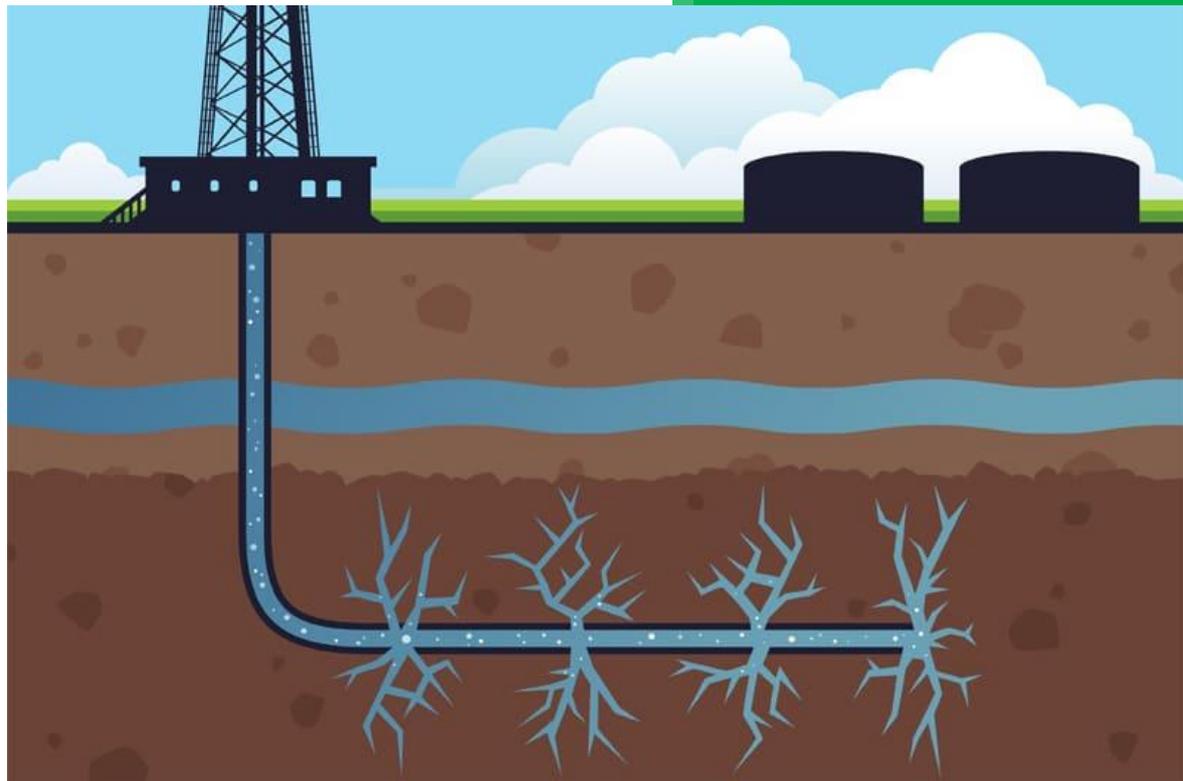


UTN - LA PLATA

DTO. INGENIERIA MECANICA

Practica Supervisada



Fracturamiento hidráulico en equipo de laboratorio

Alumno: Yankowsky, Juan G.
Docente Tutor: Sánchez, Martin

AÑO 2019

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	3
1. OBJETIVO	3
2. ALCANCE	3
3. LA PRENSA.....	3
4. LA MUESTRA	4
5. FUNCIONAMIENTO	5
6. ENSAYOS	5
6.1. PRIMER CUBO.....	5
6.2. SEGUNDO CUBO	7
6.3. TERCER CUBO	15
7. CONCLUSIONES	19
8. ANEXOS.....	21

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se establece sobre la base de la investigación de los factores que determinan la posibilidad de implementar un método de ensayo para el equipo de fractura hidráulica instalado en el laboratorio de Física de Rocas en Y-Tec.

Dicha empresa (YPF Tecnología), es una empresa de tecnología creada en 2012 por YPF (51%) y el CONICET (49%), cuya misión es brindar soluciones tecnológicas de alto impacto para el sector energético.

Su sede de 13000 m² se encuentra ubicada en la ciudad de Berisso, provincia de Buenos Aires. Cuenta con laboratorios y oficinas en el edificio central y otro separado de plantas piloto.

1. OBJETIVO

Lograr exitosamente el fracturamiento hidráulico de 3 bloques utilizando la prensa mecánica para confinar la muestra.

2. ALCANCE

Establecer la forma más adecuada de desarrollar el ensayo propuesto, solucionando las cuestiones técnicas que se desaten en el proceso de lograr un ensayo de fractura exitoso.

3. LA PRENSA

Este equipo está pensado para ensayar fractura hidráulica en muestras construidas con diferentes características, a fin de estudiar el comportamiento y la propagación de las fracturas estimuladas hidráulicamente bajo distintas condiciones de ensayo.

La prensa posee una capacidad de compresión de 190.000 Kg y contiene una probeta cubica de 300 mm de lado. Esta prensa (Fig. 1) tiene la particularidad de comprimir en dos planos (sobre cuatro caras) simultáneamente la probeta.

La carga de compresión estipulada hará que sobre las caras se genere una presión de 3000 psi como máximo. Se anexan los planos de esta.

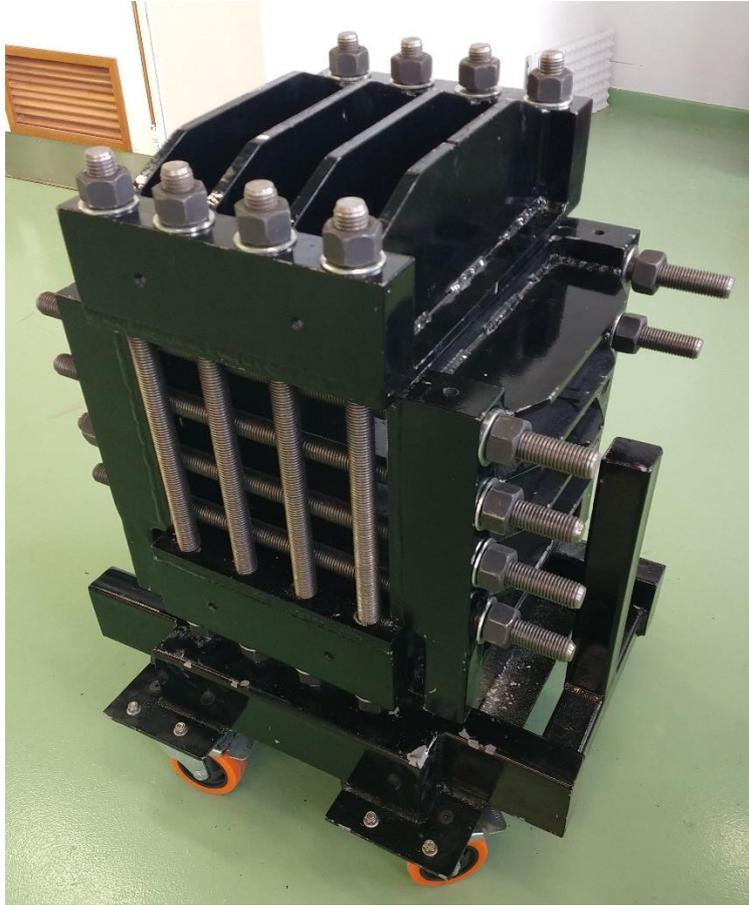


Fig. 1. Prensa con capacidad de compresión en dos direcciones.

4. LA MUESTRA

Consta de un cubo de yeso de 300 mm de lado, el cual contiene un tubo de acero inoxidable de 1/4" que puede ser pasante sobre las caras libres de la probeta o bien empotrado hasta la mitad del cubo.

Dicho tubo presenta un orificio lateral en una posición tal que este quede en el centro del cubo. En su extremo libre se conectará a la línea de presión poral de la prensa triaxial donde se inyectará fluido a presión.

5. FUNCIONAMIENTO

El cubo se coloca sobre la base de la prensa y luego sobre la parte superior de este se colocará a modo de tapa la otra mitad de la prensa; realizada esta maniobra se aplicará presión mediante el torqueo de los espárragos de alta resistencia.

El torque que se debe aplicar a cada espárrago surge de la fuerza de compresión total que debe ejercer para lograr la presión solicitada sobre las caras del cubo, dividido por el número de espárragos. (Ver anexos en donde se explica la fuerza de apriete en función del diámetro del tornillo, la calidad de este y el torque de apriete)

Una vez torqueados todos los espárragos y por ende alcanzada la carga de compresión deseada sobre el cubo, se procederá a realizar las mismas tareas para lograr la compresión sobre las otras dos caras laterales del cubo. Esto se realiza colocando dos placas laterales de similares características a las utilizadas en la cara superior e inferior.

La inyección del fluido a presión será provisionada y controlada por la prensa triaxial, esto permitirá controlar con precisión y llevar registro de la variación de presión durante el ensayo.

6. ENSAYOS

6.1. PRIMER CUBO

Se realizó un cubo macizo de yeso ubicando en su centro un caño de 1/4" (misma medida que el utilizado para el ensayo), el cual se retiró al endurecer el yeso. Dicho cubo se dejó fraguar dos semanas para asegurarse de que su centro haya solidificado, debido a su gran volumen.

Se preparó una pequeña colada de cemento puro, con mayor proporción de agua que de cemento para que no solidifique rápidamente cuando el yeso absorba parte del agua de dicha mezcla, y se vertió en el orificio a la vez que se introduce el caño

definitivo, esto es para lograr sellar cualquier espacio por el cual pueda escapar el fluido sin provocar el aumento de presión interna necesario para producir la fractura.

Este caño es pasante al cubo y está roscado por completo para tener buena superficie de agarre con el cemento, posee un pequeño orificio en la mitad de su longitud por donde es inyectado el fluido dentro de la muestra. Un extremo se encuentra tapado y el otro posee un niple para acoplarse a la manguera que inyectará fluido a presión.

Para hacer una prueba de sellado y como primer paso por cuestiones de seguridad se aplica fluido a presión utilizando una bomba manual, como se ve en la Fig. 2.



Fig.2. Bomba manual.

Se utilizó agua como fluido de prueba a la cual se le añadió tinta china para visualizar el camino realizado por el fluido dentro de la muestra.

Bombeando agua y viendo el manómetro se observa un aumento de presión dentro del cubo hasta que rompe y desciende bruscamente la presión. La presión máxima visualizada en el manómetro de aproximadamente 2000 psi. Luego de desarmar todo el sistema y cortando el cubo en pedazos para llegar al centro y evaluar la fractura se detecta que la fractura no fue debido a lo esperado. En la Fig. 3 se puede observar los trozos circundantes a la fractura.



Fig. 3. Fragmentos del bloque donde se observa el plano de fractura a partir del orificio de inyección del tubo.

Se espera que la fractura se produzca y propague con la inyección de fluido a caudal constante, pero el cementado que recubre el caño fue el causante de acumular presión hasta el momento de rotura, y al liberarse espontáneamente la presión se propago al yeso.

6.2. SEGUNDO CUBO

Para este segundo bloque se utilizó un caño similar al anterior, pero introduciéndose hasta la mitad del bloque y dejando el definitivo (roscado) para que quede empotrado en la misma colada de yeso (Fig. 4).

Se practicó un orificio sobre el costado del caño muy cercano al extremo empotrado dentro de la muestra. Luego, se introduce dentro del caño una tanza de manera de dejar 2cm saliendo por el agujero practicado y otro tanto por el extremo libre.



Fig. 4. Caño roscado con la tanza.

Por encima del molde se coloca una tabla, pasando de una cara a la otra de este, con un orificio para que pase el caño y fijarlo en posición centrado en la cara transversal de la muestra y a la altura justa para que el orificio del caño quede en el centro del cubo. Cuando el yeso vertido en estas condiciones se endurezca se podrá retirar la tanza por el extremo libre y lo que producirá es un conducto capilar dentro de la muestra comunicado con el orificio del caño, favoreciendo que el fluido inyectado se dirija en esa dirección y facilitara la producción de la fractura (esto es equivalente al proceso de punzado en las operaciones de fractura hidráulica reales).

Este segundo cubo presenta una proporción de 63,3 % de yeso y 36,7 % de agua en peso. Para su mezclado y colado en el molde se adaptó un equipo prestado de otro laboratorio de la misma institución y así lograr un mejor y más fácil mezclado del yeso, permitiendo un resultado más homogéneo (Fig. 5).



Fig. 5. Bach mezclador montado sobre una base y el molde debajo para la descarga del yeso.

Comenzando el ensayo se observa que el agua inyectada comienza a salir por el contorno del caño sobre la superficie de la muestra, evidenciando que el yeso no se adhiere correctamente al caño y evita la acumulación de presión.

Se descarta el ensayo y se realiza sobre el mismo bloque un tapón de resina alrededor del caño para evitar que el fluido escape por allí como se observa en la Fig. 6.



Fig. 6. Tapón de resina en la entrada del caño de un bloque de yeso.

Una vez endurecida la resina se vuelve a comenzar el ensayo y no hay pérdida aparente. La inyección de fluido no presenta un aumento de presión considerable y luego de haber inyectado más de 1,5 l se decide concluir la operación.

Evaluando las condiciones, se decide realizar ensayos de porosidad y permeabilidad a probetas extraídas del mismo cubo.

Los resultados de estos ensayos resultaron en una porosidad elevada (53% de porosidad), como conclusión se obtiene que el cubo podría absorber una gran cantidad de agua sin elevar su presión. Para solucionar esto se visualizan dos alternativas:

- Disminuir la porosidad de la muestra.
- Utilizar un fluido más viscoso que le dificulte la absorción al yeso.

Dado que ya se posee un cubo armado, se comienza con la utilización de un fluido más viscoso.

Al ser un fluido distinto al que puede manejar la prensa triaxial se utiliza una bomba cedida por un laboratorio vecino que puede manejar cualquier tipo de fluido. En la Fig. 7a (izq.) podemos ver el embolo controlado por la bomba (Fig. 7b der.). En la Fig. 8 se puede apreciar el sistema completo armado.



Fig. 7(a) a la izquierda, embolo inyector del fluido de fractura. Fig. 7(b) a la derecha, bomba con control de caudal.



Fig. 8. Prensa armada y conectada, lista para ensayar.

Se utilizó para esta prueba un polímero hecho a pedido que posee una viscosidad de 2000 cP y se tiñó con anilina color azul.

Para este ensayo se montó el cubo en la prensa y se torqueo los espárragos con el objetivo de tener una presión lateral de 100 psi y una vertical de 200 psi.

Comienza el ensayo a 0,1 ml/min de inyección del fluido. No se observa una elevación de presión por un tiempo hasta que muy lentamente comienza a elevar y se estabiliza. Se decide incrementar el caudal a 0,5 ml/min y se observa un salto de presión que vuelve a estabilizarse al instante. Una vez más se incrementa el caudal a 5 ml/min, pero sucede lo mismo que antes y se decide finalizar la prueba.

La presión máxima alcanzada en esta instancia fue alrededor de 65 psi.

Cortando el cubo por la mitad y evaluando el camino recorrido por el fluido dentro de la muestra se observa que el mismo aun es absorbido por el yeso y que fluye más preferentemente en los alrededores del caño, debido a la baja adherencia entre ambos materiales.

Por tales motivos se decide cambiar el material de la muestra, se construye un cubo de cemento puro (Fig. 9) con una proporción de 31,7% de agua y 68,3% de cemento, al cual se le agrego un acelerante de fragüe en 1/10 de la cantidad de agua. Este cubo se ensayó una semana después de su construcción.



Fig. 9. Cubo de cemento.

En esta ocasión se aplicó un confinamiento lateral de 200 psi y una vertical de 400 psi. Se utilizó aceite hidráulico como fluido de fractura, al cual se le dio tinte usando un indicador color azul.

Inyectando el fluido a caudal de 10ml/min se observa al minuto que comienza a salir aceite por la periferia del caño en forma de goteo lento, pero no impide el aumento de presión dentro del cubo. La presión aumenta hasta que al llegar a un valor aprox. de 700 psi la muestra se fractura y se observa la disminución brusca de la presión (fig. 10).

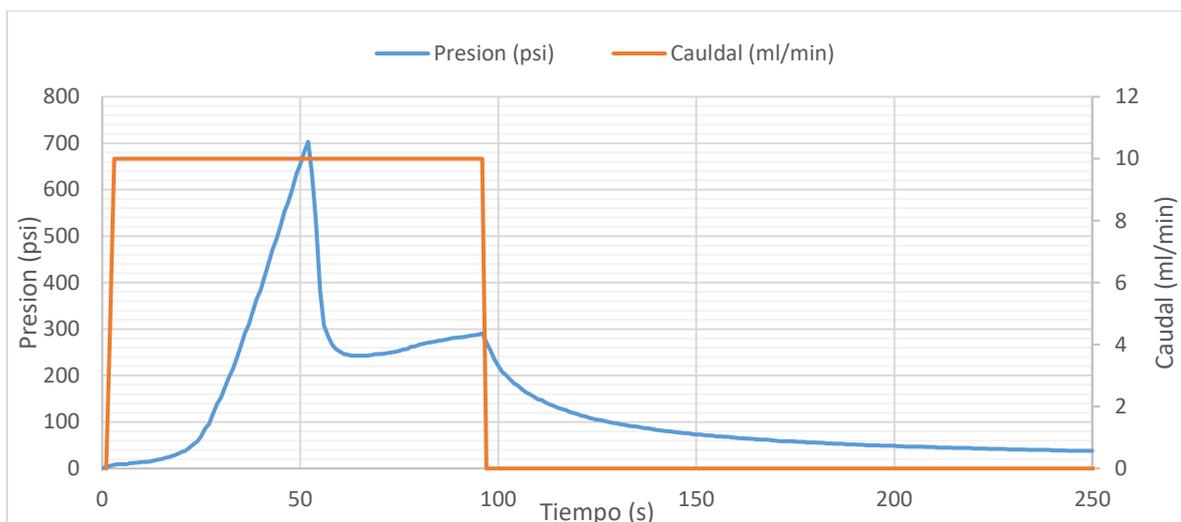


Fig. 10. Grafico del desarrollo del ensayo. Presión y caudal vs tiempo.

La fractura propago hasta la cara contraria a la del caño y en forma horizontal (Fig. 11a), esto no debería suceder así debido a los esfuerzos exteriores aplicados sobre la muestra. El bloque posee confinamiento en las caras transversales al caño, por lo tanto, la fractura debería ser también transversal ya que el grado de libertad que posee el bloque para que el plano de fractura se abra es en el sentido longitudinal al caño por no poseer confinamiento, o sea en la dirección de menor esfuerzo.

Para evaluar mejor el resultado se opta por cortar el bloque en 3 secciones en la dirección del caño empotrado y transversalmente al plano de fractura observado. En primera instancia cada sección no se abre por si sola en el plano de fractura y para esto aplicamos un pequeño golpe seco con un martillo de goma, luego las secciones de abren perfectamente.

La primera observación es que el indicador disuelto en el aceite no es efectivo ya que se denota muy poco color azul y solo en la cercanía del punto de inyección. Esto se puede ver en la Fig. 11b.



Fig. 11(a) a la izquierda, plano de fractura. Fig. 11(b) a la derecha, tinte azul alrededor del orificio del caño.

Debido a la forma que tomó la fractura, la misma no se puede considerar como exitosa y por lo tanto no es posible obtener conclusiones de esta, pero si evaluar por qué razones no fracturo de la manera que se esperaba. Es difícil de comprobar, pero una posible razón es que las placas de la prensa no hayan quedado perfectamente paralelas durante el apriete y esto genere un estado de tensiones distinto.

6.3. TERCER CUBO

El tercer cubo se construyó con las mismas condiciones que el anterior, proporción de componentes, empotramiento del caño, etc. Se montó sobre la prensa confinando de la misma manera, la presión lateral fue de 200 psi y la vertical de 400 psi. En esta ocasión se pintó con grasa todas las caras del cubo que están en contacto con la prensa para evitar que existan fuerzas de roce intervinientes en el proceso del ensayo (Fig. 12).

Debido al mal resultado del trazador usado en el ensayo anterior y dado que volveremos a utilizar aceite, se optó en esta instancia por utilizar pintura para oleo. Se diluyo un pomo de pintura color rojo de 20 ml en aproximadamente 800 ml de aceite.



Fig. 12. Caras del bloque engrasadas.

Comenzamos el ensayo igual que el anterior, inyectando a caudal constante de 10 ml/min y se observa un aumento paulatino de la presión dentro del bloque hasta que pasando los 7 min de ensayo se estabiliza en aproximadamente 350 psi, posiblemente por una micro-fractura. También se ve un goteo lento del fluido por el contorno del caño, evidenciando que es necesario mejorar la adherencia entre ambos materiales. De lo anterior se decide aumentar el caudal a 50 ml/min, con lo cual la presión aumenta rápidamente y pasando los 800 psi se observa claramente la fractura. Esto se puede ver en la Fig. 13 (grafico).

Ahora la fractura observada es en el plano transversal al caño como se esperaba. El bloque se corta en tres partes, de la misma manera que el anterior y con un pequeño golpe con el martillo de goma se abren en el plano de fractura. En las Fig. 14 y Fig. 15 se puede apreciar el plano de fractura en ambas mitades de la muestra. En la Fig. 16 también se puede ver en detalle el conducto capilar generado por la tanza al momento del fraguado.

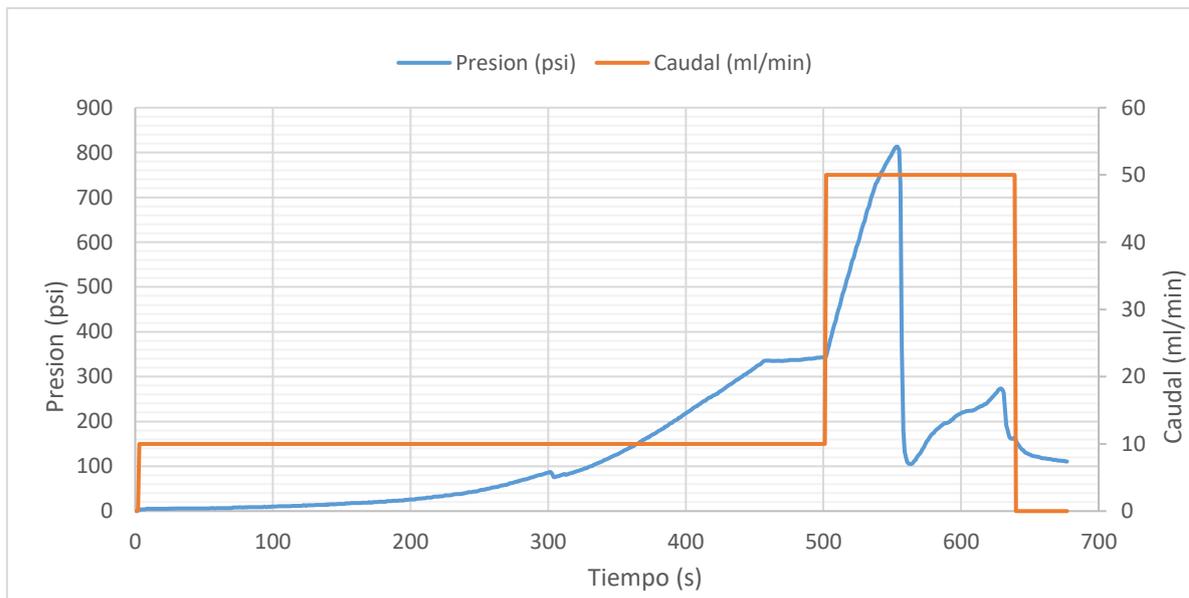


Fig. 13. Desarrollo del tercer ensayo.



Fig. 14. Mitad posterior del bloque de cemento.

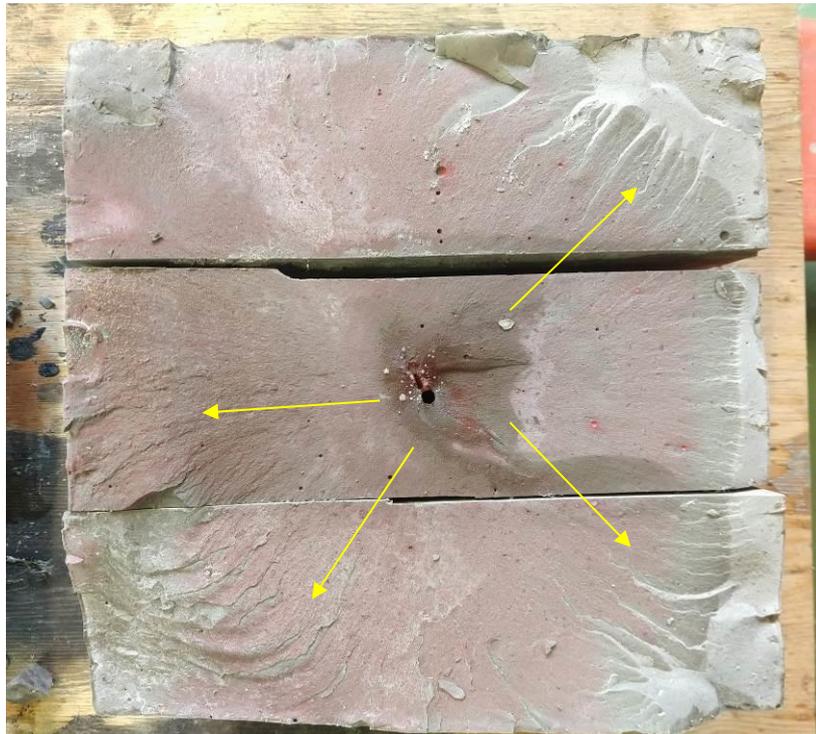


Fig. 15. Mitad frontal del bloque de cemento sin el caño. Las flechas amarillas indican un vetado que se extiende radialmente sobre la superficie de fractura desde el centro.

La propagación de fractura teórica buscada en estas circunstancias es de forma circular plana (disco) con su centro en el punto de inyección. Por la coloración remanente en los trozos del bloque, se puede ver que el inicio de la fractura tuvo esa tendencia, y luego el fluido ha escogido caminos preferenciales al continuar con la inyección. Las secciones que no mantienen el color rosado han sido por la llamada fractura en seco, que hace referencia a la propagación de esta sin entrar en contacto con el fluido, o bien por efecto de la apertura de ambas mitades usando el martillo.



Fig. 16. Detalle del conducto capilar en la muestra generado por la tanza.

7. CONCLUSIONES

Hemos encontrado que, para realizar los ensayos preparados para el estudio de la fractura hidráulica en rocas, el yeso comercial no es un buen material de trabajo. Es un material demasiado permeable y para los caudales de inyección que se definieron para dichos ensayos no es efectivo, aun utilizando fluidos altamente viscosos no se aprecia un aumento significativo de presión, sin mencionar que el volumen total de fluido

inyectado es elevado. La adherencia del caño con el yeso también fue un inconveniente.

Para esto se decidió cambiar de material y utilizar cemento, el cual permitió trabajar con fluidos de menor viscosidad con caudales acordes a los requeridos y la adherencia del caño con este material fue lo suficiente para permitir el aumento de presión dentro de la muestra.

Fue necesario conseguir un colorante soluble en aceite para poder visualizar, en el plano de fractura, la dispersión del fluido dentro de la muestra.

El ensayo exitoso dio como resultado una fractura en el plano perpendicular al eje del caño de acero inoxidable, con una propagación radial del fluido desde el punto de inyección, la cual se puede visualizar con el colorante rojo disuelto en el aceite.

8. ANEXOS

Torques de ajuste para espárragos y bulones

Diam. Nominal	Paso (mm)	Carga en el límite elástico (N) Resistencias según DIN				Precarga (N) Resistencias según DIN				Torque de Ajuste (Nm) (K = 0.15) Resistencias según DIN			
		5.6	8.8	10.9	12.9	5.6	8.8	10.9	12.9	5.6	8.8	10.9	12.9
M12	1,75	24794	52871	74480	89180	18596	39690	55860	66885	33	71	101	120
M14	2	33810	72030	101430	121520	25358	54023	76073	91140	53	113	160	191
M16	2	46158	98000	138180	166600	34619	73500	103635	124950	83	176	249	300
M18	2,5	56448	120540	169540	202860	42336	90405	127155	152145	114	244	343	411
M20	2,5	72030	153860	215600	259700	54023	115395	161700	194775	162	346	485	584
M22	2,5	89082	190120	267540	320460	66812	142590	200655	240345	220	471	662	793
M24	3	103782	221480	311640	353780	77837	166110	233730	265335	280	598	841	955
M27	3	134946	288120	404740	486080	101210	216090	303555	364560	410	875	1229	1476
M30	3,5	164934	351820	494900	593880	123701	263865	371175	445410	557	1187	1670	2004
M33	3,5	204036	435277	612108	734530	153027	326458	459081	550897	757	1616	2272	2727
M36	4	240198	512422	720594	864713	180149	384317	540446	648535	973	2075	2918	3502
M39	4	286944	612147	860832	1032998	215208	459110	645624	774749	1259	2686	3777	4532
M42	4,5	328398	700582	985194	1182233	246299	525437	738896	886675	1552	3310	4655	5586
M45	4,5	382788	816614	1148364	1378037	287091	612461	861273	1033528	1938	4134	5814	6976
M48	5	431886	921357	1295658	1554790	323915	691018	971744	1166092	2332	4975	6997	8396

Diam. Nominal	Tipo de rosca	Carga en el límite elástico (N)				Precarga (N)				Torque de Ajuste (Nm) (K = 0.15)			
		B7M L7M	A 325 Gr. 5	B7 B 16 L7	A 490 Gr. 8	B7M L7M	A 325 Gr. 5	B7 B 16 L7	A 490 Gr. 8	B7M L7M	A 325 Gr. 5	B7 B 16 L7	A 490 Gr. 8
1/2"	13 UNC	50215	58016	65818	82048	37661	43512	49363	61536	72	83	94	117
9/16"	12 UNC	64210	74185	84160	104914	48157	55639	63120	78685	103	119	135	169
5/8"	11 UNC	80125	92573	105021	130918	60094	69430	78766	98189	143	166	188	234
3/4"	10 UNC	117992	136323	154654	192791	88494	102242	115990	144593	253	292	331	413
7/8"	9 UNC	163542	188950	214357	267217	122657	141712	160768	200412	409	472	536	668
1"	8 UNC	214581	247917	281254	350610	160936	185938	210941	262957	613	708	804	1002
1 1/8"	8 UN	279888	284886	366853	457317	209916	213665	275140	342988	900	916	1180	1470
1 1/4"	8 UN	353976	360297	463961	578372	265482	270223	347971	433779	1266	1289	1660	2069
1 3/8"	8 UN	436296	444087	571859	712877	327222	333065	428895	534657	1713	1744	2245	2799
1 1/2"	8 UN	527946	537373	691986	862625	395959	403030	518989	646969	2263	2303	2966	3697
1 5/8"	8 UN	628376	639597	823621	1026722	471282	479698	617716	770041	2918	2970	3825	4768
1 3/4"	8 UN	737038	750200	966047	1204268	552779	562650	724535	903201	3686	3751	4831	6022
1 7/8"	8 UN	854482	869740	1119981	1396162	640861	652305	839986	1047121	4576	4657	5997	7476
2"	8 UN	981254	998777	1286144	1603300	735941	749083	964608	1202475	5608	5708	7350	9163

Notas:

"K" es el factor de torque, depende del coeficiente de rozamiento, pero no es igual al mismo.

Tabla confeccionada con K=0,15 correspondiente a espárragos y tuercas limpios y con una capa de aceite protector.

Para elementos con ligera oxidación o suciedad se toma K=0,20, y para elementos secos sin revestimiento se asume K=0,18. Para elementos galvanizados en forma electrolítica o similar tomamos K=0,15 (ver página 14).

Precarga:

Es la carga de ajuste inicial, habiéndose considerado un 75% de la carga en el límite elástico.

Equivalencias: 1 Kg.= 9,8 N

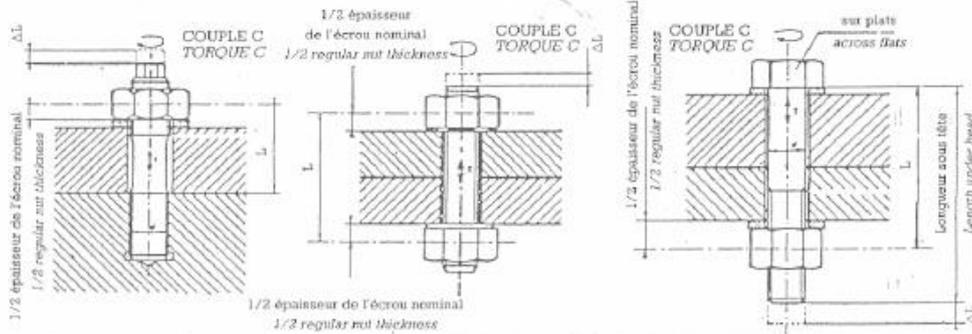
Los valores de torque consignados son indicativos, pudiendo variar según las condiciones particulares de cada aplicación.

9

Como complemento se adjunta el cálculo analítico del torque para burlonería.

CALCUL DU COUPLE DE SERRAGE POUR BOULONNERIE DE DIAMETRE EXTERIEUR d =

TIGHTENING TORQUE CALCULATION FOR BOLT OF EXTERNAL DIAMETER d =



- d = Diamètre nominal en m / Nominal diameter in m
- P = Charge du boulon en daN / Bolt design load in daN
- C = Couple de serrage en m daN / Tightening torque in m daN
- par = h = Pas du filetage en m / Thread pitch in m
- f = Coefficient de frottement de filetage / Thread friction coefficient
- f' = Coefficient de la face d'appui / Bearing surface friction coefficient
- r = Rayon moyen de filetage en m / Thread average radius in m
- r' = Rayon de la surface d'appui en m / Bearing surface radius in m
- cosβ = Cos de 1/2 angle au sommet du filetage (0,866 pour ISO) / 1/2 angle Cos at top of thread (0,866 for ISO)
- S = Section à force de filet du boulon en mm² / Section at minor diameter in mm²
- T = Contrainte du boulon en kbar / Bolt stress in kbar
- a = Largeur de l'écrou en m / Nut width across flats in m
- H = Hauteur du filet en m / Thread height in m

$$C = P \left(\frac{h}{2\pi} + \frac{fr}{\cos\beta} + fr' \right)$$

Données Data

h = _____ s = _____
 P = _____ T = _____
 f = _____ a = _____
 f' = _____ d = _____
 r = _____ H = 0,866h = 0,866 x _____
 cosβ = _____

$$r = \frac{d - 3H}{8} = \frac{d - 3x}{8} = \dots = \dots$$

$$r' = \frac{a + d}{2} = \frac{\dots + \dots}{2} = \dots = \dots$$

$$C = \left(\frac{\dots}{2\pi} + \frac{\dots}{\cos\beta} + \dots \right) = \dots$$

$$C = \left(\dots + \dots + \dots \right) = \dots$$

$$C = x = \dots = \dots \text{ mdaN}$$

CALCUL DE L'ALLONGEMENT DU FUT

BODY ELONGATION CALCULATION

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E} \times \frac{P}{S}$$

$$\Delta L = L \times \frac{T}{E}$$

- L = Longueur à demi-écrou / Length at 1/2 nut thickness
- E = Module d'élasticité = (20.000 en général) / Young modul (20000 generally)

$$\Delta L = \left(\dots \right) \times \left(\frac{\dots}{20000} \right) = \dots \text{ mm}$$



