:1, 2:1, 1:1 etc.). El cambio de mezcla se efectúa a volúmenes especificados de lechada tomada por la perforación. Es obvio, que la cohesión de estas mezclas se aumenta de una a la siguiente y que en algún punto la resistencia al flujo por cohesión y la penetración incrementadas detendrán el proceso de inyectado.

Con el método GIN, únicamente se emplea una sola mezcla; consecuentemente la cohesión es una constante. Conforme avance la lechada a lo largo de las fracturas, su contacto con las paredes de las fracturas se incrementa y de esta manera la resistencia total de flujo por cohesión. Consecuentemente se deberán utilizar presiones de bombeo mayores para vencer la resistencia al flujo. Esto es un fenómeno físico normal y esperado. El método GIN permite que se continúe con el proceso de inyectado bajo una presión que se incremente gradualmente hasta que se alcancen uno de los valores límites: la presión límite, el volumen límite, o una combinación de presión y volumen, representada por la curva especificada p-V.

Existen otras diferencias entre los métodos tradicionales y el procedimiento GIN: el método GIN siempre emplea únicamente la mejor mezcla posible con relación a resistencia, durabilidad, resistencia a la lixiviación y contracción; el GIN evita el inyectado de grandes volúmenes en forma de mezclas delgadas; el empleo de una mezcla estable evita o reduce, de una manera significativa, el riesgo de dañar la roca por hidrofracturamiento; se reducen grandemente los errores en el proceso de inyectado; y el proceso de inyectado es más sencillo y más rápido, ya que no se pierde tiempo al cambiar de mezcla.

Resumen y conclusiones

El proceso de inyectado involucra un bombeo constante de la lechada a una velocidad baja a mediana con un escalamiento lento de la presión, conforme la lechada penetra más dentro de la masa de roca. El inyectado se detiene, cuando el volumen inyectado alcanza un
valor límite especificado para una progresión, cuando la presión de inyectado alcanza el valor límite previamente seleccionado, o cuando la intensidad de inyectado especificada ha sido alcanzada en una posición intermedia, menor que los valores límite de volumen y presión, como se juzga por la curva GIN previamente seleccionada.

La distancia al origen de la curva es una función de la energía empleada en el inyectado. Se puede preparar una familia de curvas para varias intensidades de inyectado, variando desde un valor muy bajo hasta un valor muy elevado. Se puede seleccionar una curva de intensidad para el proyecto, o se pueden emplear dos, por ejemplo, una de alta intensidad para el inyectado del fondo del valle y una de baja intensidad para los taludes someros de los empotramientos o en áreas geológicamente débiles.

De esta manera, la envolvente limitante completa consiste de la línea de presión límite (en el rango de 15 a 50 bar), la línea del volumen límite (en el rango de 100 a 300 litros por metro de intervalo de inyectado), y una curva GIN seleccionada que conecte las dos líneas límite (con valores GIN que varían de muy bajos a muy elevados, por ejemplo 500 a 2500 bar·l/m).

El Método GIN requiere un monitoreo cercano por medio de gráficos de computadora con curvas de tiempo real de la presión contra el tiempo, de la velocidad de flujo de la lechada contra el tiempo, y del volumen total inyectado contra el tiempo, además de la curva derivada de penetrabilidad (velocidad de flujo dividida entre la presión, q/p) contra el tiempo. Esta última curva es de un valor particular, ya que señala el alcance del rechazo del inyectado, o por lo menos de absorciones que se van reduciendo.

El método GIN ha sido comprobado como una herramienta muy útil en el diseño y en el control de los trabajos de inyectado. Su empleo incrementado deberá mejorar los trabajos de inyectado para estructuras hidráulicas. Ya que el método es flexible, con relación a la presión límite, el volumen límite inyectado y el valor GIN que deberá lograrse, es probable que la experiencia obtenida en proyectos actuales y futuros conducirá a refinamientos adicionales.
Referencias


4. EWERT, F. K., "Rock grouting with emphasis on dam sites", Springer-Verlag, Berlin, Germany; 1985.

5. DEERE, D. and Lombardi, G., "Grout slurries - Thick or thin?" Issues in Dam Grouting, Proceedings of the session sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE, Convention in Denver, Colorado; April 1985.


FIG. 1. EJEMPLO DE CURVAS DE TRAYECTORIAS DE INYECTADO.
FIG. 2. ENVOLVENTES LIMITANTES PROPUESTAS PARA INYECTADO.
3. PROCESO DE INYECTADO DE UNA SOLA PROGRESIÓN: (A) PRESIÓN DE INYECTADO; (B) FLUJO DE MEZCLA DE LECHADA; (C) VOLUMEN ABSORBIDO; (D) PENETRABILIDAD. O = INICIO DEL INYECTADO; H = HIDROFRAC TURAMIENTO; Y, F = TERMINACIÓN DEL INYECTADO.
FIG. 4. PROCESO DE INYECTADO DE UNA SOLA PROGRESIÓN (TÍPICO). EN DONDE:
1 = CURVA LÍMITE PRENSIÓN CONTRA TOMA DE LECHADA; 2 = TRAYECTORIA REAL
DE INYECTADO PRENSIÓN CONTRA TOMA DE LECHADA; 3 = PENETRABILIDAD (q/p)
CONTRAPRESIÓN DE LECHADA, F = PUNTO FINAL DEL INYECTADO; P_F = PRESIÓN FI-
NAL DE INYECTADO; Y, V_F = TOMA REAL DE LECHADA.
FIG. 5. EJEMPLO DE RESULTADOS DEL INYECTADO PARA UNA PANTALLA DE INYECTADO, PUNTOS FINALES DE LAS TRAYECTORIAS DE TODAS LAS PROGRESIONES DE INYECTADO (TIPICO).
FIG. 6 b. PRESA AGUAMILPA, MÉXICO. BARRENO 6741P. PROGRESIÓN 17-22. INYECTADA DICIEMBRE 3, 1982. (b) PENETRABILIDAD (q/p) CONTRA VOLUMEN.