

2 MATERIAIS DE SUSTENTAÇÃO DE FRATURAS

2.1. PRINCIPAIS TIPOS DE PROPANTES

Os principais tipos de materiais empregados como propante são areias, areias tratadas com resina e propantes cerâmicos.

Areia foi o tipo mais utilizado, pela grande disponibilidade na natureza¹, baixo custo e pelo fato de propiciar uma condutividade adequada à fratura sob tensões de fechamento inferiores a 6.000 psi (aproximadamente 41MPa).

A areia tratada com resina é mais resistente que a areia pura e, dependendo do tipo de resina, pode resistir a tensões de fechamento da ordem de 8.000 psi (aproximadamente 55MPa). Além disso, sob tensões de fechamento maiores que 4.000 psi (aproximadamente 27MPa) e na inexistência de efeitos adversos do fluido sobre a resina, fraturas sustentadas com areia tratada apresentam geralmente maior condutividade do que aquelas com a utilização de areia pura.

Os propantes cerâmicos apresentam em sua constituição química elevado teor de alumínio (extraído da bauxita) e baixos teores de sílica e argila. De acordo com a composição da bauxita empregada no processo de fabricação, pode-se obter dois tipos de propante: a *bauxita sinterizada de resistência intermediária* e a *bauxita sinterizada de resistência elevada*. O propante cerâmico de resistência intermediária deriva da bauxita rica em mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), sendo geralmente utilizado sob tensões de fechamento da fratura no intervalo [5.000 psi, 10.000 psi] – ou entre 34 MPa e 69 MPa - enquanto que o propante cerâmico de resistência elevada, proveniente da bauxita rica em corundo - óxido de alumínio (Al_2O_3) – é mais indicado para fraturas com tensões de fechamento maiores que 10.000 psi (69MPa).

¹ Atualmente a extração de areia é fortemente afetada por medidas de proteção ao meio ambiente.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos principais tipos de propante, suas respectivas densidades e resistência à tensão de fechamento das fraturas.

Tabela 2.1 – Densidade e resistência de tipos de propante.

Tipo de propante	Densidade (g/cm ³)	Resistência (psi)
Areia pura	2,65	< 6000 ($\cong$ 41MPa)
Areia tratada com resina (RCS)	2,55	< 8000 ($\cong$ 55MPa)
Cerâmica de resistência intermediária (ISP)	2,7 – 3,3	5000 – 10000 (34 MPa – 69MPa)
Cerâmica de resistência elevada (HSB)	3,4 ou superior	> 10000 (69MPa)
Bauxita	2,00	> 7000 (48MPa)

Economides et al. (2000) sugerem o seguinte diagrama de blocos para seleção do tipo de propante em função da tensão de fechamento da fratura:

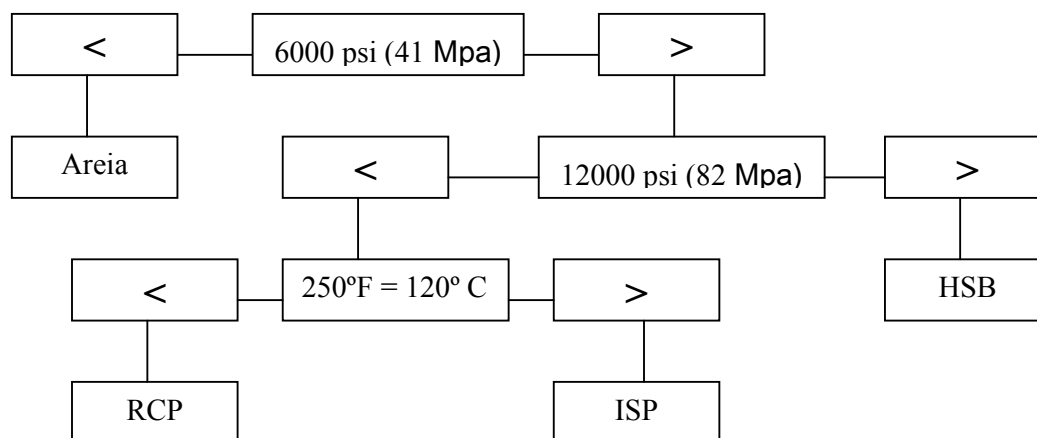


Figura 2.1 – Seleção do tipo de propante de acordo com a tensão de fechamento da fratura (Economides et al., 2000).

2.1.1. Propriedades físicas dos propantes

As propriedades físicas dos propantes que mais influenciam a condutividade da fratura são a resistência do propante, o tamanho das partículas, a quantidade de finos, o arredondamento e a esfericidade dos grãos e a densidade do propante.

2.1.1.1. Resistência ao esmagamento

A tensão de fechamento de uma fratura, ou tensão efetiva máxima que atua sobre o propante, pode ser estimada através da diferença entre a pressão de fraturamento e a pressão de produção no poço. Quando o poço começa a produzir, essa tensão atua no sentido de fechar a fratura e confinar o propante. Por essa razão, a resistência do material de sustentação à tensão de fechamento deve ser elevada o suficiente para impedir o esmagamento dos grãos e a conseqüente produção de finos, o que poderia reduzir significativamente a condutividade da fratura. A Tabela 2.1 apresenta valores de resistência ao esmagamento para vários tipos de propante, enquanto que a Figura 2.2 apresenta uma comparação entre os valores de resistência e da condutividade da fratura em função da tensão de fechamento.

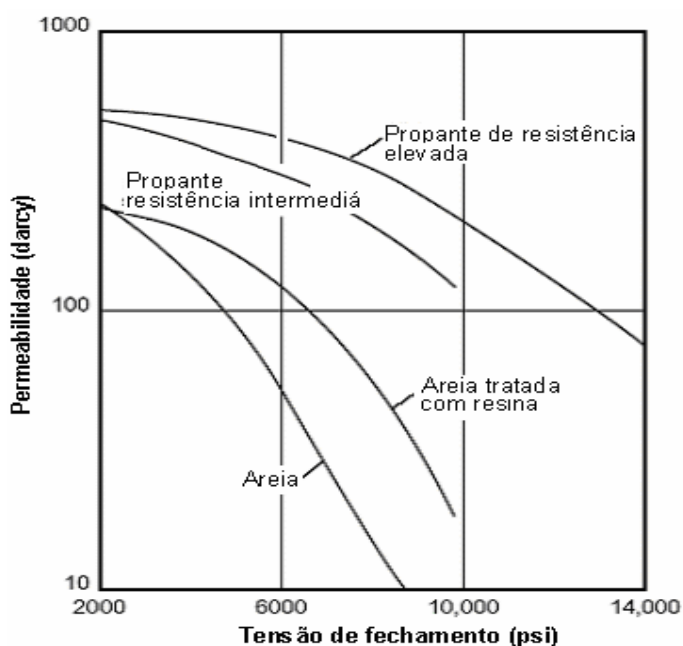


Figura 2.2 – Comparação entre os valores de resistência ao esmagamento de vários tipos de propante (Economides, 2000).

2.1.1.2. Tamanho e distribuição dos grãos

Segundo Economides (2000), a condutividade da fratura é uma grandeza diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro dos grãos de propante, devendo-se, contudo, observar os seguintes aspectos:

- propantes de grande diâmetro contribuem efetivamente para o aumento da condutividade da fratura apenas sob baixas tensões de fechamento, visto que quanto maior o tamanho do grão, maior é sua susceptibilidade ao esmagamento em grandes profundidades;

- em formações com elevado teor de impurezas ou sujeitas a significativa produção de finos, não é recomendável o uso de propantes com grãos de grande diâmetro, pois tanto as impurezas quanto os finos tendem a invadir o pacote de propante, provocar um estreitamento dos canais de fluxo e, conseqüentemente, uma rápida redução na condutividade da fratura;

- embora propantes de menor diâmetro propiciem uma baixa condutividade inicial, a condutividade média ao longo da vida útil do poço é maior que aquela obtida com propantes de grande diâmetro que normalmente apresentam um rápido declínio na produção.

A Figura 2.3 relaciona a condutividade da fratura com o tamanho das partículas de propante e da tensão de fechamento.

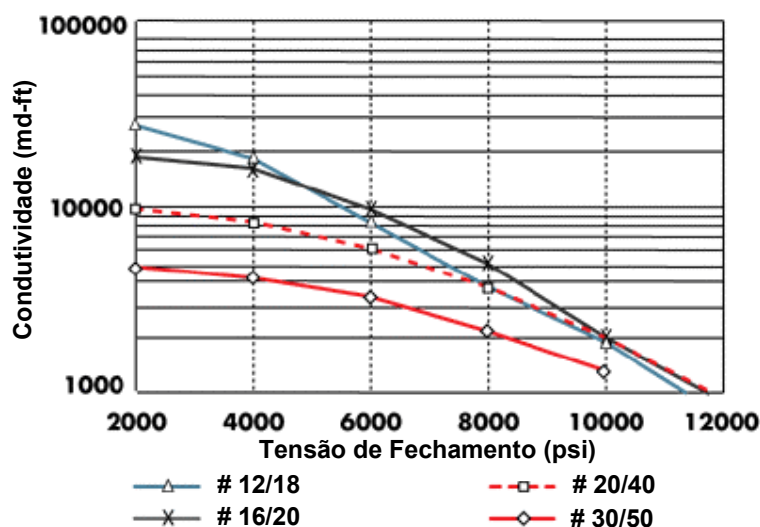


Figura 2.3 – Valores de condutividade da fratura em função do tamanho dos grãos de propante e da tensão de fechamento (apud www.carboceramics.com).

É importante ressaltar ainda que o tamanho das partículas de propante deve ser compatível com a largura da fratura a ser sustentada, de modo que o agente possa ser eficientemente transportado durante o tratamento sem ocorrência de uma

filtragem prematura, o que tipicamente acontece quando o tamanho máximo da partícula de propante é maior do que a metade da largura da fratura criada.

2.1.1.3.

Arredondamento e esfericidade das partículas

O arredondamento e esfericidade das partículas de propante influenciam a porosidade do pacote granular e, em consequência, a condutividade da fratura.

O arredondamento é uma medida da curvatura do grão, ou seja, expressa o quanto a sua borda é pontiaguda, enquanto que a esfericidade define o quanto o grão de propante se aproxima da forma esférica.

Principalmente sob elevadas tensões de fechamento, se os grãos forem arredondados e aproximadamente de mesmo tamanho, a distribuição de tensões sobre o pacote de propante tende a ser mais uniforme, reduzindo a ocorrência de esmagamentos e produção de finos.

Fabricantes de propantes usam o fator de forma de Krumbein para caracterizar o arredondamento e a esfericidade dos grãos, conforme ilustra Figura 2.4.

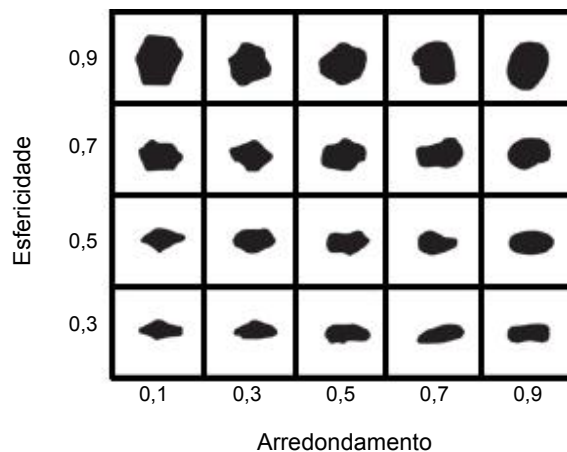


Figura 2.4 – Fator de forma de Krumbein para caracterização do arredondamento e da esfericidade de grãos de propantes (RP-60, RP-58, RP-56).

Propantes cerâmicos de baixa densidade, por exemplo, apresentam arredondamento e esfericidade de 0,9, enquanto que em areias esses valores são tipicamente iguais a 0,7.

2.1.1.4. Densidade do propante

A densidade é um fator de significativa influência no transporte do propante porque a taxa de sedimentação cresce linearmente com o aumento da densidade do material de sustentação. Propantes de alta densidade (como os cerâmicos de elevada resistência) são menos propensos a se manterem em suspensão no fluido de fraturamento e, assim, mais difíceis de serem transportados para as regiões superiores da fratura. O transporte e posicionamento desse tipo de propante podem, no entanto, serem facilitados de duas formas: através do uso de fluidos de fraturamento de alta viscosidade (para retardar o processo de sedimentação) ou através do aumento da taxa de injeção do propante (para reduzir o tempo de tratamento).

A Tabela 2.2. compara os valores de massa específica dos grãos e a massa específica aparente (*bulk density*) dos principais tipos de propante. A massa específica aparente corresponde à massa do propante por unidade de volume total do pacote granular, incluindo o volume de vazios intersticial, enquanto que a massa específica dos grãos se refere à relação entre a massa e o volume de sólidos. Geralmente, a massa específica dos grãos é usada para estimativas do tempo de sedimentação do propante, enquanto que a massa específica aparente é empregada para cálculos relacionados com o volume de propante a ser injetado e o volume da fratura a ser sustentada pelo material. É importante lembrar que ambas as propriedades são medidas independentemente da tensão de fechamento da fratura, esperando-se que a densidade aparente aumente nos casos em que ocorrer esmagamento dos grãos ou onde a reestruturação do pacote granular resultar em redução da porosidade.

Deve ser lembrado que embora o propante seja comercializado em peso, a relação custo-benefício está diretamente associada com sua densidade. Determinado peso de propante cerâmico de baixa densidade sustentará um maior volume de fratura do que o mesmo peso de propante cerâmico de alta densidade. Por essa razão, considerando-se uma dada concentração de propante em um projeto de fraturamento hidráulico, a largura da fratura sustentada com propante reduz-se a uma taxa proporcional ao aumento da densidade do agente de sustentação empregado.

Tabela 2.2 – Valores de massa específica dos grãos e da massa específica aparente dos principais tipos de propante (apud www.carboceramics.com).

Tipo de propante	Massa específica dos grãos (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)
Areia pura	2,65	1,6
Cerâmica de baixa densidade	2,72	1,62
Cerâmica de resistência intermediária	3,27	1,84
Cerâmica de resistência elevada	3,56	2,05

2.2. TRATAMENTOS DE PROPANTES

O controle da produção de propante é de grande importância para manter a conexão entre a fratura e o poço, garantindo a condutividade da fratura, controlando as tensões da formação e prevenindo problemas de entupimento do poço e outras dificuldades operacionais. A natureza da própria completação (perfuração, colocação de telas e revestimentos, etc) influencia no fluxo de propante, sendo a estabilidade do pacote granular no interior da fratura uma função da velocidade de fluxo, do tamanho das partículas, da largura da fratura e das tensões de confinamento. A velocidade que inicia a produção do agente de sustentação diminui com o aumento das tensões de confinamento e da largura da fratura mas aumenta com o tamanho das partículas de propante.

Um procedimento simples para controlar a produção de propante seria reduzir a taxa de produção até que cessasse completamente o refluxo do material de sustentação para dentro do poço. Economicamente, este procedimento é obviamente inaceitável, de modo que o enfoque do projeto de tratamento de fraturas passa a depender de medidas e critérios para controle da produção do material de sustentação.

Neste contexto, uma das medidas relaciona-se com a seleção e tratamento propante, de acordo com as várias técnicas a seguir mencionadas.

2.2.1. Tratamento com resina

Desde a década de 1980, uma técnica-padrão para prevenção do refluxo de material de sustentação é o tratamento do propante com resina. (Di Lullo e Rae,

2001). Estimativas apontam que apenas no ano de 2000, o consumo mundial de propante tratado com resina atingiu a marca de 227.000 toneladas.

O tratamento de propante com resina pode apresentar diversos benefícios, dentre os quais o aumento da resistência ao esmagamento da partícula, a redução da produção de finos, a diminuição da penetração do propante na formação e, principalmente, a prevenção do refluxo de propante para o interior do poço.

As resinas podem ser aplicadas ao propante com duas finalidades distintas: aumentar a resistência ao esmagamento do propante (tratamento com resina pré-curada) ou reduzir o refluxo de propante durante a produção (tratamento com resina curável).

As principais resinas utilizadas na fabricação deste tipo de propante são as fenólicas (produto resultante da condensação de fenóis e formaldeídos). Podem ser curados pela ação da temperatura apenas uma vez (materiais termo-controlados). O processo de cura é irreversível; após a sua finalização a resina não pode ser novamente amolecida ou fundida.

Propantes tratados com resina curável, denominados na literatura técnica de *RCP – Resin Coated Proppant*, podem apresentar cobertura simples ou dupla (a segunda camada de resina é aplicada sobre o propante envolvido pela primeira camada previamente curada). O propante tratado com resina curável é misturado e injetado durante os últimos estágios do tratamento da fratura. Durante o processo de cura, os grãos de propante tratados com resina unem-se entre si, formando uma estrutura de sustentação coesa, mas permeável.

Embora esta união de grãos apresente a tendência de reduzir a porosidade do pacote granular, o tratamento com resina diminui a possibilidade de esmagamento dos grãos. Caso ocorra, os finos tendem a ficar retidos no interior da própria massa curada, não afetando significativamente, por migração, a condutividade da fratura.

Apesar da versatilidade e da eficiência comprovada desse tipo de tratamento, propantes tratados com resina contêm componentes que podem interagir quimicamente com aditivos do fluido de perfuração ou do tratamento, podendo comprometer a união entre os grãos proporcionada pela cura da resina, e assim propiciar uma redução excessiva na permeabilidade do pacote (por facilitar a migração de finos) ou provocar o aumento do esmagamento dos grãos do material de sustentação (Dewprashad *et al.*, 1993; Nimerick *et al.*, 1990; Stiles, 1991; Smith *et al.*, 1994, L.R. Norman e J.M. Terracina *et al.*, 1990).

Almond *et al.* (1995) indicam que se o pH do fluido de fraturamento for aumentado de 7 para 12, então a porcentagem de resina removida do pacote de propante aumentará acentuadamente, resultando na redução da resistência no contato entre grãos.

Vreeburg *et al.* (1994) identificaram duas situações de produção de propantes tipo RCP: a primeira, durante a fase inicial de limpeza do poço, e a segunda após um longo período sem ocorrência de produção de propante. A primeira situação, segundo aqueles autores, provavelmente decorre da resistência insuficiente no contato entre os grãos de propante tratados com resina, variável de acordo com o tipo de resina escolhida, da temperatura de cura, da interação química entre a resina e o fluido de fraturamento, da espessura de recobrimento, etc. A segunda situação, que pode acontecer bastante tardiamente, é provavelmente provocada por danos no pacote de propantes causados por ciclos de tensão gerados durante as operações de produção do poço.

2.2.2.

Lavagem com resina

A técnica de lavagem com resina (*resin flush*) consiste no bombeamento de resina curável no interior da fratura depois de finalizada a operação de tratamento da mesma. Espera-se que uma camada de resina recubra a partícula de propante que se encontra no interior da fratura e nas proximidades do poço, com a ocorrência, em seguida, do processo de cura da resina por meio de reação químicas no polímero. As desvantagens desta tecnologia provêm das dificuldades de tratamento ao longo de todo o comprimento desejado da fratura, do bombeamento através do volume tratado e a necessidade de remover o excesso de resina curada junto às paredes do poço.

2.2.3.

Agentes modificadores de superfície

Os agentes modificadores de superfície (SMA) são materiais resinosos insolúveis em água ou óleo e que não endurecem ou curam sob as condições do reservatório, mas que melhoram significativamente a coesão ou aderência entre os grãos de propante, tornando-os mais estáveis no interior da fratura.

O tratamento consiste em aplicar um aditivo líquido ao propante, fazendo com que a superfície dos grãos se torne pegajosa para favorecer a aderência intergranular. Weaver *et al.* (1999) e Dewprashad *et al.* (1993) afirmaram que o uso de aditivos cria aglomerados de propante com porosidade e permeabilidade elevadas que contribuem para o aumento da condutividade da fratura.

Estudos citados por Brahmadeo *et al.* (1999), Parker *et al.* (1999) e Philip D. Nguyen *et al.* (1998), mostraram que, embora sejam mais resistentes às forças exercidas pelo fluxo do fluido na direção do poço, é também inevitável a ocorrência da produção do propante SMA nos casos em que a taxa de produção do poço for alta. Pode-se recorrer à técnica de aumento do peso molecular do agente modificador de superfície, procurando-se desta forma também aumentar a coesão entre os grãos de propante para tornar o pacote granular mais resistente à variação das taxas de produção do poço. Entretanto, a desvantagem deste procedimento é que a mudança no peso molecular do aditivo aumenta significativamente a viscosidade do mesmo, criando consideráveis dificuldades operacionais no processo de tratamento que, por sua vez, podem ser superadas pela adição de extensores químicos, que chegam a aumentar de 10 a 20 vezes o valor da velocidade crítica de fluxo. A partir desta velocidade, a estrutura do propante torna-se instável e a produção do agente de sustentação novamente acontece.

2.2.4.

Aditivos sólidos: fibras

Aditivos sólidos, como fibras, quando misturados ao propante no tratamento de fraturas podem ajudar a controlar o refluxo do material de sustentação, tendo em vista o aumento das forças resistentes de atrito desenvolvidas nas superfícies de contato entre ambos os materiais.

Outra vantagem do processo é que o tratamento é de natureza essencialmente mecânica, sem a necessidade de condições especiais de temperatura, pressão e tempos para finalização do processo de cura. Adicionalmente, por não envolver nenhum tipo de reação química, o tempo de limpeza do poço após o tratamento pode ser também consideravelmente reduzido.

Milton-Taylor *et al.* (1992) e Asgarian *et al.* (1994) sugeriram, com base em análises de resultados experimentais e numéricos, que o mecanismo governante da

estabilidade do propante na fratura é o chamado “efeito do arco” – Fig. 2.5. Em outras palavras, as partículas de propante tendem a formar um arco de compressão dentro da fratura que previne o movimento do material de sustentação na direção do poço. Romero e Feraud (1996) mostram que sem o uso de aditivos sólidos o arco tende a permanecer estável sob a ação das forças hidrodinâmicas para larguras de fratura de, no máximo, 5 vezes o diâmetro médio dos grãos de propante. Por outro lado, com a adição de fibras ao propante durante o tratamento da fratura, o arco tende a se manter estável para larguras de fratura bastante maiores. Além disso, Romero e Feraud (op.cit.) afirmaram que essa técnica de tratamento é eficiente mesmo sob pequenas tensões confinantes, de modo que a produção do poço pode ser iniciada antes mesmo que a fratura feche sobre o material de sustentação.

Parker *et al.* (1999) ressaltaram que embora aditivos sólidos auxiliem no controle da produção de propante, eles não se constituem numa solução definitiva do problema, por causarem redução na condutividade da fratura e, conseqüentemente, na eficiência e produtividade do poço.

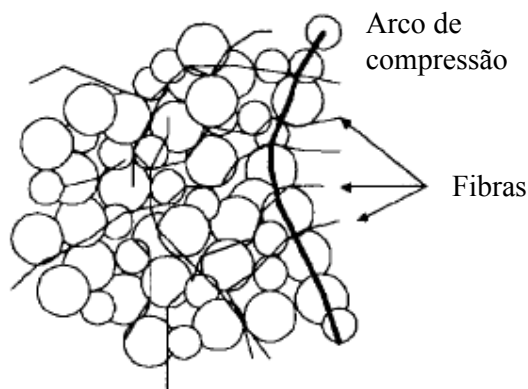


Figura 2.5 – Geometria do arco de compressão em fraturas tratadas com propante e fibras (Romero e Feraud, 1996).

2.2.5.

Aditivos sólidos: filme termoplástico

Pedaços de filme termoplástico adicionados ao propante propiciam um entrelaçamento dos grãos que contribui significativamente para aumentar a estabilidade do material de sustentação dentro da fratura. Esse conjunto

entrelaçado absorve melhor os efeitos das tensões cíclicas aplicadas durante as operações de produção do poço.

Sob temperaturas inferiores a 80°C o entrelaçamento aumenta o atrito no contato com os grãos, reduzindo, portanto, a tendência de movimento do propante na direção do poço durante a produção. A resistência por atrito no contato filme-grão é pequena comparada àquela obtida através do tratamento com resina (RCP). A concentração de filme termoplástico no tratamento geralmente varia de 0,5% a 4% por peso de propante injetado na fratura.

Para temperaturas superiores a 80°C a superfície do filme termoplástico torna-se gradualmente mais aderente à superfície dos grãos de propante, formando pequenos aglomerados fortemente entrelaçados. Em alguns casos, para temperaturas bastante elevadas, os filmes entrelaçados tendem a encolher formando aglomerados bastante coesos e resistentes. Dependendo da influência da temperatura, a concentração de filme pode ser reduzida para valores entre 0,5% a 1% por peso de propante injetado na fratura.

Com relação aos materiais dos filmes termoplásticos, destacam-se as seguintes vantagens: são quimicamente inertes, bastante econômicos, podendo ser usados ao longo de toda a fratura, e são mais resistentes aos danos provocados por grandes variações na taxa de produção do poço. Entretanto, por apresentarem baixa densidade, filmes termoplásticos tendem a flutuar no fluido de injeção, necessitando de uma agitação constante para que sejam misturados ao propante e assim garantam uma boa eficiência do tratamento.

2.2.6.

Aditivos sólidos: DIP

Um dos problemas com os aditivos citados anteriormente (fibras e filmes termoplásticos) é que ocupam espaços de poro, reduzindo a condutividade da fratura direta e indiretamente (pela captura de finos que normalmente deveriam fluir pelo poro totalmente aberto).

Uma alternativa para solução do problema é a mistura do material de sustentação com partículas isométricas deformáveis (DIP – *deformable isometric particles*), material composto formado por um núcleo rígido recoberto por um revestimento de material deformável, com certo grau de elasticidade e plasticidade

(Fig. 2.6). Usualmente, o núcleo ocupa de 85% a 94% do volume total da partícula.

Os DIPs são usualmente esféricos, insolúveis em óleo e água, inertes em relação a ácidos minerais comuns (HCl e HF sob temperaturas superiores a 200°C), de tamanho ligeiramente superior ao propante para compensar efeitos de penetração inter-partículas. Idealmente, para maior eficiência, os DIPs necessitam ser circundados por partículas de propante, sendo tipicamente adicionados na proporção de 10% a 15% em peso do propante.

Devido à sua deformabilidade sob pressão e temperatura, os DIPs exibem as seguintes propriedades: a) atuam para redistribuir o carregamento no pacote granular confinado, reduzindo a perda de largura da fratura causada pela penetração de partículas em formações rochosas, principalmente nas brandas; b) auxiliam na redução de altas tensões (carregamento ponto-a-ponto) entre partículas de propante adjacentes, minimizando o esmagamento de material e a geração de finos; c) sob altas tensões de confinamento, partículas de propante tendem a penetrar nas partículas DIP consolidando e fortalecendo o pacote granular (Fig. 2.6). As combinações destes efeitos tendem a reduzir o refluxo do propante, aumentando a condutividade da fratura, reduzindo o esmagamento de materiais e evitando a formação de finos. Segundo Phil Rae et al (2001) e Chris et al (1999), tanto areias quanto propantes cerâmicos incorporando DIPs exibem características notáveis; a condutividade de fraturas tratadas com areia e DIP, por exemplo, pode ser bastante superior aos valores obtidos com o uso de areias comuns, sob tensões de fechamento de até 10.000 psi (69 MPa). Portanto, a mistura DIP + areia pode constituir-se numa alternativa interessante em relação a propantes cerâmicos de alta resistência, bem como a mistura DIP + propante de cerâmica é opção atraente em relação à bauxita sinterizada.

Resultados de laboratório (Figuras 2.7 e 2.8 e Tabelas 2.3 e 2.4) mostram o comportamento dos DIPs, confirmando a eficiência do tipo de tratamento.

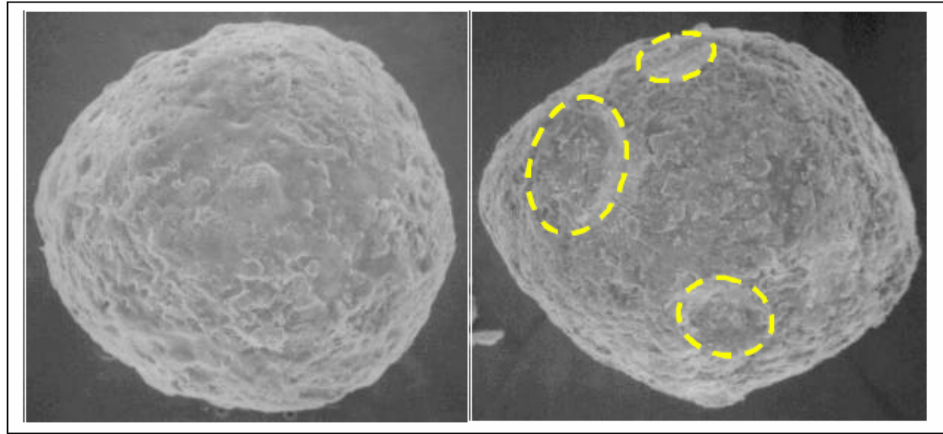


Figura 2.6 – Partícula DIP antes (esquerda) e após (direita) ao fechamento da fratura sob tensão de 7000 psi (48MPa). Os círculos indicam deformação causada pela penetração do propante.

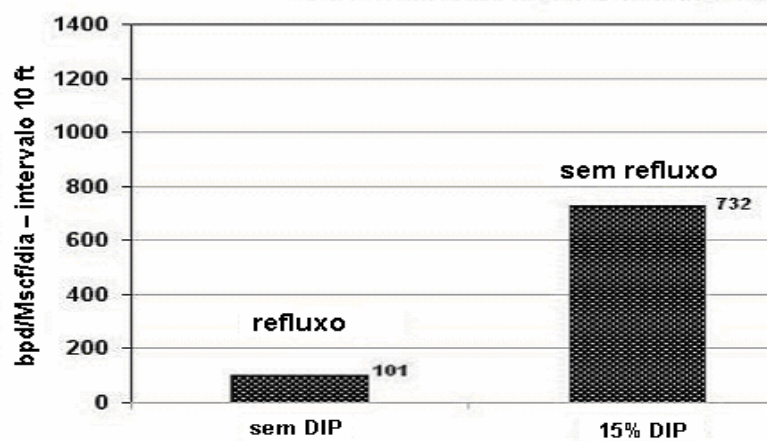


Figura 2.7 – Aumento da resistência ao refluxo do material de sustentação com adição de 15% de DIP (em peso). Propante cerâmico 20/40 de baixa densidade (Lt. Wt), tensão confinante de 4.000 psi (27 MPa), temperatura de 250°F (120°C) - Rae, P. et al, 2001.

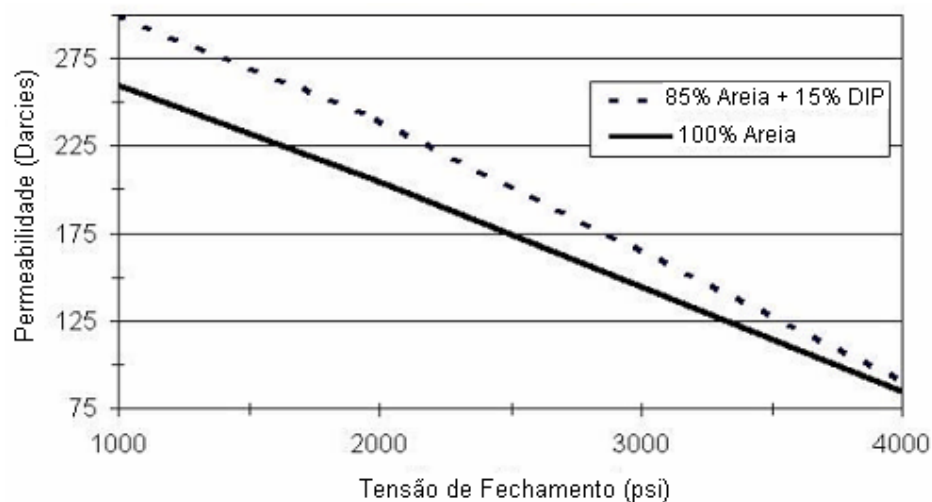


Figura 2.8 – Aumento da permeabilidade do propante pela adição de DIP (Rae, P. et al, 2001).

Tabela 2.5 – Ensaio de esmagamento em areia Ottawa 20/40 e com misturas areia + DIP (15%, 25%) – Rae, P. et al., 2001.

100% Areia		Areia + 10% DIP (em peso)		Areia + 25% DIP (em peso)	
Tensão de Fechamento (psi)	% Finos (em peso)	Tensão de Fechamento (psi)	% Finos (em peso)	Tensão de Fechamento (psi)	% Finos (em peso)
5000	4.9	5000	4.8	5000	3.5
6000	21.8	6000	13.6	6000	8.5
7000	25.9	7000	15.2	7000	11.5
8000	32.9	8000	22.6	8000	13.8
10000	40.4	10000	28.5	10000	15.5

Tabela 2.4 – Ensaio de esmagamento em areia Ottawa 20/40 sob tensão estática de 5.000 psi (34 MPa) e 20 ciclos de carregamento entre 1.000 psi a 5.000 psi (7MPa a 34 MPa) – Rae, P. et al., 2001.

Tensão de fechamento Estática de 5.000 psi (34 MPa)		Tensão de Fechamento Cíclica de 5.000 psi (34 MPa)	
DIP (em peso)	% Finos (em peso)	DIP (em peso)	% Finos (em peso)
0	4.9	0	6.8
5	5.2	5	5.7
10	4.8	10	5.7
15	5.1	15	5.8
20	4.0	20	3.9
25	3.5	25	3.8