COMPATIBILIDADES E INTERACCIONES

Sección B7

Compatibilidad con elastómeros

B7.1 Introducción 2

B7.2 Recomendaciones generales 2

B7.3 Pruebas con elastómeros – resultados detallados 3

B7.3.1 Pruebas en Westport 3
B7.3.2 Pruebas informadas por Shell 4
B7.3.3 Pruebas de Baker Oil Tools 4
B7.3.4 Pruebas de MERL de ETP de Viton® y Grafoil® 5
B7.3.5 Pruebas de Halliburton 6
B7.3.6 Pruebas de Du Pont 6
B7.3.7 HNBR para turbinas Neyrfor 7
B7.3.8 Aflas® de Petroline Well-Systems 7
B7.3.9 Polymyte, Molythane y nitrilo Shaffer 7
B7.3.10 Nitrilo Cameron, CAMLAST™ y DUROCAM™ 7
B7.3.11 Pruebas de MERL para pozo HPHT en el Mar del Norte 8
B7.3.12 Pruebas de Westport de FEPM y FKM 8

Referencias 11

CABOT
creating what matters

Specialty Fluids

AVISO Y DESCARGO DE RESPONSABILIDAD. Los datos y las conclusiones que figuran en este documento se basan en trabajos que se consideran confiables; sin embargo, CABOT no puede garantizar y no garantiza que otros obtengan resultados y/o conclusiones similares. Esta información se proporciona para su conveniencia y a fines meramente informativos. No se otorga garantía alguna, ya sea expresa o tácita, en lo relativo a esta información, o cualquier producto al que se refiera. CABOT NO SE HACE RESPONSABLE DE GARANTÍA ALGUNA, EXPRESA O TÁCITA, YA SEA DE COMERCIALIZACIÓN O IDONEIDAD PARA UN PROPÓSITO PARTICULAR EN CUANTO A (i) LA INFORMACIÓN, (ii) CUALQUIER PRODUCTO O (iii) VIOLACIÓN DE PROPIEDAD INTELECTUAL. Por el presente documento, CABOT no se hace responsable ni acepta responsabilidad alguna, en ningún caso, en caso de daños de cualquier tipo en relación con el uso o la fiabilidad de esta información o de cualquier producto con el que se encuentre relacionada.

© 2007 Cabot Corporation, M. A. - EE. UU. Todos los derechos reservados. CABOT es una marca comercial registrada de Cabot Corporation.

B7.1 Introducción

Cada tipo de fluido para perforación y terminación usado en un pozo debe ser compatible con el elastómero y los sellos utilizados en la herramienta de perforación y en el equipamiento de superficie. Las incompatibilidades entre el fluido y los elastómeros pueden dar como resultado viajes para reparar el equipamiento, fugas y fallas catastróficas del equipamiento de seguridad.

B7.2 Recomendaciones generales

Los resultados obtenidos en una variedad de pruebas indican que los elastómeros comunes se comportan según lo especificado por el fabricante cuando se exponen a salmueras de formiato. Las salmueras de formiato se amortiguan para mantener un pH alcalino durante su empleo en el campo. Algunos elastómeros no son compatibles con los fluidos alcalinos. El NBR (nitrilo) y el FKM (Viton®) son ejemplos de ello. Ninguno de estos elastómeros es compatible con los fluidos alcalinos, especialmente a altas temperaturas. La baja tolerancia del FKM (Viton®) a fluidos con elevado pH se debe a la presencia de fluoruro de vinilideno. No obstante, es importante tener presente, que aunque el contacto con la salmuera endurece tanto al NBR como al KFM cuando se mide a temperaturas ambiente, el elastómero se pondrá menos rígido a temperaturas de servicio.

Para mejorar la resistencia, Du Pont desarrolló el FKM resistente, ETP de Viton®, en el cual el fluoruro de vinilideno se sustituye por una olefina. El ETP de Viton® muestra un buen desempeño con las salmueras de formiato. Sin embargo, habría que estar alerta con respecto a algunas posibles incompatibilidades a temperaturas más altas si este elastómero se rellena con humo de sílice.

Aunque el NBR se considera inadmisible para el servicio con salmueras de formiato a temperaturas por encima de los 120°C/248°F durante períodos prolongados, el HNBR (nitrilo hidrogenado) posee mayores niveles de resistencia química y térmica que el NBR y trabaja satisfactoriamente a temperaturas mucho más altas.

La Tabla 1 brinda pautas generales del desempeño de los elastómeros en salmueras de formiato. Cuando se utiliza esta tabla, hay que tener presente que estas pautas se basan en una cantidad limitada de pruebas realizadas bajo un conjunto limitado de condiciones de pruebas. En la Sección B7.3, se brindan descripciones detalladas de las pruebas en las que se basan estas pautas.

Es difícil juzgar el desempeño en el servicio tomando

Tabla 1 Pautas rápidas acerca del comportamiento de elastómeros en salmueras de formiato. Estas pautas están basadas en pruebas donde los formiatos han mostrado compatibilidad con el elastómero. Las descripciones detalladas de estas y otras pruebas se presentan en otra parte.

Tipo de elastómero*	Condiciones de la prueba			Recomendado	Comentarios
	Temp.		Tiempo		
	°C	°F			
FEPM (Aflas®) (TFE/P)	204	400	7 días	✔	
	175	347	8 semanas		
FFKM (Kalrez® Chemraz®)	191	375	7 días	✔	
EPDM	120	248	8 semanas	✔	Quebradizo a temperaturas mayores
NBR	120	248	8 semanas	!	Comportamiento depende del pH y de la temperatura
HNBR	191	375	7 días	✔	
	175	347	8 semanas	✔	
FKM (Viton®)	120	248	8 semanas	!	Comportamiento depende del pH, de la temperatura y del tiempo de exposición.
FKM de base resistente (Viton® ETP)**	163	325	3 semanas	✔	Comportamiento variable en las temperaturas de prueba más altas. El relleno con humo de sílice podría causar incompatibilidad a temperaturas mayores.
	170	338	8 días		
	177	350	4 semanas		
	200	392	7 días		
PEEK	180	356	7 días	✔	
Grafoil®	170	338	8 días	✔	

Se han utilizado las siguientes pautas de aceptación:
Cambios de <15% de volumen (o dureza)
Cambios <35% de resistencia a la tracción (o de elongación).

* Tipo de elastómero – se relaciona con todo este grupo de elastómeros.
** También expresado como FEPM por ASTM D140, aunque su estructura y sus perfiles de propiedades físicas y químicas son significativamente diferentes.

como referencia pruebas de laboratorio. Las pruebas de laboratorio se realizan frecuentemente sobre elastómeros en forma de anillos tóricos o de láminas totalmente inmersos en el fluido. En condiciones de servicio, el fluido puede entrar en contacto con frecuencia solamente con una pequeña porción del sello.

El FEPM (Aflas®), FFKM (Kalrez®, Chemraz®), los fluoroelastómeros de base resistente, el FFKM, el HNBR y el PEEK® parecen ser buenos materiales de sellado en salmueras de formiato a altas temperaturas. Si hay alguna duda con respecto al desempeño de un elastómero específico en un conjunto particular de condiciones, siempre se recomienda realizar pruebas bajo las condiciones de campo específicas.

Durante los ocho años en los que se ha utilizado el formiato de cesio en operaciones de construcción de pozos HPHT, nunca ha habido una falla de los elastómeros causada por la exposición a salmueras o mezclas de formiato de cesio.

B7.3 Pruebas con elastómeros – resultados detallados

Varias empresas han realizado extensos estudios sobre elastómeros comunes en los yacimientos petrolíferos expuestos a salmueras de formiato. Además, algunas pruebas se han realizado según lo solicitado por los operadores para elastómeros y herramientas específicas.

Hay que prestar atención al hecho de que la resistencia a la tracción y las elongaciones por la tensión son propiedades de fallas que exhiben típicamente una gran cantidad de dispersión de datos (+/- 20%). Por lo tanto, cualquiera de estas propiedades halladas luego de las pruebas que varían hasta un +/- 20% pueden ser simplemente ruido en los datos de prueba.

B7.3.1 Pruebas en Westport

Westport Technology Center International probó la compatibilidad de una variedad de elastómeros utilizados comúnmente con salmuera de formiato de cesio [1]. Las pruebas se ejecutaron durante siete días en un autoclave Hastalloy bajo tres grupos de condiciones de temperatura/presión:

1. 191°C/375°F, presión atmosférica
2. 177°C/350°F y 5,000 psi
3. 200°C/392°F y 15,000 psi

La salmuera de formiato de cesio se amortiguó hasta un pH de 10.

Tabla 2 Resultados de las pruebas efectuadas sobre elastómeros después de siete días de exposición a un formiato de cesio amortiguado. Las pruebas fueron realizadas por Westport a 191°C/375°F [1].

Tipo	Muestra	Temperatura		Días	Cambio en la muestra después de la prueba [%]					Aspecto
		°C	°F		Vol.	Peso	Dureza	Res. Trac.	Elon.	
Aflas®	GT-799-08	191	375	7	-7.4	-0.4	0.0	21.3	-16.6	Bien
	GT-790-10	191	375	7	-2.3	0.9	-4.2	28.2	-21.5	Bien
	PARCO-2902	191	375	7	1.2	0.3	-5.1	-7.0	1.9	Bien
	Baker-7116	191	375	7	0.2	0.1	1.2	-2.2	-3.0	Bien
Viton®	GT-926-08	191	375	7	12.4	1.3	--	--	--	Frágil
	Baker-9009	191	375	7	5.9	0.6	--	--	--	Frágil
Chemraz®	GT-5220062	191	375	7	-5.7	0.2	0.0	7.2	17.4	Bien
	GT-5100130	191	375	7	-1.7	1.7	0.0	2.7	12.4	Bien
Kalrez®	PARCO-3018	191	375	7	0.4	0.3	0.0	-18.7	-24.0	Bien
	PARCO-1050*	191	375	7	--	0.3	--	--	--	Bien
HNBR	Baker-2013	191	375	7	3.1	3.8	11.1	-7.7	-32.3	Bien
Viton®	Baker-9009	191	375	7	5.9	0.6	--	--	--	Frágil
NBR	Baker-4177	191	375	7	-5.1	-2.3	7.1	-21.8	-45.9	Bien
ETP	Baker #1	149	300	7	1.1	No efectuada	-2.0	-34.0	-23.0	Bien
	Baker #1	200	392	7	1.7	No efectuada	-1.0	-63.0	-45.0	--
	Baker #2	149	300	7	0.8	No efectuada	-2.0	-10.0	-17.0	Bien
	Baker #2	200	392	7	1.5	No efectuada	-4.0	-19.0	-27.0	--
	Baker #3	149	300	7	3.9	No efectuada	0.0	-17.0	2.0	Bien
	Baker #3	200	392	7	6.6	No efectuada	-10.0	59.0	23.0	--
	Baker #4	149	300	7	5.0	No efectuada	-2.0	-2.0	-40.0	Bien
	Baker #4	200	392	7	8.6	No efectuada	-2.0	-34.0	-41.0	--

* Muestra de anillo tórico en vez de una probeta cilíndrica.
GT = Greene, Tweed & Co.

Tabla 3 Pruebas de elastómeros informada por Shell [2]. Los elastómeros se expusieron a una salmuera de formiato de potasio concentrada no amortiguada durante siete días y ocho semanas y a una salmuera de formiato de cesio concentrada no amortiguada durante siete días. El formiato de cesio se probó a un pH=12.6 (sin diluir) (> condiciones de campo reales) y el formiato de potasio se probó a un pH 10.5 (sin diluir).

Tipo	Especificación	Tipo de salmuera	Temp. de prueba		Cambio en la muestra después de la prueba [%]					
					Espesor		Peso		Dureza*	
			°C	°F	7d	8s	7d	8s	7d	8s
Aflas® (FCM/FEPM)	Aflas® 790	KFo	120	248	-1.2	+0.2	0	+0.7	+1.1	0
			175	347	+0.4	+0.3	+1.2	+2.5	-1.1	-2.1
	Aflas® 7182B	KFo	120	248	-1.1	+0.1	0	-0.6	0	+1.1
			175	347	-0.5	-0.7	+6.3	-0.1	+1.1	+1.1
	?	CsFo	180	356	0.4		-0.5		-0.2	
CR	Neopreno 7065	KFo	120	248	+0.1	+1.2	0	+0.8	0	+1.1
EPDM	EPDM 7204	KFo	120	248	-2.1	+0.1	0	-0.1	-10.6	-1.2
			175	347	-0.4	-0.5	+0.3	+0.1	+5.7	+6.9[b]
	EPDM 5778-90	KFo	120	248	-1.8	0	0	+1.0	+10.7	0
NBR[1]	Nitrilo 4058-90	KFo	120	248	-2.1	+0.3	0	+2.3	+4.5	+10.5
HNBR[1]	HNBR 2269	KFo	120	248	-2.2	+0.3	0	+1.4	-1.1	+1.1
	Carboxil. HNBR 2311-90	KFo	120	248	-1.4	+0.3	0	+3.7	+11.5	+4.4
			175	347	-1.3	-7.2	+15.5	+11.6	0	+6.5
	Carboxil. NBR 2067-90	KFo	120	248	-2.2	+0.4	0	+2.2	0	+3.5
FKM ('Viton®')[2]	Fluorel 71481	KFo	120	248	+2.7	-0.1	0	+0.7	0	+1.1
			175	347	+0.2	-6.2	-26.6	-12.0	-1.6	+2.6[w]
	Viton® TC 1220-11	KFo	120	248	+2.3	+0.8	0	0	-2.1	+1.1
			175	347	+1.0	-2.9	-0.3	-7.0	-1.6	+2.1[w]
	Viton® TC 1220-12	KFo	120	248	-0.2	+0.8	0	+2.7	-3.1	+3.3
			175	347	+4.0	+29.0	+15.9	+28.7	-1.1[b]	-13.7
	Viton® 9062-95	KFo	120	248	+0.2	+0.3	0	+2.5	-2.1	+2.2[b]
			175	347	+0.6	+1.7	-1.4	-20.9	0[w]	+1.1[w]
	?	CsFo	180	356	x)		x)		x)	
PEEK®	PEEK®/relleno de vidrio	CsFo	180	356	1.0[c]		-0.3		6.2[3]	
Kalrez® (FFKM)	?	CsFo	180	356	0.3		0.4		0.3	

* La medición de la dureza fue difícil de realizar debido a la forma del elastómero y los resultados deben tomarse como indicaciones más que como valores absolutos.

[b] frágil, [w] débil, [c] cambio en el área de la sección transversal, [d] depósitos cristalinos persistentes, [x] deterioro catastrófico.

1) El HNBR y el NBR no pueden usarse en $CaBr_2$ ni en $ZnBr_2$ ya que se endurecen debido a los enlaces covalentes. Tomando como base estos resultados, tales enlaces covalentes no parecen ocurrir en las salmueras de formato monovalente.

2) Los FKM (fluorocarbonos) son atacados con frecuencia por soluciones alcalinas (pH>10), lo cual puede explicar el mal comportamiento en las salmueras de formiato concentradas (pH ~ 10.5).

3) Formación de depósitos cristalinos persistentes.

La mayoría de los elastómeros probados se comportaron satisfactoriamente, con la excepción de los Viton (GT-926-08 y Baker-9009), los cuales se probaron por encima de sus límites recomendados de pH. Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 2.

B7.3.2 Pruebas informadas por Shell

Shell Research ha informado de pruebas de compatibilidad con elastómeros en salmueras de formiato de cesio y potasio [2]. Las pruebas fueron realizadas para Shell Research por MERL del Reino Unido y por Halliburton Energy Services de Dallas, Texas. Algunas de estas pruebas se hicieron a temperaturas más elevadas que las recomendadas por el fabricante del elastómero. En la Tabla 3, se muestran los resultados de las pruebas realizadas en el intervalo de temperaturas correcto. Tomando como base estos resultados, se concluyó que las salmueras de formiato son incompatibles con los Viton debido a las limitaciones de este elastómero con el pH. Los otros elastómeros que se probaron se comportaron satisfactoriamente.

B7.3.3 Pruebas de Baker Oil Tools

Baker Oil Tools incluyó la salmuera de formiato de cesio en un programa de ensayos donde se probaron nueve elastómeros diferentes para determinar su compatibilidad con cinco fluidos diferentes [3]. Los elastómeros incluidos en estas

Tabla 4 Resultados de las pruebas efectuadas sobre elastómeros después de siete días de exposición a una salmuera de formiato de cesio amortiguada. Las pruebas fueron realizadas por Baker Oil Tools [3]. Las pruebas a 150°C/302°F se realizaron a 34 MPa/5,000 psi y pruebas a 200°C/392°F a 15,000 psi.

	Temperatura		Trac-ción	Elong.	25% del módulo	50% del módulo	Cambio de dureza	Volumen de hincha-miento	Dureza del hinchamiento después de 4 horas		Dureza del hinchamiento después de 24 horas	
	°C	°F	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]		[%]		[%]
NBR	150	302	-7	-57	132	121	3	-5	0	-0.9	0	-1.4
HNBR	150	302	-5	-8	-10	-11	1	1.0	2	0.0	2	0.1
	200	392	Rota en el agarre						0	0.0	0	-7
FKM (Viton®)	150	302	-51	-53	-22	-10	4	6.2	1	-0.3	1	0.2
	200	392	Rota en el agarre						0	4.4	1	3.9
FEPM (Aflas®)	150	302	9	-1	-42	-13	-1	3.4	0	-0.2	0	0.4
	200	392	-10	-22	112	53	4	3.8	-3	3.8	-3	2.7
FFKM (Kalrez®)	150	302	-66	-57	-2	8	-0	2.0	1	0.0	1	0.0
	200	392	-64	-15	-95	-81	-6	6.9	0	1.0	1	2.8
ETP 1	150	302	-34	-23	-46	-9	-2	1.1	1	0.7	1	0.5
	200	392	-63	-45	-43	-20	-1	1.7	-2	-1	-1	0.4
ETP 2	150	302	-10	-17	-15	5	-2	0.8	1	0.2	1	0.3
	200	392	-19	-27	-48	17	-4	1.5	1	1	0	-4.8
ETP 3	150	302	-17	2	-24	-7	0	3.9	-3	-0.1	-3	1.1
	200	392	59	23	-28	5	-10	6.6	0	5.8	-6	7.3
ETP 4	150	302	-2	-40	6	38	-2	5.0	1	1.0	1	0.9
	200	392	-34	-41	-15	-9	-2	8.6	1	4.7	-1	3.0

pruebas fueron el nitrilo (NBR), un nitrilo hidrogenado o HNBR, un fluoroelastómero FKM de cura incorporada (Viton®E60C), un FEPM (Aflas®), un FFKM (Kalrez®) y cuatro compuestos diferentes de Viton® Extreme ETP. Los elastómeros fueron expuestos durante siete días a dos temperaturas, 150°C/302°F y 200°C/392°F, separados del NBR que se probó solamente a 150°C/302°F. Las pruebas a alta temperatura se realizaron a 103 MPa/15,000 psi y las de baja temperatura a 34 MPa/5,000 psi. Las muestras de las pruebas de hinchamiento se retiraron de la celda de prueba después de cuatro y 24 horas para averiguar los efectos a corto plazo del fluido sobre los elastómeros. Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 4. Como puede verse, el FFKM (Kalrez®) tuvo cambios significativos en su resistencia mecánica. Esto no está a tono con otras pruebas realizadas a este elastómero. Es lo mismo para el NBR a 150°C/302°F. De nuevo, el FKM (Viton®) se probó fuera del intervalo de pH recomendado por los proveedores y, por lo tanto, sufrió cambios sustanciales de sus propiedades a 150°C/302°F.

B7.3.4 Pruebas de MERL de ETP de Viton® y Grafoil®

Se expusieron muestras del elastómero Viton® Extreme 90 (ETP de Viton®) y de Grafoil® a una salmuera de formiato de cesio y potasio mezclados durante ocho días a 170°C/338°F [4]. Las pruebas fueron realizadas por MERL para Cabot Specialty Fluids.

Viton® Extreme 90

Se troquelaron veinte muestras elásticas de una lámina moldeada de Viton® Extreme 90. Dos grupos de cinco muestras se pesaron juntas en aire y en agua para medir la masa y el volumen iniciales de las barras. Los cambios de masa y de volumen se midieron regularmente durante el período de exposición. Al final del período de exposición, se probó un grupo de cinco muestras a temperatura ambiente y a 6°C/43°F. Para todas las muestras, se midieron diferencias muy pequeñas de las propiedades entre las muestras envejecidas y sin envejecer, lo que sugiere una influencia despreciable de la salmuera de formiato en las propiedades mecánicas de estos materiales. Los cambios de masa (<0.15%) como una función del tiempo se muestran en la Tabla 5, junto con los cambios de volumen, los cuales están también dentro de los límites aceptables para los elastómeros de sellado. Los resultados de las mediciones de tracción aparecen en la Tabla 6. Todas las propiedades mostraron cambios muy pequeños como resultado de la exposición. En resumen, el Viton® Extreme es resistente a la salmuera de formiato bajo las condiciones de exposición empleadas y no hay evidencias que sugieran que una inmersión a más largo plazo alteraría significativamente este resultado.

Grafoil®

Se cortaron dos muestras cilíndricas de Grafoil® horizontalmente al medio para obtener cuatro muestras de igual tamaño. Las muestras se pesaron en el aire y en el agua para determinar la masa y el volumen iniciales de los cilindros. Una mitad de cada muestra se utilizó para la prueba de exposición. Los cambios de masa y de volumen se midieron regularmente durante el período de exposición. Al final del período de exposición, las cuatro muestras se sometieron a ensayos de compresión a temperatura ambiente a 1 mm/min. Se midieron el Módulo al 5% y 10%, a máxima carga, la elongación a máxima carga y la resistencia a la compresión. Durante la exposición, una de las muestras se desenrolló y la otra no lo hizo. Los resultados de la prueba para las muestras que se desenrollaron y para las que no lo hicieron aparecen en la Tabla 5 y en la Tabla 7. Aunque se registraron grandes diferencias entre las variaciones de masa y el volumen de hinchamiento entre las muestras desenrolladas y enrolladas, hubo muy poca diferencia entre los especímenes envejecidos y sin envejecer en el estado enrollado y desenrollado, lo que sugiere que la salmuera de formiato no degrada significativamente el material.

B7.3.5 Prueba de Halliburton

Halliburton Energy Services llevó a cabo un estudio acerca del efecto de las salmueras de terminación sobre los elastómeros [5]. Este incluyó pruebas de compatibilidad de tres elastómeros: FKM (Viton®), TFE/P, y ETP en una salmuera de formiato de mezcla de cesio y potasio de 1.86 g.e./15.5 ppg amortiguada con pH = 9. Los elastómeros con temperaturas nominales de hasta 204°C/400°F fueron probados a 163°C/325°F y 193°C/380°F. Los elastómeros fueron expuestos a la salmuera de formiato durante tres semanas y probados después de 24 horas, 48 horas, una semana, dos semanas y tres semanas. Las pruebas incluyeron dureza, espesor y propiedades elásticas ASTM D412 (TB, EB, M50, M100). Este estudio concluyó que el FKM (Viton®) es incompatible con las salmueras de formiato alcalinas debido a sus limitaciones con el pH. Se encontró que el desempeño del ETP y del TFE/P era mixto y altamente dependiente de la temperatura de la prueba. Se descubrió que los cambios de dureza eran menores del 1.1% en todas las condiciones. Se desconoce si los elastómeros ETP contenían humo de sílice (consulte la sección B7.3.6). Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 8.

B7.3.6 Pruebas de Du Pont

Du Pont incluyó una salmuera de formiato de cesio y potasio en un reciente estudio sobre la compatibilidad entre fluoroelastómeros de alto desempeño y algunos fluidos de yacimiento HPHT [6]. Los elastómeros que se probaron son el Viton® A-HV (A40-06), el Viton® GF-S (A40-04), el Viton® ETP-S (A40-01) y el Viton® ETP-S con Si (A40-02). La prueba se efectuó mediante la inmersión de probetas en forma de mancuernas en el fluido dentro de un recipiente Parr sellado durante cuatro semanas a temperaturas elevadas (150°C/302°F y 177°C/350°F) y una presión autógena permitiendo que el recipiente se enfriara antes de su apertura. Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 9. Los resultados indican, como se esperaba, que el fluorelastómetro FKM estándar Viton® A-HV

Tabla 5 Mediciones de variaciones de masa y del volumen debido al hinchamiento después de la exposición a una salmuera de formiato de cesio y potasio amortiguada a 170°C/338°F. La prueba fue realizada por MERL [4].

	Cambio de masa		Cambio de volumen	
	Temperatura ambiente	6°C/42.8°F	Temperatura ambiente	6°C/42.8°F
	[%]	[%]	[%]	[%]
Viton® Extreme 90				
4.75 horas	0.17	0.14	0.11	0.05
6.75 horas	0.31	0.23	0.11	0.87
9.75 horas	0.29	0.26	0.27	0.30
13.75 horas	0.12	0.20	-0.21	0.40
Grafoil® (muestra que no se desenrolló)				
4.75 horas	6.16		3.08	
6.75 horas	7.09		3.16	
9.75 horas	6.11		4.54	
13.75 horas	5.84		3.16	
Grafoil® (muestra que se desenrolló)				
4.75 horas	30.56		4.17	
6.75 horas	32.52		6.73	
9.75 horas	32.30		9.36	
13.75 horas	33.72		9.58	

se puso quebradizo ante la exposición a la salmuera de formiato debido a su falta de compatibilidad con fluidos alcalinos. El FKM Viton® GF-S de alto contenido de flúor y curado con peróxido, sufrió una elevada pérdida de elasticidad y elongación con una modesta pérdida de módulo. También se volvió quebradizo a la temperatura más elevada. Esto también se esperaba, ya que la química del curado con peróxido le otorga mejor resistencia al ácido y no se esperaría, por lo tanto, que mejorara su compatibilidad con fluidos alcalinos. Ambas muestras de FKM (Viton® EPT-S) resistentes a las bases se comportaron bien a la temperatura inferior y la muestra con negro de humo también se comportó satisfactoriamente a la temperatura superior. Se concluye que Viton® ETP es totalmente compatible con las salmueras de formiato, pero habría que estar alerta con respecto a algunas incompatibilidades a temperaturas más altas si este elastómero está relleno con humo de sílice.

B7.3.7 HNBR para turbinas Neyrfor

Se expusieron dos muestras alternativas del elastómero HNBR (HN1662-1 y HN-1662-2) utilizado en turbinas Neyrfor a una salmuera de formiato de cesio amortiguada durante tres y siete días a 152°C/305°F. Las pruebas se realizaron en Westport Technology Center International [7]. Los elastómeros se probaron para detectar cambios en el peso, el volumen, la dureza y el aspecto. Se concluyó que ambas muestras de elastómeros eran compatibles con el formiato de cesio bajo las condiciones de prueba (Tabla 10) y que no exhibieron ningún cambio en su aspecto.

B7.3.8 Aflas de Petroline Well-Systems®

Una muestra de Aflas® de Petroline Well-Systems se expuso a una salmuera de formiato de cesio amortiguada durante siete días a 204°C/400°F y se probó su compatibilidad. Las pruebas se efectuaron en Westport Technology Center International [8]. La Tabla 11 muestra los cambios medidos en volumen, peso y dureza. El elastómero no exhibió ningún cambio significativo en las propiedades medidas ni en su aspecto, por lo que se concluyó que era compatible con la salmuera de formiatos.

B7.3.9 Polymyte, Molythane y nitrilo Shaffer

Se probaron dos elastómeros (Polymyte y Molythane) y cinco cauchos de nitrilo Shaffer para determinar su compatibilidad con la salmuera de formiato de cesio. Estos elastómeros son elementos del preventor de reventones (BOP) de Shaffer-Varco. Los elastómeros se expusieron a la salmuera de formiato de cesio amortiguada (1.92 g.e./16 ppg) a 93°C/200°F durante 48 horas y siete días [9]. Los cambios en volumen, peso, dureza y aspecto se muestran en la Tabla 12. Todos los elastómeros probados parecen ser compatibles con la salmueras de formiato bajo las condiciones de las pruebas.

B7.3.10 Nitrilo de Cameron, CAMLAST™ y DUROCAM™

Se probaron tres elastómeros de Cameron para determinar su compatibilidad con la salmuera de formiato de cesio. Los elastómeros se probaron después de una exposición de siete días a una salmuera de formiato de cesio amortiguada (pH = 10), 1.7 g.e./14.2 ppg a 100°C/212°F y 121°C/250°F).

Tabla 6 Datos de tracción para muestras envejecidas y sin envejecer de Viton® Extreme 90 después de ocho días de exposición a una salmuera de formiato de cesio y potasio a 170°C/338°F. La prueba se efectuó en MERL [4].

N.º	Espesor	Ancho	Área	Longitud de la galga	Mod. al 50%	Elongación al romperse	Resistencia a la tracción
	[mm]	[mm]	[mm²]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
Sin envejecer a temperatura ambiente							
2	2.16	3.93	8.4888	22.67	10.89	98.26	20.44
2	2.16	3.96	8.5536	21.57	10.35	105.94	20.12
3	2.17	3.96	8.5932	21.99	9.63	84.7	16.4
Sin envejecer a 6°C/43°F							
1	2.16	3.94	8.5104	19.67	16.61	101.58	27.28
2	2.07	3.95	8.1765	19.95	16.51	74.6	22.69
3	2.16	3.98	8.5968	21.24	16.47	83.71	24.15
Envejecido en salmuera probado a temperatura ambiente							
1	2.14	3.93	8.4102	20.89	9.9	114.94	20.93
2	2.18	3.96	8.6328	22.08	8.82	121.76	20.22
3	2.16	3.97	8.5752	21.24	10.68	102.72	20.17
Envejecido en salmuera – probado a 6°C							
1	2.16	3.97	8.5752	20.71	15.85	92.44	24.93
2	2.17	3.99	8.6583	20.82	15.99	89.75	24.95
3	2.17	3.93	8.5281	21.29	16.53	86.28	24.84

Los materiales elastoméricos de Cameron evaluados fueron los compuestos elastoméricos de nitrilo utilizados en la fabricación de empaquetaduras para arietes/sellos superiores, empaquetaduras VBR, empaquetaduras anulares/anillos toroidales y elastómeros CAMLAST™ y DUROCAM™ usados en empaquetaduras para arietes/sellos superiores resistentes a las altas temperaturas/H_2S y en empaquetaduras para el extremo ciego de los arietes de cizallamiento y de la hoja.

Los resultados de las pruebas de compatibilidad de los elastómeros de nitrilo, el CAMLAST™ y el DUROCAM™ de Cameron indicaron mínimos efectos perjudiciales sobre los mismos durante la exposición de siete días [10].

B7.3.11 Pruebas de MERL para pozo HPHT en el Mar del Norte

Se acometió un programa limitado de pruebas por MERL para ayudar a aumentar la confianza en la selección de elastómeros para un pozo HPHT en el Mar del Norte [11]. Se expusieron cinco elastómeros a una salmuera de formiato de cesio/potasio amortiguada de 1.73 g.e./14.42 ppg a 185°C/365°F durante hasta nueve días. Los elastómeros probados fueron sellos fluoroelastómeros para cañones (V858-95), un par de anillos de asiento PEEK® (divididos) y secciones cortas sencillas de Aflas® y NBR. Las pruebas, cuyos resultados aparecen en la Tabla 13, confirman que el Viton® no es adecuado para estas condiciones específicas de pozos HPHT. La muestra de NBR, que se probó fuera de su límite de temperatura recomendado de 120°C/248°F, permaneció flexible durante el primer período de la prueba (aún flexible después de 37 horas), pero se endureció con el tiempo. Las muestras de PEEK® y de Aflas® se comportaron ambas muy bien. Fue el mismo caso con la muestra de ETP de Viton®, aunque una de las muestras se dividió, posiblemente durante la limpieza.

B7.3.12 Pruebas de Westport de FEPM y FKM

Se realizó una prueba de inmersión para tres sellos elastoméricos (CDI 904-90 FEPM, CDI 908 LS FKM, CDI 928 FKM) en una salmuera de formiato de cesio amortiguada (con una adición del 5% *KCl*) a 200°C/392°F durante 48 horas [12]. Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 14. Como puede verse, ninguna de las probetas cilíndricas exhibieron hinchamiento ni ganancia de peso significativos. Las tres muestras de CDI 904-90 FEPM se comportaron muy bien, mientras que la de CDI 908 LS FKM experimentó ampolladuras y agrietamientos severos.

Tabla 7 Datos de compresión para las muestras de Grafoil® envejecidas y sin envejecer después de ocho días de exposición a una salmuera de formiato de cesio y potasio amortiguada a 170°C/338°F. La prueba fue realizada por MERL [4].

N.º	DE	DI	Altura de la muestra	Mod. al 5%	Mod. al 10%	Máx. carga	Elongación en el punto de fluencia	Resistencia a la compresión
	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]
Desenrollada								
Sin envejecer	17.15	6.5	6.15	1.04	3.01	1,018	20.61	5.16
Envejecida	17.15	6.5	6.54	1.26	3.06	859	20.91	4.35
Enrollada								
Sin envejecer	17.15	6.5	7.36	2.32	6.13	1,500	16.26	7.6
Envejecida	17.15	6.5	6.52	1.16	5.14	1,444	13.92	7.31

Tabla 8 Resultados de las pruebas de elastómeros de Halliburton [5]. Los elastómeros fueron expuestos a una salmuera de formiato de cesio y potasio amortiguada durante una y tres semanas a dos temperaturas diferentes. Hubo un cambio de dureza inferior al 1.1% para las tres condiciones de temperatura/tiempo.

Elastómero	Temperatura		Cambio en la muestra después de la prueba [%]					
			Resistencia a la tracción		Elongación en el punto de ruptura		Módulo al 50%	
	[°C]	[°F]	1 semana	3 semanas	1 semana	3 semanas	1 semana	3 semanas
ETP	163	325	+7	+7	-11	-4	+18	+6
	193	380	-50	---	-67	---	+1	---
TFE/P	163	325	-2	~ 0	-9	-12	+4	+19
	193	380	-18	---	+16	---	-18	---

Tabla 9 Pruebas de Du Pont a fluoroelastómeros expuestos a una salmuera de formiato de cesio y potasio [6]. Los elastómeros fueron expuestos a la salmuera de formiato durante 28 días a 150°C/302°F y 177°C/350°F.

Tipo de elastómero		Temperatura		Dureza	Cambio de propiedades físicas			
					M50	Tb	Eb	Volumen
		[°C]	[°F]	[pts]	[%]	[%]	[%]	[%]
ETP-S	A40-01	150	302	0	11	11	8	0
		177	350	0	11	20	24	-1
ETPS con sílice	A40-02	150	302	1	26	4	-7	0
		177	350	1	29	-30	-58	0
GF-S	A40-04	150	302	-7	-6	-53	-44	-10
		177	350	-10	-100	-92	-83	-21
AHV	A40-0	150	302	-8	-100	-78	-82	-10
		177	350	-20	-100	-85	-92	-14

Tabla 10 Resultados de las pruebas efectuadas a HNBR para turbinas Neyrfor a 152°C/305°F después de tres y siete días de exposición a una salmuera de formiato de cesio amortiguada.

Muestra	Duración de la prueba	Cambio en la muestra después de la prueba [%]			Aspecto
		Peso	Volumen	Dureza	
HN1662-1	3 días	-0.1	-0.4	Sin cambios	Sin cambios
	1 semana	+0.6	-1.4	Sin cambios	Sin cambios
HN1662-2	3 días	0.0	-1.0	Sin cambios	Sin cambios
	1 semana	+0.1	-1.0	Sin cambios	Sin cambios

Tabla 11 Prueba de muestras de Aflas® de Petroline Well-Systems después de la exposición al formiato de cesio durante siete días a 204°C/400°F.

Muestra	Cambio en la muestra después de la prueba [%]					
	Peso	Volumen	Dureza	Resistencia a la tracción	Elongación	Aspecto
Aflas® 1	+0.2	-3.4	0	-12.3	-8.8	Sin cambios
Aflas® 2	+1.0	-0.5	0	-4.9	-0.4	Sin cambios
Aflas® 3	+1.4	-2.2	0	+5.6	+3.2	Sin cambios

Tabla 12 Pruebas de dos elastómeros Shaeffer y cinco cauchos de nitrilo expuestos a una salmuera de formiato de cesio y potasio amortiguada a 93°C/200°F [9].

	Tiempo [días]	Cambio de propiedad [%]						Aspecto
		Peso	Volumen	Dureza	Resistencia a la tracción	Elongación	Módulo al 200%	
Polymyte 4651	2	+0.1	-0.3	0	+0.8	-7.8	-0.2	Sin cambios
	7	+0.1	0	0	-1.0	-10.3	+6.5	Sin cambios
Molythane 4615	2	+0.2	0	0	+1.5	-28.4*	+2.2	Sin cambios
	7	+0.4	0	0	-30.8	-24.9	+2.7	Sin cambios
Nitrilo 112-82	2	-1.0	-0.8	0	-3.6	-14.2	+14.3	Sin cambios
	7	-1.5	-1.4	0	-5.0	-19.5	+12.3	Sin cambios
Nitrilo 177-8	2	+0.2	-0.9	0	+17.6	-1.6	+23.2	Sin cambios
	7	+0.3	-1.3	+1.1	+12.8	-5.3	+16.6	Sin cambios
Nitrilo 112-85	2	-1.4	-1.8	+2.4	+5.1	-15.3	+28.0	Sin cambios
	7	-2.0	-2.5	+1.2	+1.1	-21.5	+25.4	Sin cambios
Nitrilo 162-2	2	-0.8	-0.5	+1.6	+3.6	-18.5	+34.4	Sin cambios
	7	-1.1	-2.2	+2.0	+1.2	-26.2	+34.5	Sin cambios
Nitrilo 135-6	2	-0.7	-0.9	0	+4.0	-19.6	+28.8	Sin cambios
	7	-0.7	-1.2	+1.3	+6.1	-19.6	+26.9	Sin cambios

Tabla 13 Pruebas hechas por MERL a varios elastómeros expuestos a una salmuera de formiato de cesio y potasio amortiguada a 181°C/358°F.

Muestra	Tiempo de exposición	Cambio de volumen [%]	Cambio de masa [%]	Comentarios
PEEK®, anillo dividido	9 días	0.10		Sin cambios visibles
Anillos tóricos Viton®	2.2 días	-1.09		Frágil; grietas superficiales; fragmentos desprendidos
Anillos tóricos Viton® (4 muestras con diámetros diferentes)	1.5 días	~0.55		Frágil; grietas superficiales
Anillo tórico NBR diám. secc. x 6.5 mm	8.3 días	-0.10	-3.6	Duro; muy rígido; cambio de volumen
Anillo tórico Aflas® diám. secc. x 6.5 mm	8.3 días	0.39	0.4	Sin cambios; permanece flexible; sin daños visibles
Anillo tórico Viton® ETP diám. secc. x 6.5 mm	6.8 días	-0.10	0.3	Sin cambios; permanece flexible; sin daños visibles
	2.1 días	0.03		Se divide en un lugar (posiblemente como resultado de la limpieza), sin otros daños visibles

Tabla 14 Cambios de propiedades de muestras de elastómeros expuestos a una salmuera de formiato de cesio amortiguada de 2.18 g.e. (añadido un 5% de *KCl*) durante 48 horas a 204°C/400°F. Las pruebas fueron efectuadas por Westport Technology Center International [12].

Muestra	Cambio de peso [%]	Cambio de volumen [%]	Cambio de dureza [%]	Cambio de aspecto
CDI 904-90 FEPM	+0.3	0	-1.2	Sin cambios
	+0.3	0	-1.2	
	+0.3	+0.2	-1.2	
CDI 908 LS FKM	+2.4	+3.9	+5.7	Ampollas, agrietamiento y fragilidad
	+2.6	+3.2	+5.7	
	+3.1	+4.1	+5.7	
CDI 928 FKM	+2.5	+0.2	+1.1	Sin cambios, pero frágil cuando se dobla

Referencias

[1] Informe, Westport Technology Center International, 1997.

[2] Howard, S.K., Houben, R.J.H., Oort, E. van, Francis, P.A.: "Report # SIEP 96-5091 Formate drilling and completion fluids – Technical manual", Informe N°SIEP 96-5091, Shell International Exploration and Production, agosto de 1996.

[3] Goodson, Jim: "Oil based drilling fluids – Concerns for completion equipment", Conferencia internacional de ingeniería de yacimientos con polímeros, 26 – 27 de octubre de 1998.

[4] Seddon R.: "Formate brine exposure tests at elevated temperatures", MERL informe #C1857-1, Febrero 2006.

[5] Slay, J.B., Ray, W.: "Fluid Compatibility of Elastomers in Oilfield Completion Brines", NACE03140.

[6] Fuller, Robert E.: "Fluoroelastomers made with Advanced Polymer Architecture for Oil and Gas Applications". Publicación presentada en la Conferencia de ingeniería de yacimientos con polímeros, Londres, marzo de 2006.

[7] Choi, H.J. y Bodenhamer, W.: "Compatibility Test of Neyrfor HNBR with Cesium Formate", informe #FA9905, Westport Technology Center International, 1999.

[8] Informe # DT-98-091, Westport Technology Center International, octubre de 1998.

[9] "Compatibility Study of Elastomers with Cesium-K-Formate", nota FA0030-1, octubre de 2000.

[10] Carta de Cameron, abril de 2002. Referencia: "Compatibility Tests Conducted at CET September 2001, CETTR-010924".

[11] "Shearwater Intervention: Formate brine issues: review and testing", informe de MERL BOT/9.

[12] Choi, H.J. y Toups, S.: "Compatibility Test of Three Elastomeric Seals in Cesium Formate", informe # FA0016, Westport Technology Center International.