

## 2 MECANISMOS DO REFLUXO DE PROPANTE

Os mecanismos que governam a produção do material de sustentação de fratura não são ainda perfeitamente explicados. Vários estudos mostram, no entanto, que a produção do agente de sustentação de fratura está estreitamente relacionada ao tipo e ao tamanho da partícula, à tensão de fechamento da fratura, às forças hidrodinâmicas e às dimensões da fratura e a sua condutividade. Desta forma, a compreensão de tais fatores, além da identificação das propriedades que caracterizam o material de sustentação, é indispensável para a previsão e recomendação de métodos mais adequados para o controle da produção de propante (Goel & Shah, 1999).

### 2.1. GEOMETRIA DA FRATURA

Modelos bidimensionais e tridimensionais para representar a geometria da fratura são apresentados na literatura. Nesse presente estudo, foi considerado o modelo bidimensional de Perkins e Kern (1961), também conhecido com PKN. Tal modelo considera a fratura como uma elipse na seção transversal vertical e como uma parábola na seção transversal horizontal (Figura 2.1).

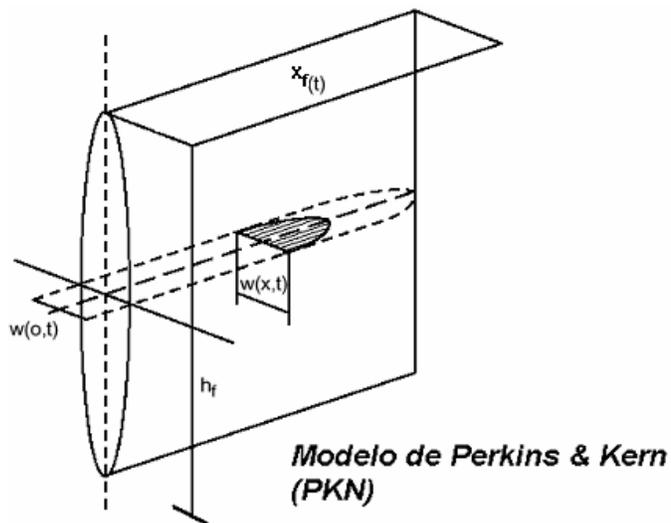


Figura 2.1 – Modelo bidimensional de geometria de fratura de Perkins & Kern (PKN).

O comprimento e a largura da fratura estão expressos em função do instante de tempo  $t$ , que no caso, representa o tempo de tratamento da fratura durante o processo de fraturamento hidráulico. No presente estudo, a fratura está sendo analisada após o tratamento, ou seja, na fase de produção do poço. Assim sendo, os valores para a largura e comprimento da fratura são os valores ao final do tratamento.

Na fase de produção do poço considera-se que ocorre uma certa acomodação das partículas no interior da fratura e a geometria da fratura é aproximada pela forma de um paralelepípedo, conforme mostra a Figura 2.2 (Economides, 2000). Como todas as análises apresentadas nessa dissertação estão relacionadas à fase de produção do poço, esta geometria foi adotada.

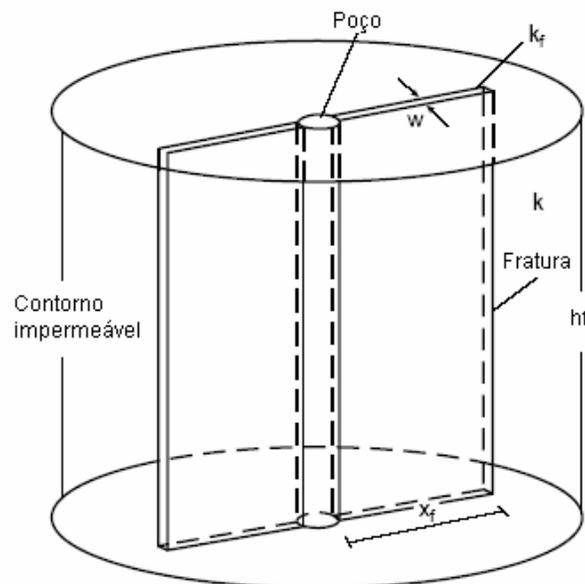


Figura 2.2 – Geometria da fratura adotada para as análises dessa dissertação (Economides, 2000).

Dentre todos os fatores que influenciam o fenômeno de produção de material de sustentação, a largura da fratura é, provavelmente, o mais significativo. As formulações apresentadas nos modelos de previsão de refluxo de propante são expressas em termos de largura normalizada, ou seja, da relação entre a largura da fratura e o diâmetro médio das partículas. Tais parâmetros podem ser observados através da Figura 2.3.

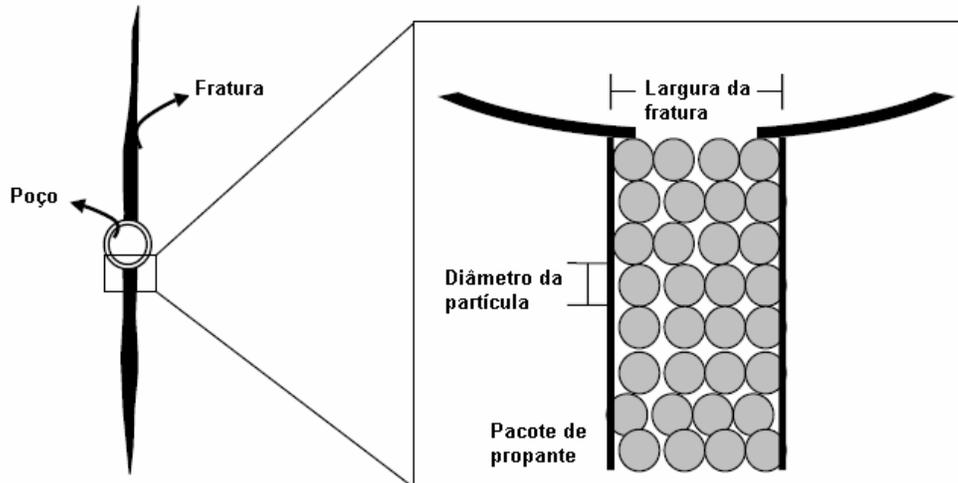


Figura 2.3 – Largura da fratura e diâmetro do propante (Canon et al., 2003).

Estudos experimentais conduzidos por Milton-Taylor et al. (1992), respaldados pelas modelagens numéricas de Asgian & Cundall (1994) e por estudos experimentais realizados desde 1996 pelo grupo de empresas petrolíferas coordenadas pela companhia Stimlab (1996), indicaram que a maioria dos pacotes granulares tende à instabilidade quando a largura normalizada da fratura é superior ao valor seis. Alguns parâmetros que influenciam na estabilidade do pacote granular foram ignorados na determinação do valor limite da largura normalizada, como por exemplo, a tensão de fechamento (Canon et al., 2003). No entanto, este valor apresenta sucesso expressivo em aplicações práticas em poços de petróleo. Isso pode ser explicado através do “efeito do arco”, apresentado na Figura 2.4, formado na superfície externa da fratura devido à ação de tensões de compressão sobre a camada de partículas (Asgian & Cundall, 1994). Quanto maior a largura da fratura, maior é a coluna formada pelos grãos de propante, tornando-a mais susceptível à instabilidade e facilitando o transporte dos grãos para o interior do poço.

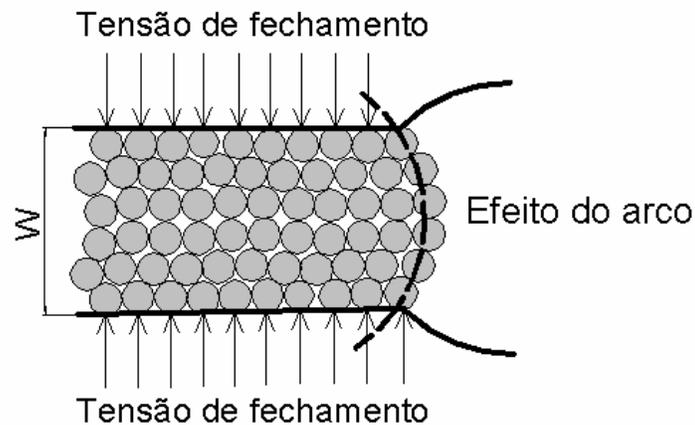


Figura 2.4 – Esquema do efeito do arco proposto por Asgjan & Cundall (1994).

Apesar disso, constata-se que fraturas mais largas que seis camadas de propante podem ser estáveis sob determinadas condições de tensão de fechamento e fluxo de fluido, de forma que a largura da fratura não pode ser analisada como um fator isolado (Andrews & Kjørholt, 1998).

## 2.2. TENSÃO EFETIVA SOBRE O PROPANTE

A tensão efetiva sobre a partícula de propante depende da geometria da fratura, da tensão horizontal mínima atuante na formação ( $\sigma_{\min}$ ) e da pressão do fluido no fundo do poço ( $P_f$ ), considerando o gradiente de pressão hidráulica. A Figura 2.5 ilustra os parâmetros que quantificam a tensão efetiva sobre o propante.

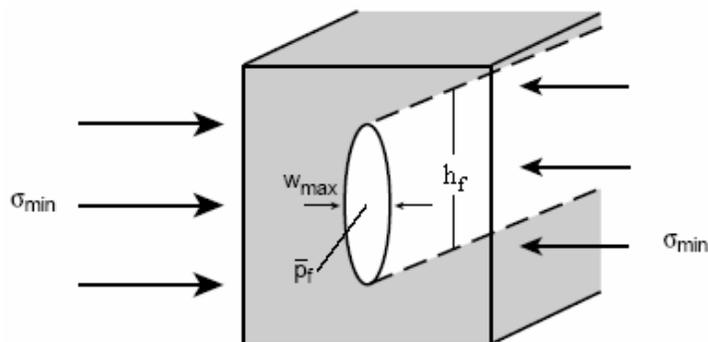


Figura 2.5 – Esquema de atuação da tensão horizontal mínima e da pressão no fundo do poço (Economides, 2000).

Baseado no modelo de Perkins e Kern (1961) - Figura 2.1, Economides (2000) desenvolveu algumas equações que relacionam a largura da fratura e a

tensão efetiva sobre o propante, e após algumas combinações algébricas, se obtém a seguinte equação:

$$P_{c,net} = \frac{W_{max} \times G}{(1-\nu) \times h_f} + \sigma_{min} - P_f \quad (2.1)$$

onde  $P_{c,net}$  é a tensão efetiva atuante sobre o propante em psi,  $W_{max}$  é a maior largura da fratura em pés (ft),  $G$  é o módulo transversal da formação em psi,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson e  $h_f$  é a altura da fratura em pés (ft).

Em fraturas sustentadas, a tensão de fechamento é exercida sobre pacote granular, influenciando, desta forma, na tensão efetiva sobre o propante e, principalmente, na estabilidade do pacote.

Vários estudos teóricos e experimentais já demonstraram a influência da tensão de fechamento no fenômeno de refluxo do material de sustentação de fraturas em poços de petróleo estimulados por fraturamento hidráulico (Milton-Taylor, 1992; Andrews & Kjørholt, 1998, dentre outros). Inicialmente, sugere-se que altos valores de tensão de fechamento conduzem a pacotes granulares mais estáveis devido ao aumento da resistência ao cisalhamento nos contatos entre as partículas. No entanto, a literatura registra casos nos quais valores excessivos da tensão de fechamento são justamente a causa do refluxo de propante. Nesse caso, ocorre a perda da integridade mecânica dos grãos e os mesmos são parcialmente esmagados, já que a tensão de fechamento se aproxima da resistência ao esmagamento da partícula.

Portanto, podem ser identificadas três situações diferentes de tensão de fechamento, como mostra a Figura 2.6.

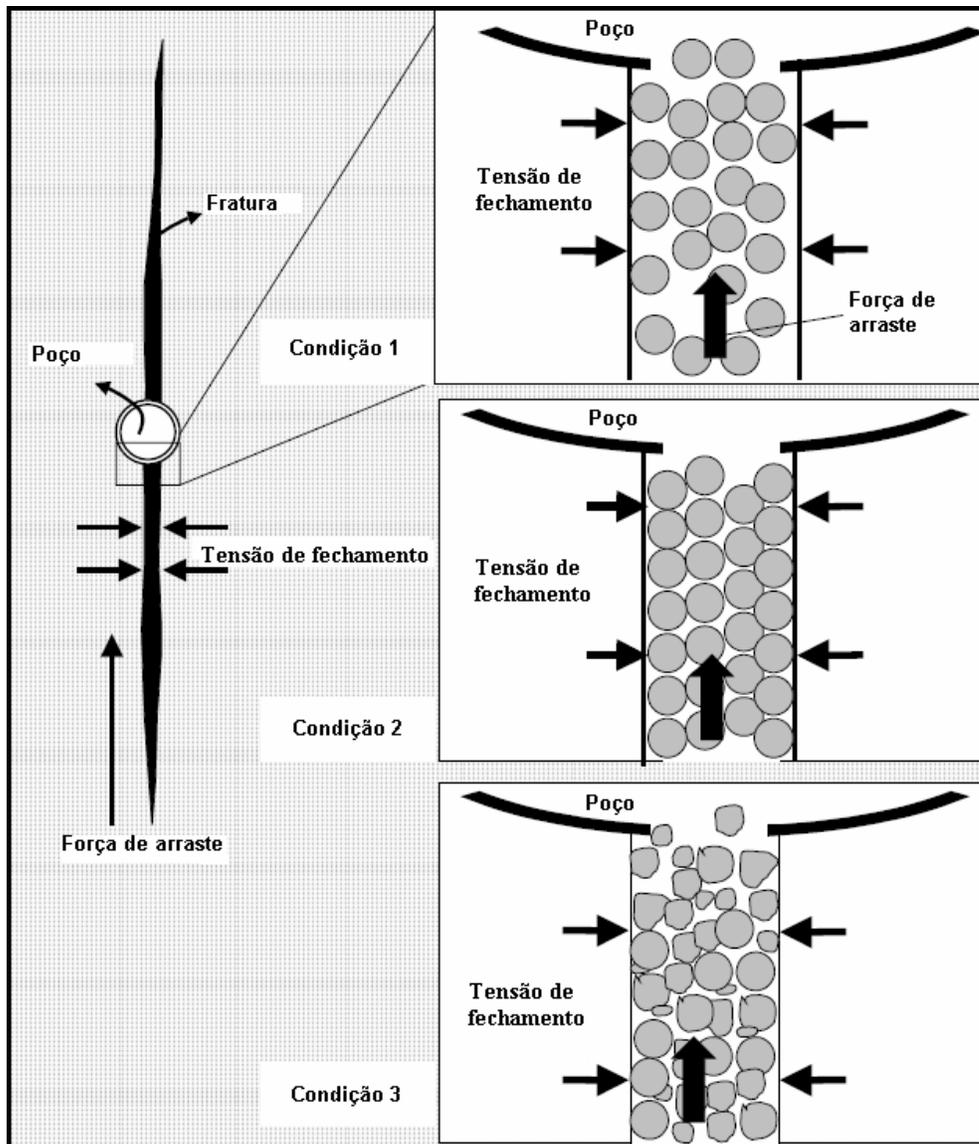


Figura 2.6 – Efeitos da tensão de fechamento na estabilidade da fratura hidráulica (Canon et al., 2003).

Na primeira, o valor da tensão de fechamento é muito baixo, e os grãos fluem quase que livremente para o exterior da fratura. Para valores intermediários, ocorre um aumento do atrito desenvolvido entre partículas e o pacote tem comportamento estável. Finalmente, na última situação, os valores da tensão de fechamento são excessivamente altos ocasionando o esmagamento dos grãos, como já mencionado.

### **2.3. FORÇA DE ARRASTE**

A movimentação do fluido através do pacote granular confinado gera uma variação de pressão, com a qual a força de arraste se relaciona diretamente. Tal variação de pressão não depende apenas da viscosidade e velocidade do fluido, mas também, da permeabilidade do pacote. A influência da força de arraste na estabilidade do material de sustentação é dependente da tensão de fechamento atuante na fratura. Para casos em que a tensão de fechamento assume valores extremos, ou seja, muito altos ou muito baixos, o material de sustentação é inerentemente instável, independentemente do valor da força de arraste. Por outro lado, para valores intermediários da tensão de fechamento, a influência da força de arraste no refluxo de propante pode ser dominante (Andrews & Kjørholdt, 1998).

### **2.4. TIPOS DE PROPANTES**

Propantes são materiais granulares usados para sustentar as paredes da fratura e garantir a condutividade da mesma após a interrupção do bombeamento do fluido de fraturamento. A seleção do tipo de propante é um dos fatores determinantes para o sucesso do fraturamento hidráulico, pois as suas propriedades físicas influenciam a condutividade da fratura.

A areia foi o tipo de propante mais utilizado por ser econômica, largamente disponível na natureza e ainda, propiciar uma condutividade adequada à fratura sob tensões de fechamento inferiores a 6000 psi (aproximadamente 41 MPa).

O tratamento da areia com resina produz um propante mais resistente ao esmagamento, podendo suportar tensões de fechamento de até 8000 psi (55Mpa), dependendo do tipo de resina utilizada no tratamento. Além disso, sob tensões de fechamento maiores que 4000 psi (27 MPa) e na inexistência de efeitos adversos do fluido sobre a resina, fraturas sustentadas por areia tratada com resina (RCS), geralmente, oferecem maior condutividade do que aquelas sustentadas por areia não-tratada.

De acordo com a composição da bauxita empregada no processo de fabricação, dois tipos de propantes cerâmicos são obtidos: bauxita sinterizada de resistência intermediária e bauxita sinterizada de resistência elevada. O propante cerâmico de resistência intermediária (ISP) deriva da bauxita rica em mullita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), possui densidade mediana e oferece resistência a tensões de

fechamento entre 5000 psi e 10000psi (34 MPa e 69 MPa). Por sua vez, o propante cerâmico de resistência elevada (HSP) deriva da bauxita rica em corundo ( $Al_2O_3$ ), pode ser utilizado sob tensões de fechamento superiores a 10000 psi (69 MPa) e apresenta custos mais elevados (Economides, 2000).

Para a visualização de um dos tipos de propante, a Figura 2.7 apresenta uma jazida de bauxita e um pacote granular de bauxita tratado com resina.

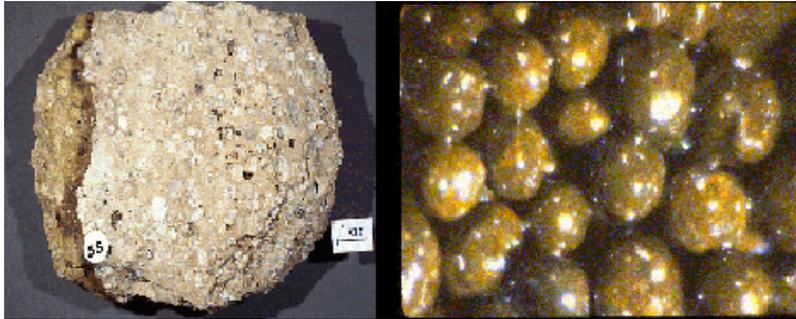


Figura 2.7 – Jazida de bauxita e pacote granular de bauxita tratado com resina ([www.edafologia.ugr.es/rocas/bauxita.htm](http://www.edafologia.ugr.es/rocas/bauxita.htm)).

## 2.5. PROPRIEDADES FÍSICAS DO PROPANTE

A seguir são descritas as propriedades físicas do propante que mais influenciam no refluxo do mesmo e afetam a condutividade da fratura.

### 2.5.1. Resistência ao esmagamento

Quando a produção do poço é iniciada, a tensão de fechamento atua no sentido de fechar a fratura e confinar o propante. Por essa razão, a resistência do material de sustentação ao esmagamento deve ser elevada o suficiente para impedir a desintegração mecânica dos grãos e a conseqüente produção de finos, o que pode causar o refluxo de propante e reduzir significativamente a condutividade da fratura.

### 2.5.2. Tamanho dos grãos

A seleção do tamanho e distribuição dos grãos deve ser feita observando alguns aspectos, visto que tais características também podem influenciar na produção de material de sustentação e afetar a condutividade da fratura, como

pode ser observado na Figura 2.8. Segundo Economides (2000), propantes de grande diâmetro contribuem efetivamente para o aumento da condutividade da fratura apenas sob baixas tensões de fechamento, pois quanto maior o tamanho dos grãos, maior é sua susceptibilidade ao esmagamento. Também não é recomendável o uso de propantes com grãos de grande diâmetro em formações com elevado teor de impurezas ou sujeitas à significativa produção de finos, pois tanto as impurezas quanto os finos tendem a invadir o pacote de propante, estreitando os canais de fluxo e reduzindo a condutividade da fratura. Portanto, apesar de propantes de menor diâmetro propiciarem 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.

É importante observar 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 a 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.

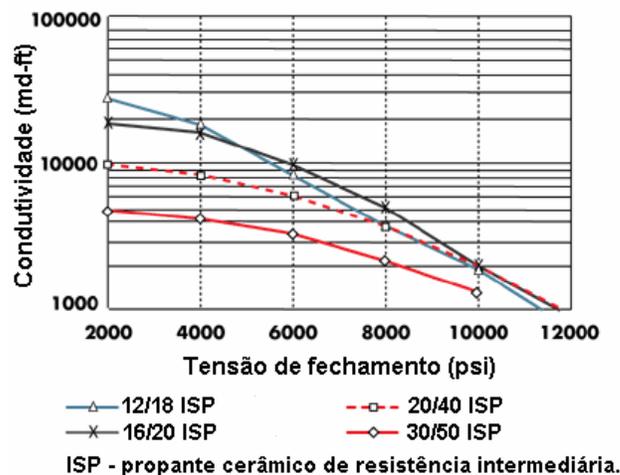


Figura 2.8 – Valores de condutividade da fratura em função do tamanho dos grãos de propante e da tensão de fechamento ([www.carboceramics.com](http://www.carboceramics.com)).

### 2.5.3. Densidade do propante

A razão entre a massa específica do propante e a massa específica da água ( $1,0 \text{ g/cm}^3$ ) é definida como densidade relativa do propante.

A densidade é um fator de significativa influência no transporte de propante, visto que a taxa de sedimentação cresce linearmente com o aumento da densidade do material de sustentação. Portanto, propantes de alta densidade dificilmente se mantêm em suspensão no fluido de fraturamento e, por isso, não tendem a serem transportados para regiões superiores da fratura.

#### 2.5.4. Arredondamento e esfericidade das partículas

O arredondamento de um grão está relacionado à curvatura do mesmo, ou seja, expressa o quanto sua borda é pontiaguda. A esfericidade define quanto o grão de propante se assemelha à forma esférica. Fabricantes de propante usam o fator de forma de Krumbein para quantificar essas duas características, como mostra a Figura 2.9.

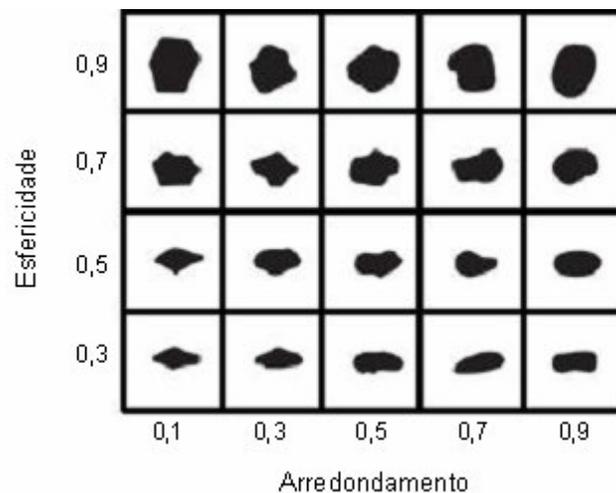


Figura 2.9 – Fator de forma de Krumbein para a caracterização do arredondamento e da esfericidade dos grãos de propantes ([www.carboceramics.com](http://www.carboceramics.com)).

A esfericidade e o arredondamento das partículas de propante afetam a porosidade do pacote granular, e conseqüentemente, a condutividade da fratura; quanto maior o grau de esfericidade e arredondamento, maior é a porosidade. Além disso, sendo os grãos arredondados e aproximadamente do mesmo tamanho, a distribuição de tensões sobre o pacote de propante tende a ser mais uniforme, reduzindo a ocorrência de esmagamento e produção de finos, mesmo sob elevadas tensões de esmagamento (Economides, 2000). Portanto, essas características dos grãos devem ser observadas com cautela, a fim de evitar e controlar a produção do material de sustentação de fraturas hidráulicas.

## 2.6. CONCENTRAÇÃO DE PROPANTE

A concentração de propante se refere à massa de propante por unidade de área da fratura sustentada, usualmente expressa em  $\text{lb}/\text{ft}^2$  ou  $\text{kg}/\text{m}^2$ . A concentração de propante influencia diretamente na condutividade da fratura, ou seja, uma maior concentração de propante fornece uma maior condutividade. O gráfico da Figura 2.10, apresentada a seguir, mostra a relação entre condutividade e tensão de fechamento de acordo com a concentração de propante.

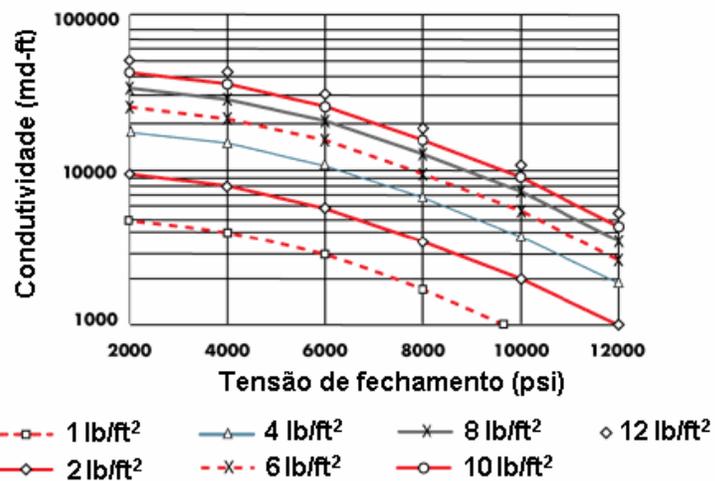


Figura 2.10 – Valores de condutividade da fratura em função da concentração de propante e da tensão de fechamento ([www.carboceramics.com](http://www.carboceramics.com)).