

## 5 Simulações e resultados

No capítulo 4 foram desenvolvidos três modelos para a estimativa da evolução de uma fratura ao longo do tempo através da análise da curva de pressão de fundo de uma operação de *fracpack*. Inicialmente foram feitas algumas modificações no modelo original de Valkó & Oligney [3] dando origem ao modelo, chamado combinado, para uma fratura de geometria radial. Posteriormente, o modelo de Valkó & Oligney [3] foi adaptado para as outras duas geometrias bidimensionais de fratura, dando origem ao modelo combinado para uma fratura de geometria PKN e ao modelo combinado para uma fratura de geometria KGD. Esses três modelos foram testados utilizando os registros de oito operações de *fracpack*, sendo 7 delas efetuadas na Bacia de Campos, no Rio de Janeiro e 1 operação realizada no litoral de Sergipe. Nos testes, os modelos tentam prever o crescimento da fratura, da abertura e a eficiência ao longo do tempo, além da curva final de concentração do agente de sustentação ao longo do comprimento da fratura. Estes resultados, obtidos com os modelos desenvolvidos, foram comparados aos resultados obtidos com dois simuladores comerciais, sendo eles o MFrac, da Meyer & Associates e o Stimplan, da NSI Technologies.

### 5.1. Simuladores comerciais

O modelo combinado foi desenvolvido utilizando geometrias de fratura 2D. Neste caso a altura da fratura é tratada como um dado conhecido e as outras duas dimensões da fratura, comprimento e abertura, são calculadas utilizando-se um balanço de massa. Mesmo não sendo necessário informar a altura da fratura, a geometria radial também é tratada como um modelo 2D, já que, como nos outros modelos, apresenta apenas duas incógnitas, o raio e a abertura da fratura.

Nos *softwares* comerciais foram utilizados modelos 3D de fratura, nos quais as três dimensões são desconhecidas. O *software* Mfrac da Meyer & Associates utiliza um modelo chamado pseudo tridimensional (P3D). Este tipo de

modelo basicamente utiliza uma geometria PKN permitindo, porém, um crescimento da fratura em altura. Muitas formulações foram apresentadas para os modelos P3D, no entanto variam apenas no detalhe, tendo por base os mesmos princípios. Inicialmente eles utilizam uma geometria de fratura radial ou elíptica até que alguma barreira ao crescimento vertical da fratura seja atingida. Após encontrar barreiras, a fratura começa a se propagar lateralmente, sendo calculada a pressão de tratamento, a abertura da fratura e outros parâmetros ao longo de seu comprimento, com base no modelo PKN. Os modelos P3D assumem que o comprimento da fratura é sempre maior que a altura da fratura, permitindo que cada segmento da fratura seja tratado independentemente. Com esta hipótese são obtidas apenas simulações aproximadas de grandes mudanças na geometria da fratura durante um tratamento e, desta forma, casos em que a geologia é muito complexa necessitam de modelos verdadeiramente tridimensionais [26].

O *software* Stimplan da empresa NSI utiliza um modelo chamado verdadeiramente tridimensional, apesar das propriedades utilizadas serem definidas para a parede do poço. Neste caso, a abertura da fratura, pressão e propagação em cada ponto da fratura é função da abertura e da pressão em todos os outros pontos. Desta forma a fratura está conectada em um processo mecânico uniforme, utilizando um modelo com malha e permitindo assim a simulação de geometrias mais complexas [26].

Utilizando os registros de oito operações de *fracpack*, o presente trabalho apresentará uma comparação entre os resultados obtidos com o modelo combinado desenvolvido e os resultados obtidos nas simulações com os softwares comerciais. De certa forma, também será possível realizar uma comparação entre as simulações de um modelo 2D com um *software* P3D e ainda com um *software* verdadeiramente 3D.

## 5.2. Dados de entrada

Para cada estudo de caso foi necessário obter os registros do tratamento ao longo do tempo e também informações do reservatório, do poço, do agente de sustentação e do fluido de fraturamento. Cabe ressaltar que estas informações estão sempre disponíveis durante uma operação de *fracpack*.

### 5.2.1. Registros da operação

Para a utilização do modelo combinado é necessário ter disponível alguns registros do tratamento e do teste de calibração ao longo do tempo. A partir desses registros outras informações são calculadas para a direta aplicação no modelo.

1. Vazão de bombeio da pasta: a vazão de bombeio registrada é a vazão total. No modelo desenvolvido deve-se considerar a vazão de bombeio para uma asa de fratura. Além disso, com a vazão de bombeio de uma asa de fratura deve ser calculado o volume acumulado de pasta bombeada, eq. (5.1).

$$V_i(t_n) = [t_n - t_{n-1}]q(t_n) + V_i(t_{n-1}) \quad (5.1)$$

2. Pressão de fundo: como o número de registros é muito grande, um melhor resultado foi obtido utilizando-se uma média móvel dos registros de pressão de fundo no intervalo de tempo de 0,1 minutos. O conhecimento da pressão de fundo é de extrema importância, pois ela definirá os períodos de ocorrência do TSO.
3. Concentração do agente de sustentação por volume de líquido (ca): a concentração a ser utilizada no modelo é a concentração do agente de sustentação por volume de pasta (c). Para essa conversão é necessário o conhecimento da massa específica do agente de sustentação. Admitindo que a massa específica do agente de sustentação seja expressa em g/cm<sup>3</sup>, a concentração por volume de pasta em lb/gal é fornecida pela eq. (5.2):

$$c = \frac{ca \rho_p 8,34}{\rho_p 8,34 + ca} \quad (5.2)$$

Com a concentração do agente de sustentação por volume de pasta é possível estimar a massa acumulada de agente de sustentação entrando na fratura, eq. (5.3):

$$M(t_n) = [V_i(t_n) - V_i(t_{n-1})]c + M(t_{n-1}) \quad (5.3)$$

4. Registros do declínio de pressão do minifrac: para a estimativa do expoente  $\alpha$  são necessários os registros de tempo e pressão de fundo ao longo do tempo do declínio de pressão do minifrac, além do tempo de bombeio. Desta forma será possível estimar o ponto de fechamento da fratura, a eficiência do minifrac e

conseqüentemente um melhor expoente  $\alpha$  para ser utilizado no modelo combinado.

### **5.2.2. Outras informações necessárias**

Para a aplicação do modelo combinado também é necessário ter as seguintes informações:

1. Módulo de elasticidade,  $E$ , e coeficiente de poisson,  $\nu$ : nas simulações foram utilizados valores médios dos parâmetros elásticos do reservatório, os quais permitem o cálculo do módulo de deformação plana,  $E'$ .
2. Altura permeável do reservatório e intervalo canhoneado: esta informação é utilizada na definição da altura da fratura para os modelos PKN e KGD.
3. Coeficiente de filtração,  $C_L$ : nas simulações foi utilizado o coeficiente de filtração definido a partir do chamado ajuste de pressão. O ajuste de pressão é uma metodologia amplamente utilizada pela indústria na qual os dados do simulador são calibrados de forma a reproduzir os registros de pressão observados durante uma operação. Além do coeficiente de filtração, os parâmetros geralmente modificados no simulador para a sua calibração são a tensão mínima e o módulo de Young. Utilizando os dados do teste de calibração, este procedimento é sempre realizado antes de uma operação de fraturamento para que seja definido o projeto final a ser executado. O ajuste de pressão também é realizado após a operação de fraturamento utilizando os registros do tratamento. Com o simulador calibrado é possível reproduzir as condições observadas no campo e desta forma estimar a geometria final da fratura executada. Neste trabalho observou-se que não foram obtidos bons resultados para o ajuste de pressão do tratamento utilizando o coeficiente de filtração obtido com o ajuste de pressão do teste de calibração. Desta forma, o coeficiente de filtração estimado inicialmente teve que ser ajustado para a obtenção de uma geometria de fratura mais representativa das pressões medidas durante a operação.
4. Massa específica do agente de sustentação: a massa específica é utilizada para converter a concentração do agente de sustentação

por volume de líquido, registrada durante a operação, em concentração do agente de sustentação por volume de pasta.

5. Volume da coluna: o conhecimento do volume da coluna é de grande importância no modelo, pois ele permite a estimativa da chegada da massa de agente de sustentação no fundo do poço e conseqüentemente dentro da fratura, marcando o momento a partir do qual o TSO já pode ser iniciado.
6. Índice de consistência,  $K$ , e índice de comportamento do fluxo,  $n$ , do fluido do tratamento: estes índices são utilizados tanto na análise do declínio de pressão do minifrac para estimativa do expoente  $\alpha$ , quanto na definição da viscosidade equivalente do fluido utilizado no tratamento.
7. Definição da função  $f(\Delta t_D, \alpha)$ : para o conhecimento da vazão de filtração no modelo desenvolvido é necessário calcular a função  $f(\Delta t_D, \alpha)$ . Definida pela eq. (2.74) como a derivada da função  $g(\Delta t_D, \alpha)$  em relação ao tempo adimensional  $\Delta t_D$ , a função  $f(\Delta t_D, \alpha)$  pode ser obtida analiticamente através da função hipergeométrica definida pela eq. (3.6). Utilizando o *software* Mathematica a função hipergeométrica foi resolvida para diferentes valores de  $\alpha$  considerando o tempo adimensional  $\Delta t_D$  igual a zero. Os pontos encontrados permitiram a aproximação da função por uma reta como mostra a eq. (5.4) e a figura 5.1.

$$f(\Delta t_D = 0, \alpha) = 0,857\alpha + 1,151 \quad (5.4)$$

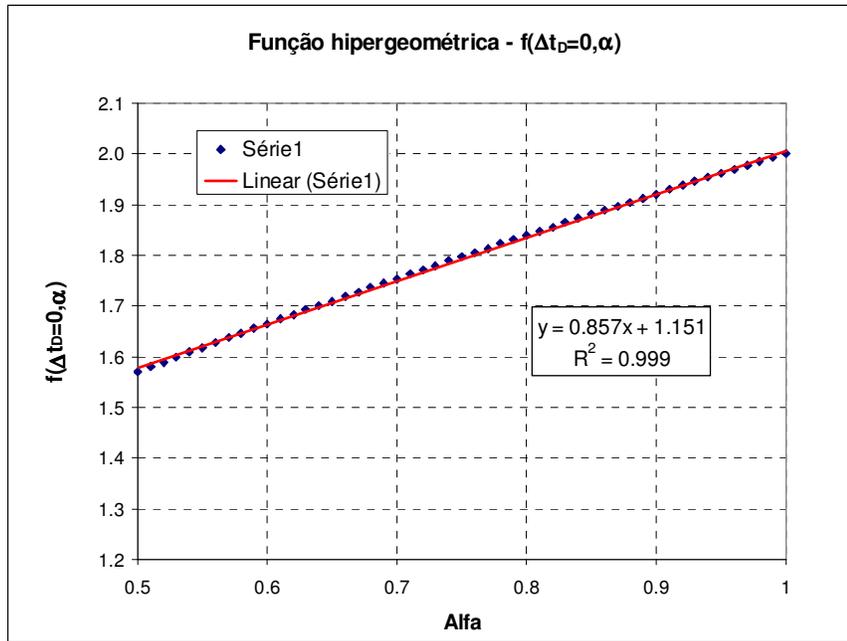


Figura 5.1 – Gráfico da função  $f(\Delta t_D=0, \alpha)$ .

8. Utilização de uma aproximação para o produto  $\exp(\beta^2).erfc(\beta)$  empregado no balanço de massa de Carter: Lembrando que a aplicação do modelo foi realizada no Excel, foi necessária a utilização de uma aproximação para o produto citado em função dos limites de cálculo impostos por este *software*. O valor máximo no Excel do parâmetro  $\beta$  para o cálculo do  $\exp(\beta^2)$  é de 26,6, sendo apresentado um erro de cálculo para valores maiores que este. Já com relação a estimativa da função erro complementar, considerando que para valores positivos de  $\beta$  esta função tende a zero no infinito, o Excel já atribui o valor de zero para  $\beta$  maior ou igual a 6. Na medida em que a multiplicação de um valor muito grande por um valor muito pequeno pode apresentar um resultado diferente de zero, foi utilizada uma aproximação para o cálculo deste produto nos casos necessários, sabendo-se que esta é válida para  $\beta \gg 1$  [13]:

$$\exp(\beta^2).erfc(\beta) \cong \frac{1}{\beta\sqrt{\pi}} \tag{5.5}$$

### 5.3. Parâmetros calculados

Nos resultados serão apresentados quatro tipos de modelos: o modelo original de Valkó & Oligney, o modelo de Valkó & Oligney ajustado, o modelo combinado desenvolvido e o modelo de propagação utilizado no modelo combinado (balanço de massa de Carter). Em função destes quatro modelos, os resultados apresentam diferentes raios de fratura para a geometria radial, diferentes comprimentos de fratura para as geometrias KGD e PKN e diferentes aberturas de fratura. Para uma melhor explicação destes parâmetros, todos seguem definidos na listagem a seguir:

1) Raio e/ou comprimento da fratura

- Rp orig: Raio da fratura calculado com o modelo original de Valkó & Oligney (geometria radial);
- Rp: Raio da fratura calculado com o modelo de Valkó & Oligney ajustado, isto é, utiliza o expoente  $\alpha$  obtido na análise do declínio de pressão do minifrac e considera o método de Tartaglia completo para a resolução da equação do terceiro grau (geometria radial);
- Rh orig: Raio hidráulico definido pelo modelo de Valkó & Oligney original (geometria radial);
- Rh alfa: Raio hidráulico definido pelo modelo de Valkó & Oligney ajustado, pois utiliza o expoente  $\alpha$  obtido na análise do declínio de pressão do minifrac;
- Rh: Raio hidráulico definido pelo modelo de Valkó & Oligney ajustado, isto é, além de considerar o expoente  $\alpha$  obtido na análise do declínio de pressão do minifrac, utiliza o método de Tartaglia completo para a resolução da equação do terceiro grau (geometria radial);
- Rcomb e/ou xcomb: Raio e/ou comprimento da fratura calculado com o modelo combinado, isto é, com o modelo desenvolvido que combina o modelo de Valkó & Oligney ajustado e expandido para outras geometrias com um modelo de propagação de fratura;
- Rh comb e xfh comb: Raio ou comprimento hidráulico da fratura no modelo combinado, sendo o máximo raio ou comprimento ao longo do tempo calculado a partir do modelo de propagação da fratura estabelecido pelo balanço de massa de Carter, que foi

incorporado ao Modelo de Valkó & Oligney no desenvolvimento do modelo combinado.

## 2) Abertura da fratura

- wp: Abertura da fratura calculada utilizando a área empacotada do modelo de Valkó & Oligney ajustado, isto é, a área calculada com Rp.
- wh orig: Abertura da fratura calculada utilizando a área hidráulica do modelo original de Valkó & Oligney, isto é, a área calculada com Rh orig.
- wh: Abertura da fratura calculada utilizando a área hidráulica do modelo de Valkó & Oligney ajustado, isto é, a área calculada com Rh.
- wcomb: Abertura da fratura calculada com o modelo combinado, utilizando a área hidráulica do modelo combinado.

## 5.4. Estudos de caso - metodologia

Utilizando os dados de oito operações de *fracpack*, o modelo desenvolvido para cada geometria foi testado e seus resultados foram comparados aos resultados de *softwares* comerciais.

Para cada operação, utilizando uma geometria de fratura tridimensional e os registros do tratamento, foi realizado o ajuste de pressão no *software* comercial pseudo 3D (P3D). A calibração do simulador permitiu a reprodução das pressões observadas no campo e, desta forma, foi possível definir as características da fratura executada e também estimar o coeficiente de filtração a ser utilizado no modelo desenvolvido. As características da fratura como comprimento, abertura, concentração do agente de sustentação na fratura e eficiência são as respostas do simulador comercial que foram comparadas aos resultados obtidos com a interpretação da curva de pressão de fundo realizada pelo modelo desenvolvido. Para as simulações com o modelo desenvolvido foi utilizado o *software* Excel com recursos VBA (*Visual Basic for Applications*). Já o simulador comercial utilizado na calibração do modelo e na estimativa do coeficiente de filtração foi o MFrac da Meyer & Associates. O simulador Stimplan também foi utilizado na comparação dos resultados, mas cabe ressaltar que o ajuste de pressão não foi realizado neste simulador de forma a manter uma

coerência nos dados de entrada, ou seja, para cada simulação foram mantidos os mesmos dados, os quais foram obtidos no ajuste de pressão realizado no *software* MFrac. Desta forma, os resultados previstos pelo simulador 3D podem ou não ser uma boa representação da fratura final executada, devendo esta avaliação ser efetuada por meio de uma comparação entre a pressão simulada e a pressão obtida no campo durante o tratamento. O simulador MinFrac da Meyer & Associates também foi utilizado para a análise do declínio de pressão do minifrac, auxiliando na definição da pressão de fechamento e na eficiência do teste de calibração para a estimativa do expoente  $\alpha$ . Vale ressaltar que estes simuladores estão entre os melhores simuladores comerciais para fraturamento disponíveis na indústria atualmente.

Para a calibração do simulador MFrac é necessária a escolha do ponto de iniciação da fratura, sendo duas as opções: iniciação da fratura no intervalo canhoneado ou iniciação da fratura no ponto de menor tensão. Considerando as duas opções de iniciação da fratura, foram gerados dois ajustes de pressão para cada operação de *fracpack*. Com estas duas calibrações do simulador foram obtidos dois coeficientes de filtração distintos para serem utilizados no modelo e também duas geometrias de fratura distintas para serem comparadas aos resultados obtidos com os modelos desenvolvidos e com o simulador 3D. Os resultados alcançados na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado foram comparados aos resultados dos modelos desenvolvidos para as três geometrias, isto é, radial, PKN e KGD. Já os resultados obtidos no simulador comercial na condição de iniciação da fratura na menor tensão foram comparados apenas aos resultados do modelo desenvolvido para a geometria radial. Esta segunda condição de iniciação da fratura foi considerada devido à teoria aplicada à geometria radial na qual a fratura se inicia em um ponto e se propaga radialmente, sem encontrar barreiras. No caso do simulador 3D, é possível escolher o ponto de iniciação da fratura pela definição de um intervalo de profundidade. Nestas condições, as simulações foram adaptadas caso a caso de forma a tornar possível a comparação entre os resultados.

Outro ponto importante a ser ressaltado é que nos *softwares* comerciais a simulação inclui o período do declínio de pressão, isto é, do fechamento da fratura depois de cessado o bombeio. No entanto, o modelo desenvolvido apenas prevê as características da fratura até o final do bombeio, já que depende do registro de pressão que é geralmente finalizado ao término da operação. Desta forma, na medida do possível, as comparações feitas entre as simulações ficarão restritas ao período de bombeio.

A apresentação dos resultados será feita inicialmente através de uma tabela e de gráficos que mostrarão um resumo dos parâmetros da fratura calculados pelo modelo desenvolvido para cada geometria e pelos *softwares* comerciais. Serão apresentados os seguintes parâmetros:

- Raio ou comprimento da fratura ao final do bombeio, sendo este igual ao raio ou comprimento hidráulico da fratura;
- Máximo raio ou comprimento de empacotamento da fratura. Como o modelo desenvolvido analisa os dados de campo ponto a ponto, o que gera um resultado com grande dispersão, utilizou-se uma linha de tendência no formato de uma equação do segundo, terceiro ou quarto grau para avaliar o máximo raio ou comprimento de empacotamento da fratura;
- Concentração do agente de sustentação no poço ao final do bombeio;
- Abertura média da fratura ao final do bombeio. Conforme mencionado para o máximo raio de empacotamento, como o modelo utiliza os dados de campo ponto a ponto obtendo um resultado com grande dispersão, foi considerada uma linha de tendência linear para a avaliação da abertura média da fratura ao final do bombeio;
- Eficiência da fratura ao final do bombeio, também avaliada por meio de uma linha de tendência linear.

De forma a não tornar a apresentação dos resultados repetitiva e assim permitir uma análise mais profunda dos melhores resultados, foram selecionados três índices a partir dos parâmetros apresentados anteriormente para a escolha do melhor modelo desenvolvido. Através de uma análise do erro quadrático, ou seja, utilizando a diferença quadrada entre os índices medidos nos modelos desenvolvidos e nos *softwares* comerciais, é possível definir o modelo desenvolvido responsável pela melhor previsão para o *software* Meyer e o modelo desenvolvido responsável pela melhor previsão para o *software* Stimplan. Os índices escolhidos foram:

- Índice para a avaliação do raio ou comprimento da fratura: utilizando uma linha de tendência no formato de uma equação do segundo, terceiro ou quarto grau, o máximo raio ou comprimento de empacotamento da fratura foi obtido para cada geometria do modelo desenvolvido e foi comparado ao raio ou comprimento final da fratura obtido pelos *softwares* comerciais. Vale ressaltar que o modelo desenvolvido possui um raio ou comprimento hidráulico que pode crescer, mas não diminuir, e um raio ou comprimento de empacotamento, que após atingir um valor máximo tem a tendência

de reduzir, empacotando a fratura na direção do poço. Para a definição do índice foi assumido que o raio ou comprimento do modelo desenvolvido que mais se aproxima da resposta obtida nos simuladores é o máximo raio ou comprimento de empacotamento da fratura, já que nos *softwares* comerciais, o raio ou comprimento final é aquele onde ocorre o bloqueio da fratura para início do TSO, sendo esta a característica do raio de empacotamento do modelo desenvolvido;

- Índice para a avaliação da concentração do agente de sustentação na fratura: foi utilizado o valor da concentração do agente de sustentação no poço para esta avaliação;
- Índice para a avaliação da geometria da fratura ao final do bombeio: Como os modelos foram desenvolvidos com geometrias 2D de fratura, a altura já era um parâmetro conhecido, sendo necessária a estimativa da abertura e do comprimento da fratura pelo modelo desenvolvido. Para a avaliação destes parâmetros foi formado um índice geométrico, sendo este a razão entre a abertura média ao final do bombeio e o raio ou comprimento da fratura ao final do bombeio. Conforme já mencionado, para a definição da abertura média da fratura foi utilizada uma linha de tendência linear nos pontos calculados. Com relação ao raio ou comprimento da fratura, vale ressaltar que este é o máximo raio ou comprimento hidráulico atingido. Apesar da resposta do simulador ser mais bem representada pelo raio ou comprimento de empacotamento da fratura, optou-se também pela criação de um índice que utilize o raio ou comprimento hidráulico da fratura já que este parâmetro faz parte do modelo, determinando, entre outros, o raio ou comprimento final da curva de distribuição do agente de sustentação. Além disso, espera-se que na prática o raio ou comprimento de empacotamento máximo seja próximo do valor encontrado para o raio ou comprimento hidráulico da fratura, caracterizando um empacotamento iniciado próximo do final da fratura.

Para cada índice será realizada uma análise de erros através da diferença quadrada entre os resultados dos modelos desenvolvidos com o resultado do simulador Meyer e entre os resultados dos modelos desenvolvidos com o resultado do simulador Stimplan. O resultado que apresentar o menor erro quadrático será indicado como o melhor modelo segundo aquele índice. Será escolhido o melhor modelo final aquele que for indicado mais vezes pelos índices, sendo selecionado o melhor modelo para a previsão dos resultados do

Meyer e o melhor modelo para a previsão dos resultados do Stimplan, conforme o esquema apresentado na tabela 5.1.

Comparação dos resultados através dos índices: raio da fratura, concentração do agente de sustentação no poço e índice geométrico.				
Condição de iniciação da fratura			Seleção do melhor modelo	
Intervalo canhoneado	Tensão mínima			
Meyer	X	Modelo desenvolvido: geometria radial Modelo desenvolvido: geometria KGD Modelo desenvolvido: geometria PKN	Meyer X Modelo desenvolvido: geometria radial	Modelo mais indicado pelos índices = melhor modelo para a previsão dos resultados do Meyer
Stimplan	X	Modelo desenvolvido: geometria radial Modelo desenvolvido: geometria KGD Modelo desenvolvido: geometria PKN	Stimplan X Modelo desenvolvido: geometria radial	Modelo mais indicado pelos índices = melhor modelo para a previsão dos resultados do Stimplan

Tabela 5.1 – Metodologia para a escolha do melhor modelo para a previsão dos resultados dos simuladores Meyer e Stimplan.

Caso ocorra um empate entre estes três índices, isto é, caso cada índice indique um modelo diferente, será considerado como o melhor modelo aquele que estiver sendo indicado pelo índice de avaliação do raio ou comprimento da fratura. As respostas obtidas com os melhores modelos serão apresentadas por meio dos seguintes gráficos: concentração do agente de sustentação versus o raio ou comprimento da fratura no final do bombeio; raio ou comprimento da fratura ao longo do tempo; abertura da fratura ao longo do tempo e eficiência ao longo do tempo. No caso do *fracpack A*, por ser o primeiro, serão mostrados os resultados de todos os modelos desenvolvidos.

### 5.5. *Fracpack A*

Esta operação foi executada em lâmina d' água de 1853 m, em um arenito cujo topo encontra-se na profundidade de 3367 m, apresentando 58 m de espessura e 45 m de intervalo canhoneado. A permeabilidade estimada para a formação é de 250 mD, seu módulo de elasticidade é de  $1,12 \times 10^6$  psi ( $7,72 \times 10^3$  MPa) e seu coeficiente de Poisson é 0,35. A temperatura na superfície foi

estimada em 23°C enquanto a temperatura no reservatório é de 50°C. O fluido utilizado no tratamento possui uma carga polimérica de 35 lb/Mgal e, utilizando a média das temperaturas da superfície e do reservatório, foram escolhidos os parâmetros reológicos do fluido do tratamento a serem utilizados no modelo, sendo estes:  $n$  igual a 0,4485 e  $K$  igual a 0,1774 lbf.s<sup>n</sup>/ft<sup>2</sup>. O agente de sustentação bombeado foi areia, sendo sua massa específica igual a 2,648 g/cm<sup>3</sup>.

### **5.5.1. Calibração do modelo**

#### **5.5.1.1. Iniciação da fratura no intervalo canhoneado**

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial MFrac na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, sendo obtido um coeficiente de filtração igual a 0,0058 ft/min<sup>1/2</sup>. As figuras 5.2 e 5.3 mostram as curvas de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* comercial MFrac após a calibração do modelo. Já a figura 5.4 apresenta, além do perfil litológico e de tensões, a geometria final estimada para a fratura, cujo comprimento foi de 21 m e a altura de aproximadamente 55 m.

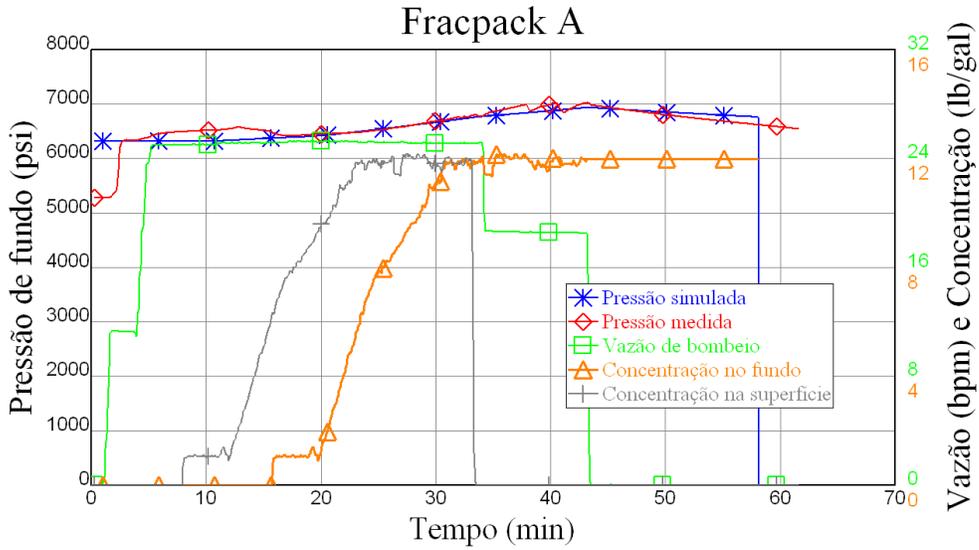


Figura 5.2 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack A* em unidades de campo na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

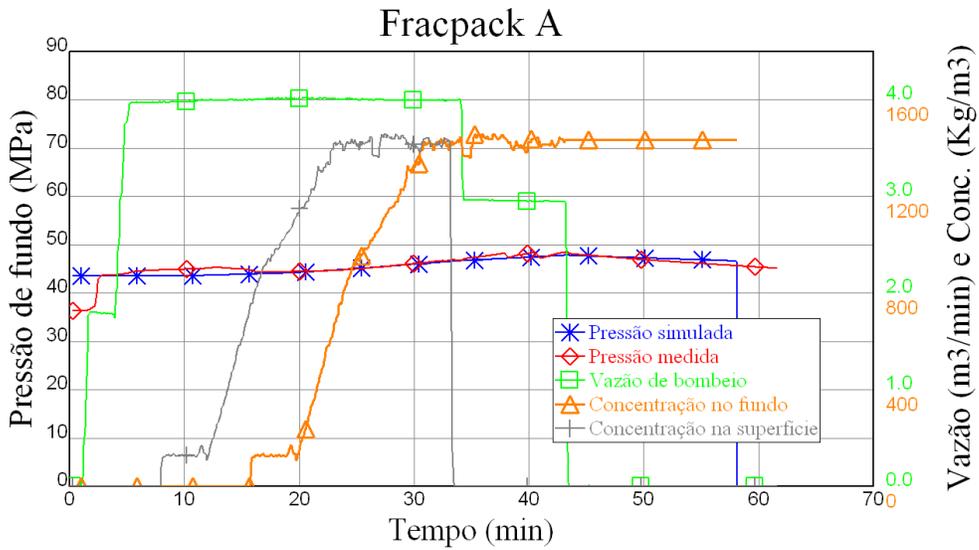


Figura 5.3 - Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack A* em unidades do sistema internacional na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

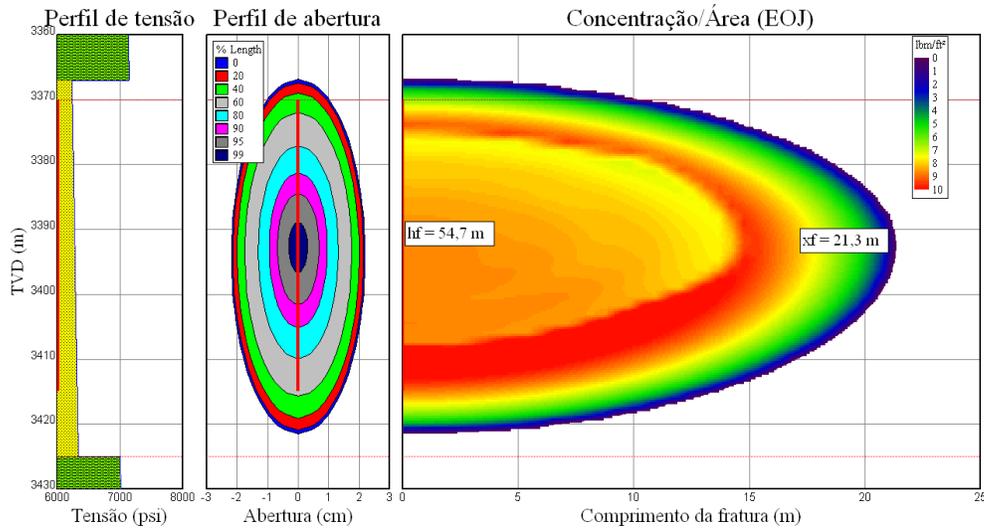


Figura 5.4 – Simulação da fratura executada no *fracpack A no software Meyer* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software MFrac*, foi feita uma simulação no *software* comercial Stimplan considerando a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. A figura 5.5 apresenta a pressão medida no campo e a pressão simulada pelo Stimplan em termos de *net pressure* e a figura 5.6 mostra a geometria final da fratura estimada pelo *software* 3D nesta condição, apresentando um comprimento de 28 m e altura de 59 m. É possível observar que foi obtido um bom ajuste de pressão no simulador 3D e desta forma pode-se dizer que os dois simuladores estão calibrados.

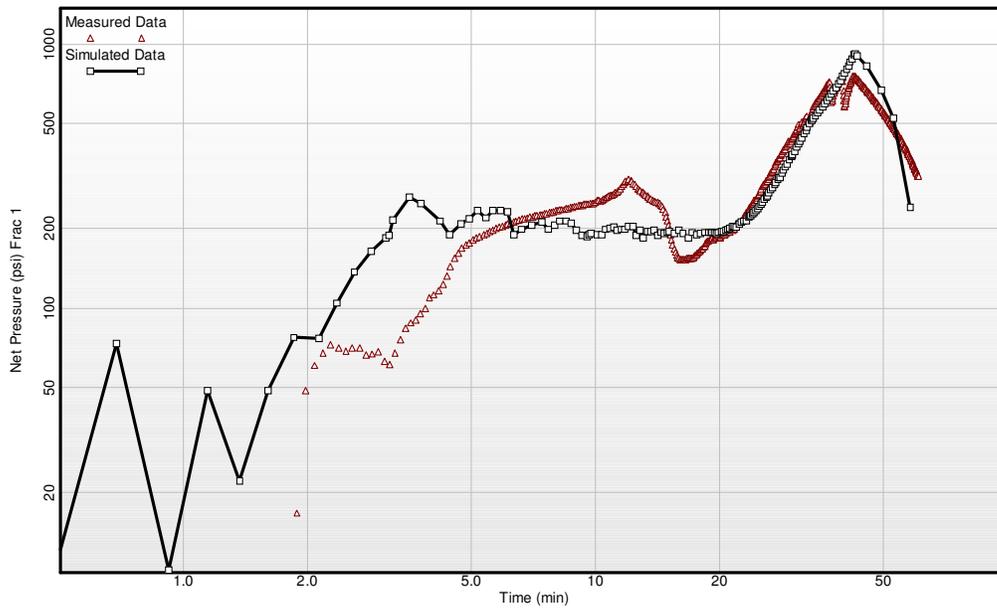


Figura 5.5 – Simulação do *fracpack A* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

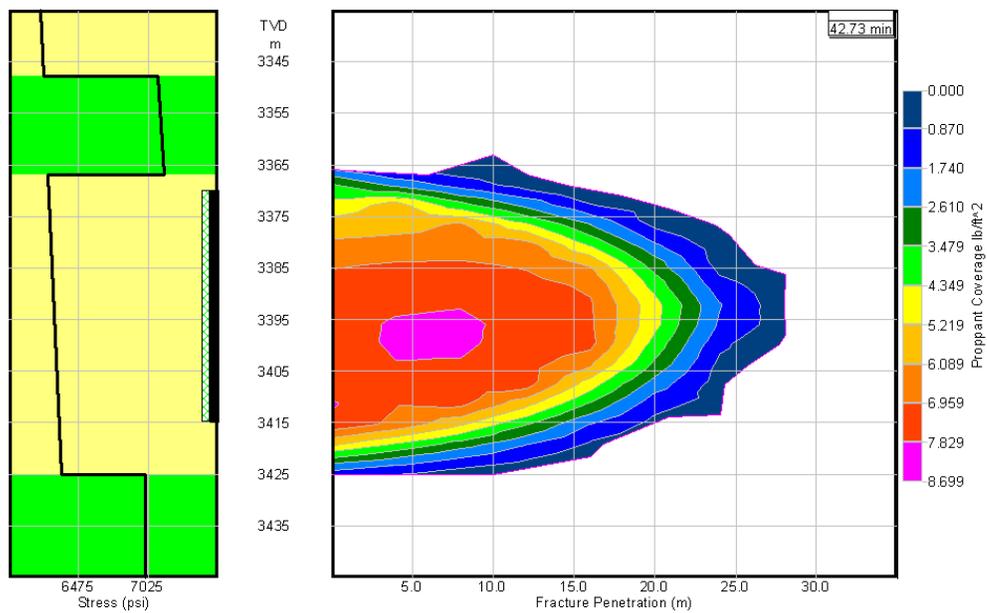


Figura 5.6 – Estimativa da geometria da fratura executada no *fracpack A* utilizando o *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

### 5.5.1.2. Iniciação da fratura na menor tensão

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial MFrac na condição de iniciação da fratura na menor tensão,

sendo obtido um coeficiente de filtração igual a  $0,00475 \text{ ft}/\text{min}^{1/2}$ . A figura 5.7 mostra as curvas de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* comercial MFrac após a calibração do modelo para esta condição. Já a figura 5.8 apresenta a geometria final estimada para a fratura com um comprimento de 33 m e altura de 43,6 m, além do perfil litológico e de tensões.

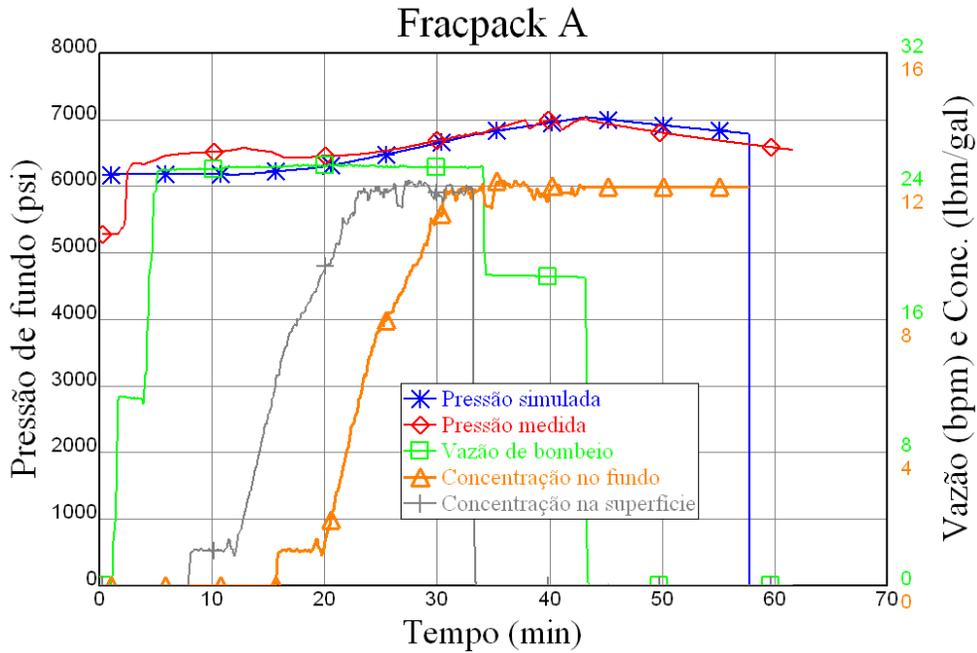


Figura 5.7 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack A* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

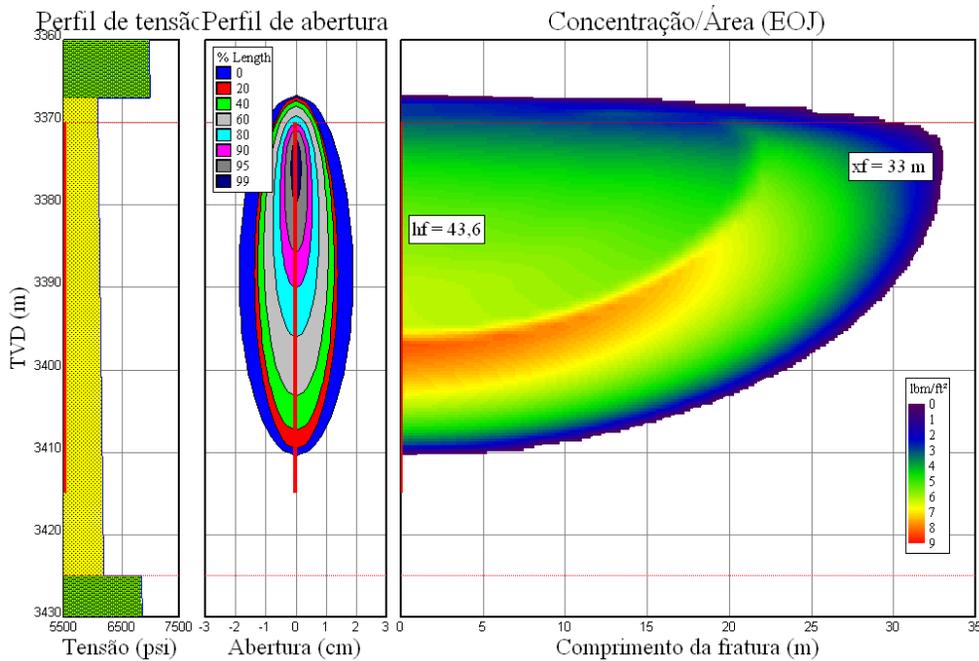


Figura 5.8 – Simulação da fratura executada no *fracpack A* no *software Meyer* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software MFrac*, foi feita uma simulação no *software* comercial Stimplan considerando a condição de iniciação da fratura na menor tensão. A figura 5.9 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo Stimplan. Já a figura 5.10 mostra a geometria final da fratura estimada pelo *software 3D* nesta condição, apresentando um comprimento de 32 m e altura de 59 m. Apesar da pressão estimada pelo simulador Stimplan não ter ficado tão semelhante ao registro de campo, como foi observado na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, o modelo também foi considerado calibrado nesta condição.

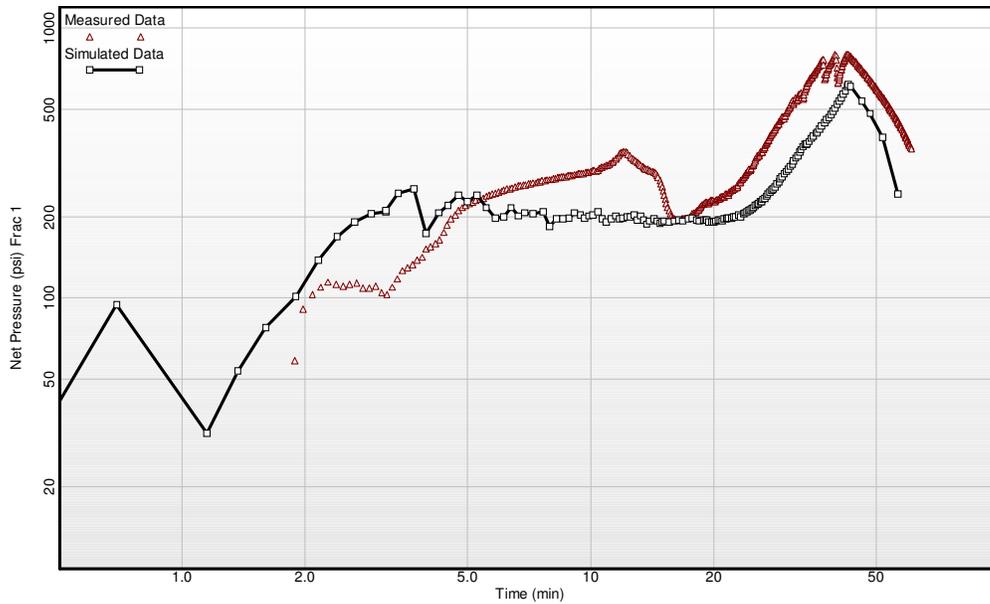


Figura 5.9 – Simulação do *fracpack A* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

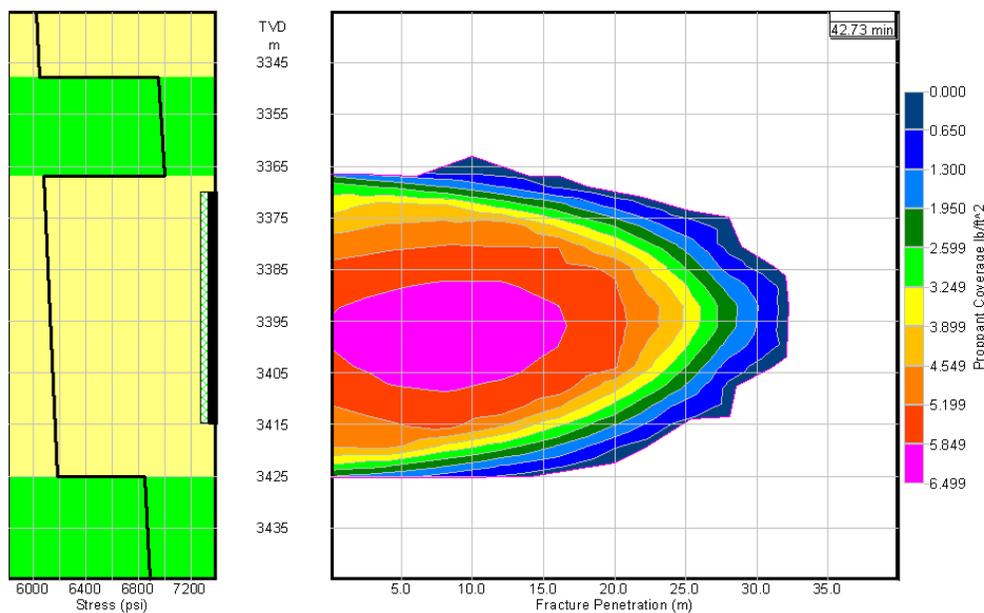


Figura 5.10 – Estimativa da fratura executada no *fracpack A* utilizando o *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

### 5.5.2. Resultados e escolha do melhor modelo

Utilizando os dados do declínio de pressão do minifrac foi possível definir o tempo de fechamento da fratura sendo este igual a 10,2 min. Desta forma foi

obtida uma eficiência do minifrac em torno de 46% e conseqüentemente os expoentes  $\alpha$  estimados para cada geometria foram: 0,63 para a geometria radial, 0,54 para a geometria KGD e 0,61 para a geometria PKN. Com estas informações e conhecendo-se o coeficiente de filtração nas duas condições de iniciação da fratura, a pressão de fundo registrada durante a operação de *fracpack* pode ser interpretada utilizando os modelos desenvolvidos para cada geometria. Cabe ressaltar que nas geometrias PKN e KGD a altura da fratura foi assumida como igual à espessura do reservatório. A tabela 5.2 e as figuras, 5.11 e 5.12, apresentam um resumo dos resultados obtidos com os modelos desenvolvidos e com os simuladores comerciais.

Fracpack A - Resultados						
Modelo		R ou xf final	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	w médio final	Eficiência final
		(m)	(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm)	(%)
Desenvolvido	Radial - Canh	34,3	27,0	8,51	3,12	25,0
	Radial - Sh	37,0	28,8	7,90	2,79	23,0
	KGD	32,4	19,5	8,53	3,02	24,0
	PKN	31,4	17,3	15,30	3,79	12,0
Simuladores Comerciais	Meyer - Canh	21,3	21,3	7,60	3,25	39,0
	Meyer - Sh	33,0	33,0	6,60	2,61	39,0
	Stimplan - Canh	28,1	28,1	6,30	1,98	35,0
	Stimplan - Sh	32,2	32,2	4,90	1,68	35,0

Tabela 5.2 – Resumo dos resultados obtidos a partir da interpretação dos registros do *fracpack A*.

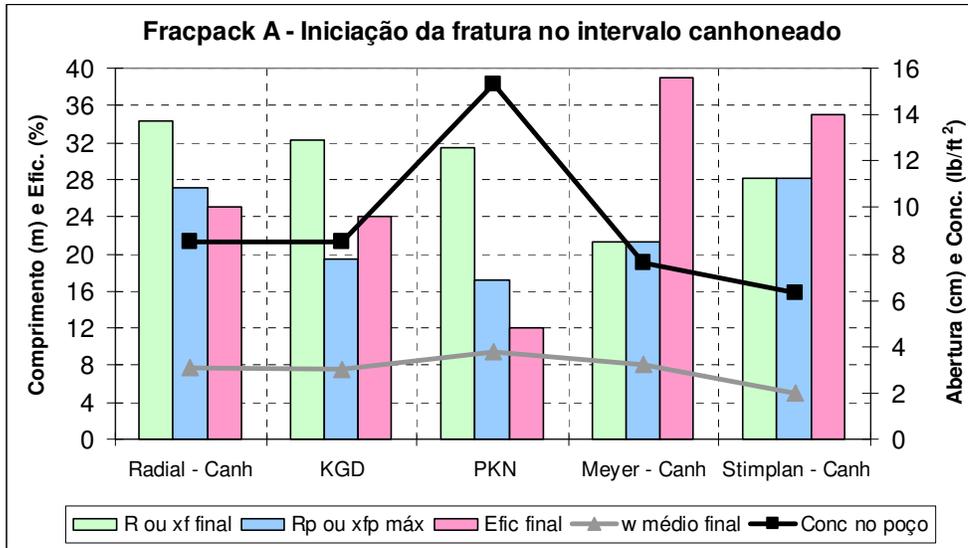


Figura 5.11 – Resultados obtidos para o *fracpack A* com os modelos desenvolvidos e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

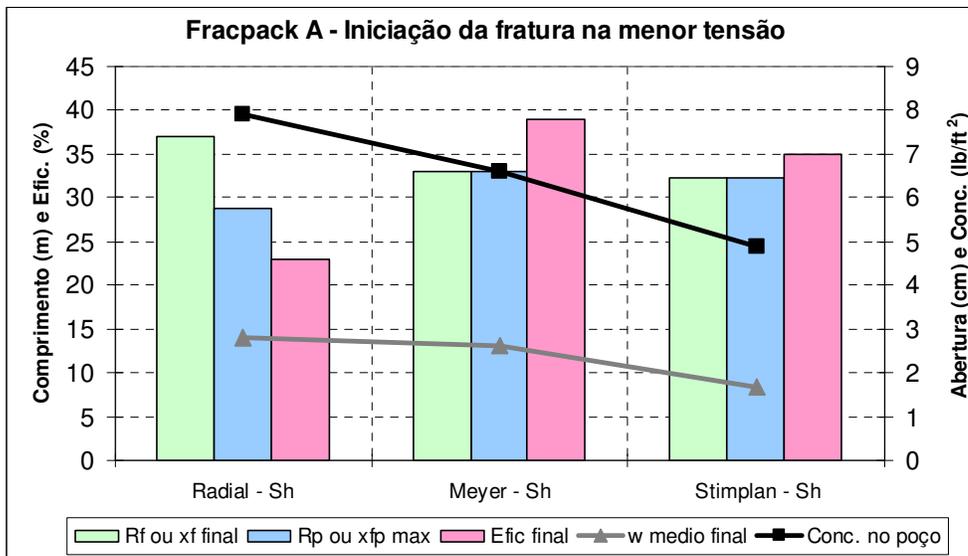


Figura 5.12 – Resultados obtidos para o *fracpack A* com o modelo desenvolvido e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Os gráficos com os resultados das simulações estão apresentados nas figuras 5.13 a 5.16 para a geometria radial com iniciação da fratura no intervalo canhoneado, 5.17 a 5.20 para a geometria radial com iniciação da fratura na menor tensão, 5.21 a 5.24 para a geometria KGD e 5.25 a 5.28 para a geometria PKN. Os resultados dos simuladores comerciais também são apresentados nos gráficos, lembrando que nestes simuladores foi considerada uma geometria 3D de fratura.

A) Geometria Radial – iniciação da fratura no intervalo canhoneado

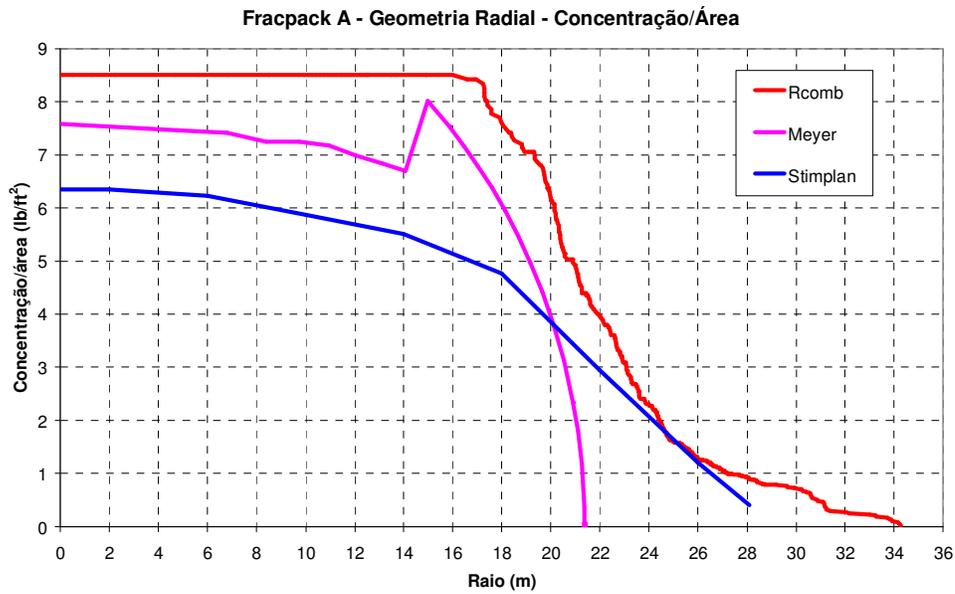


Figura 5.13 - Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura no final do bombeio do fracpack A, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

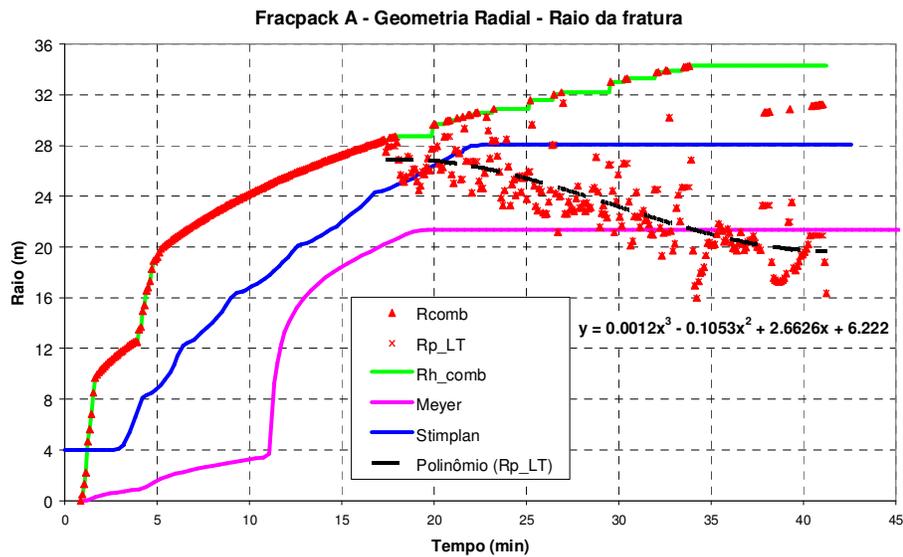


Figura 5.14 – Raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimado pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

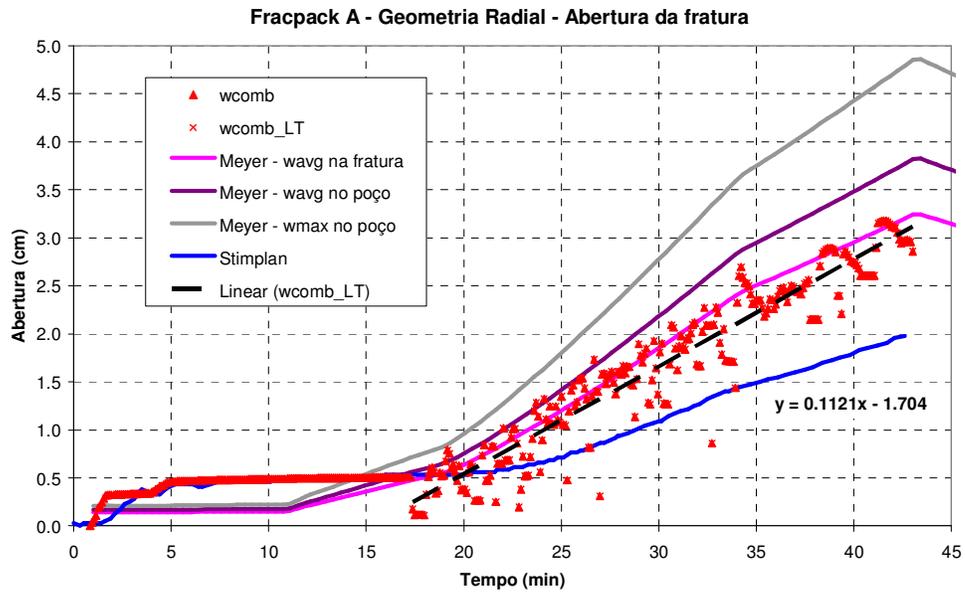


Figura 5.15 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

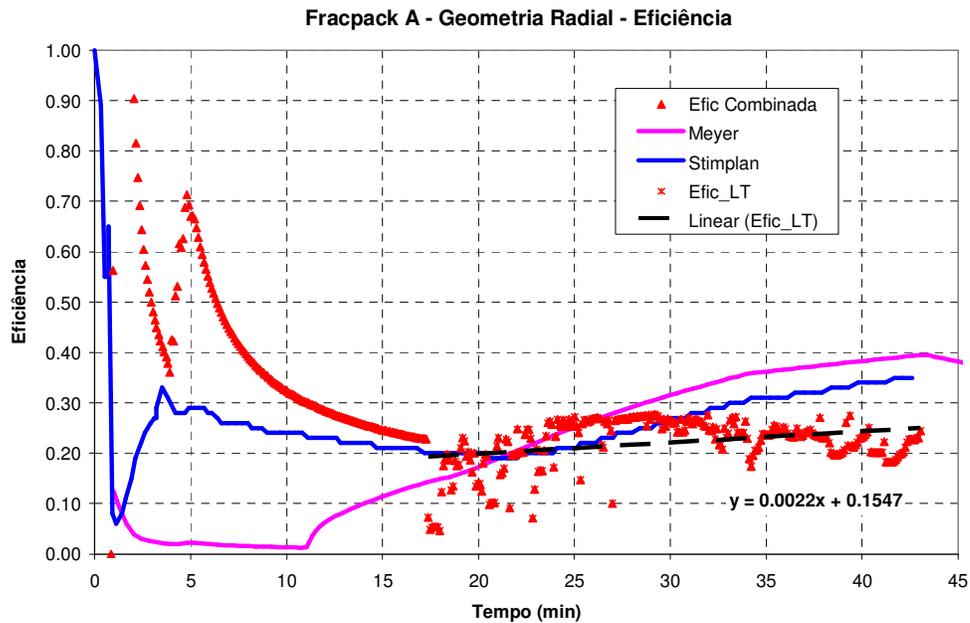


Figura 5.16 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

B) Geometria Radial – iniciação da fratura na menor tensão

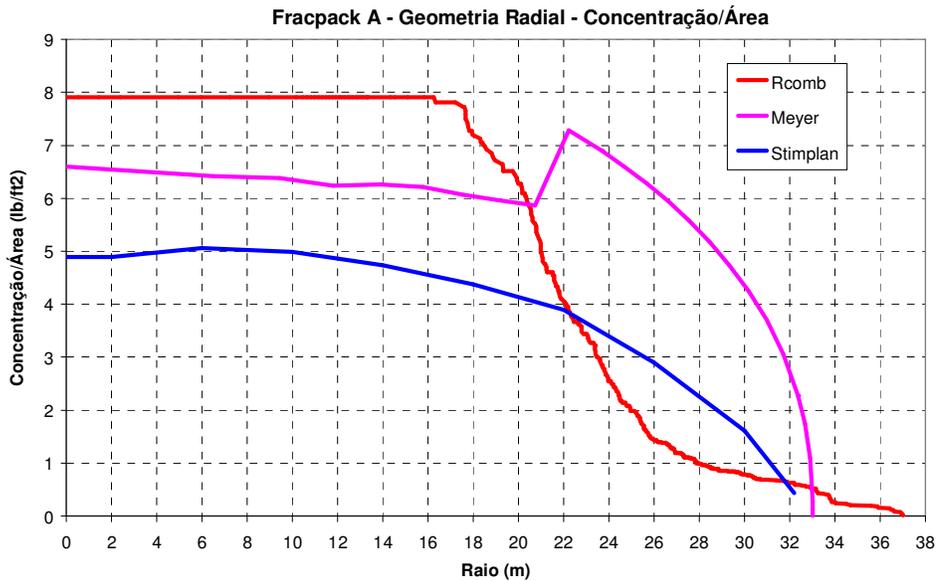


Figura 5.17 – Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura ao final do bombeio do *fracpack A*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

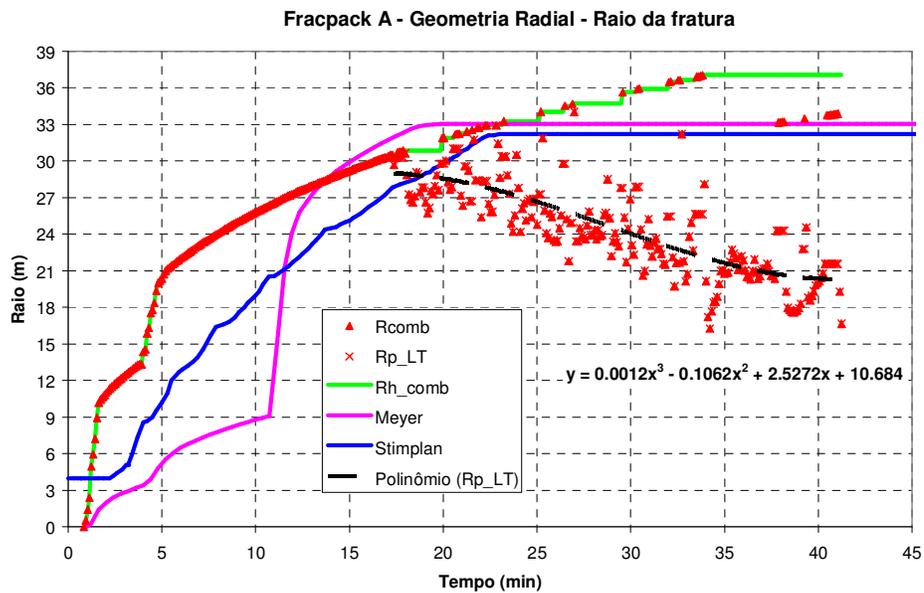


Figura 5.18 – Raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimado pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

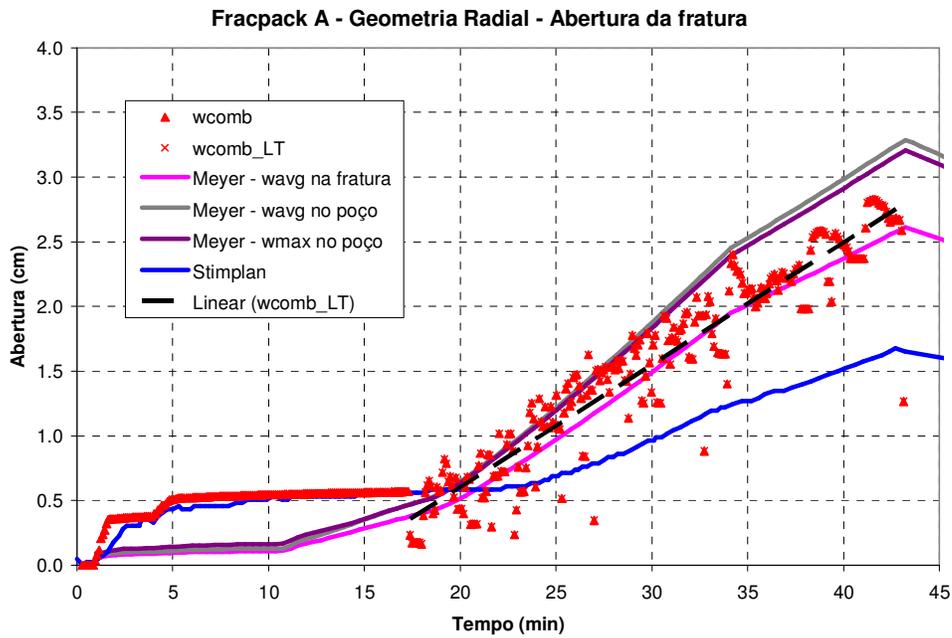


Figura 5.19 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

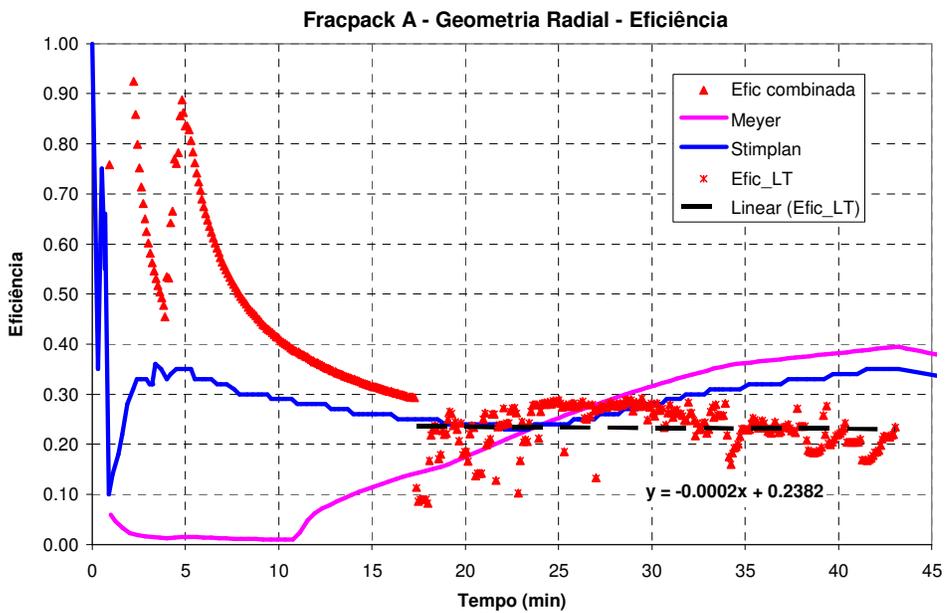


Figura 5.20 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

C) Geometria KGD

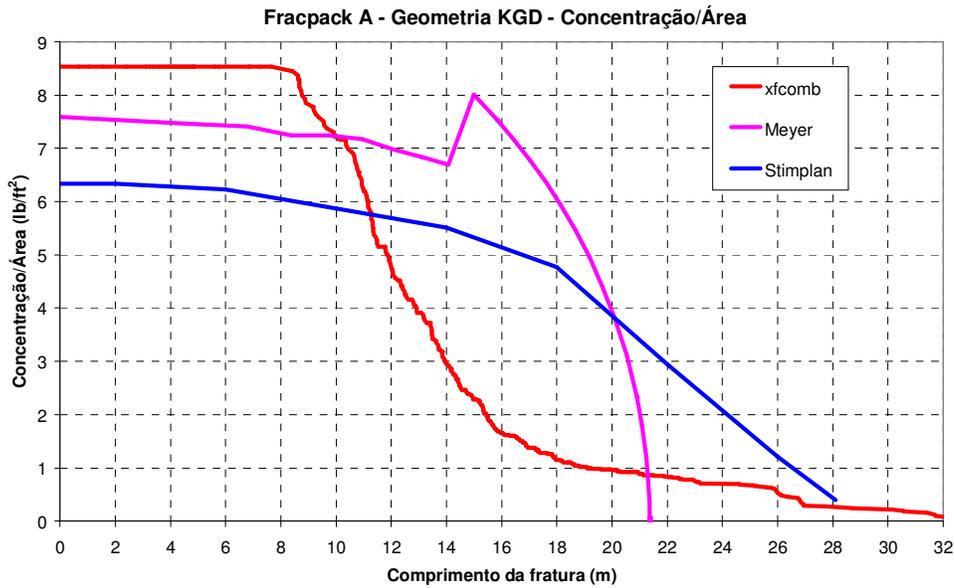


Figura 5.21 – Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do comprimento da fratura ao final do bombeio do *fracpack A*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria KGD.

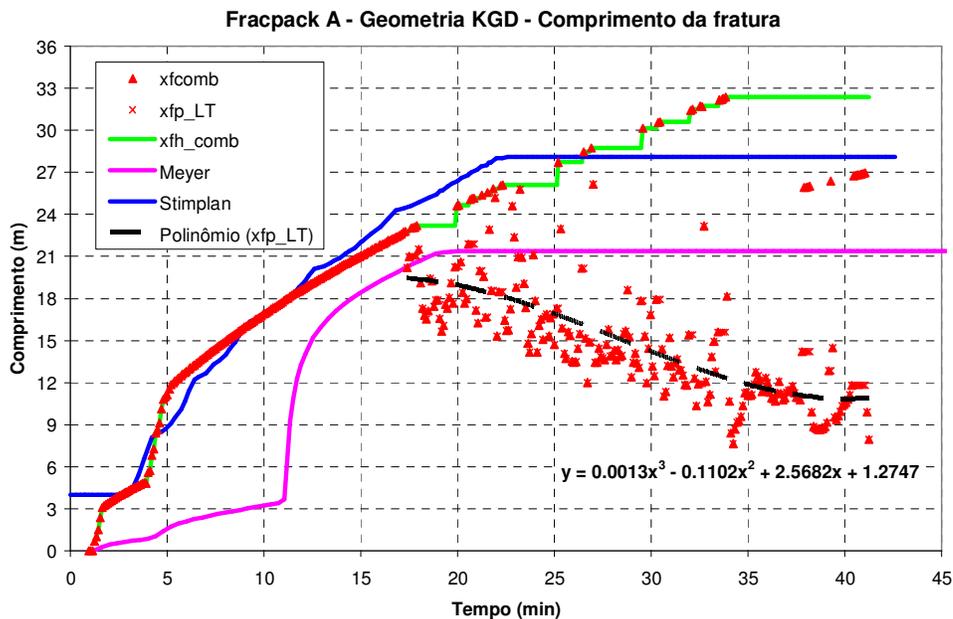


Figura 5.22 – Comprimento da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimado pelo modelo desenvolvido com a geometria KGD.

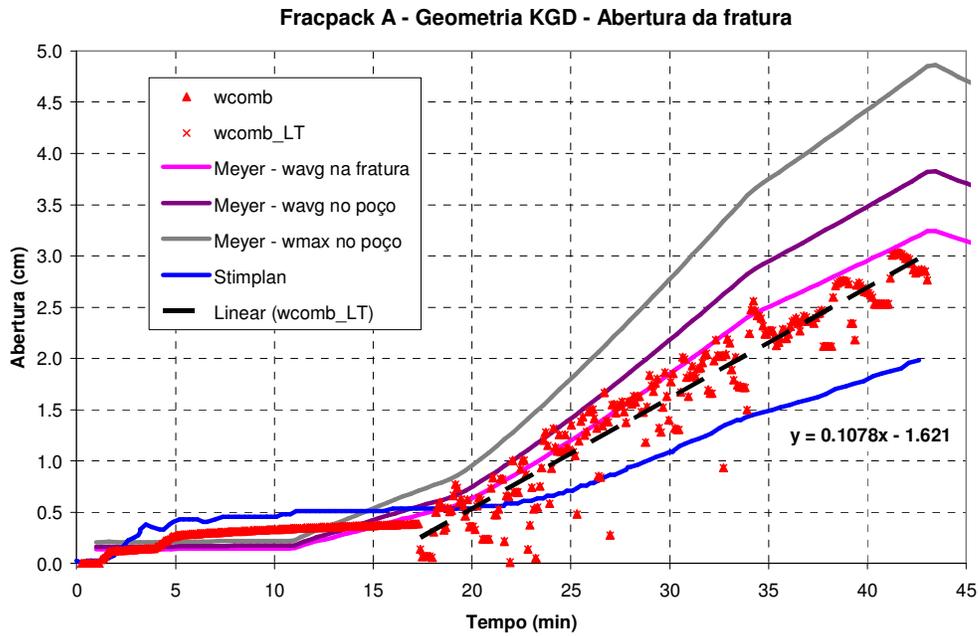


Figura 5.23 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria KGD.

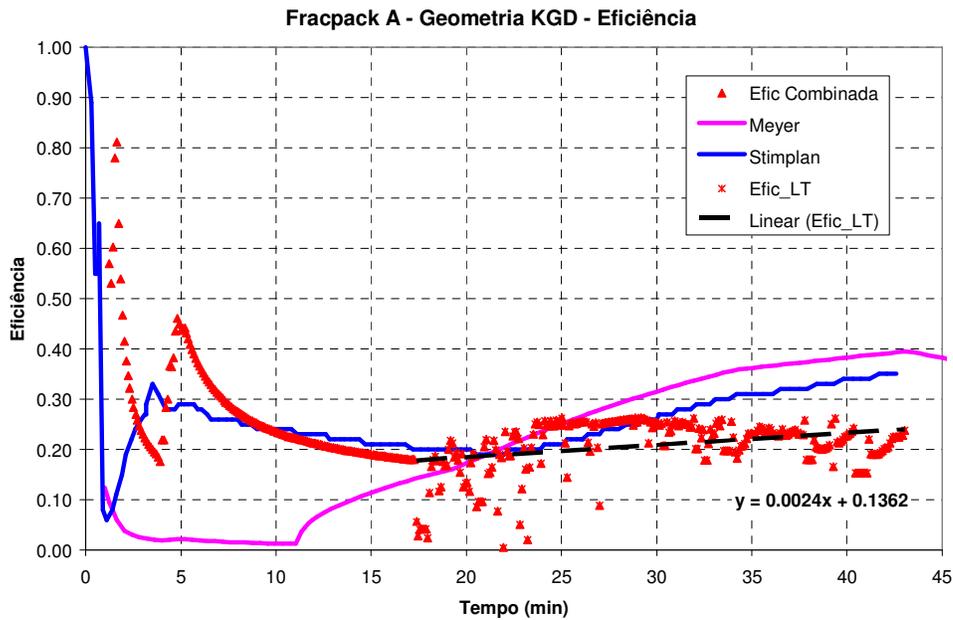


Figura 5.24 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria KGD.

D) Geometria PKN

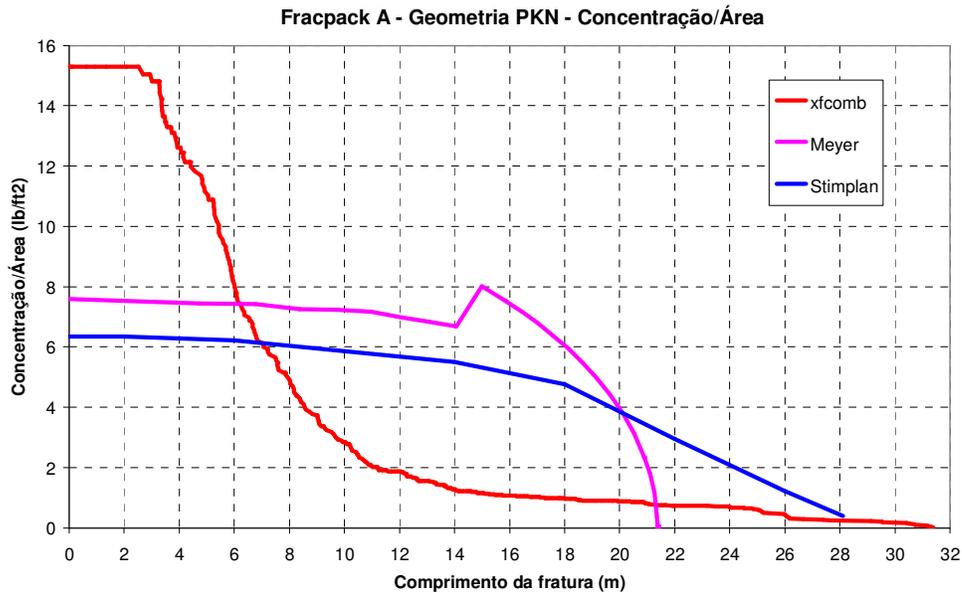


Figura 5.25 – Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do comprimento da fratura ao final do bombeio do *fracpack A*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria PKN.

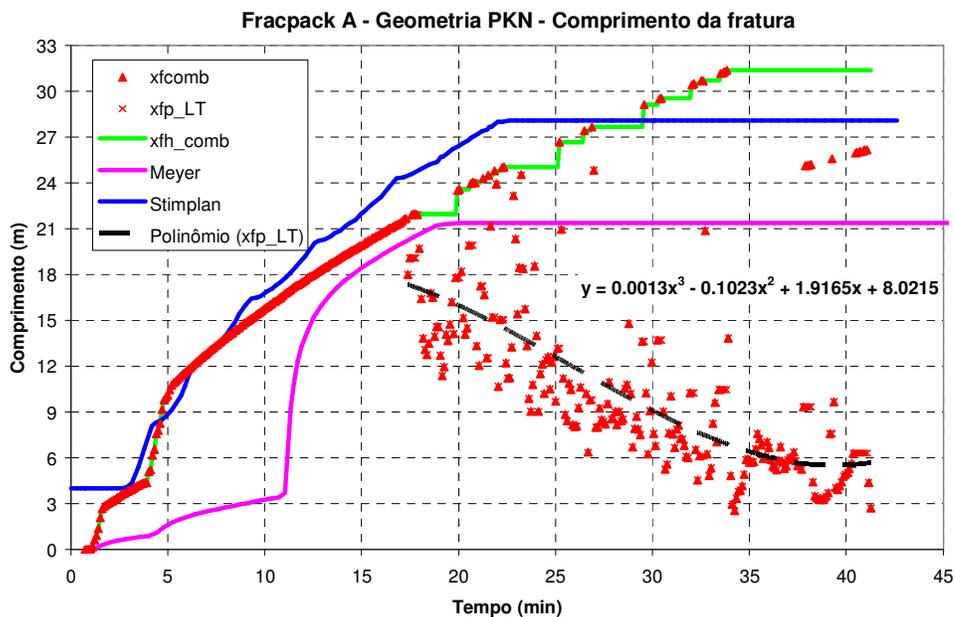


Figura 5.26 – Comprimento da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimado pelo modelo desenvolvido com a geometria PKN.

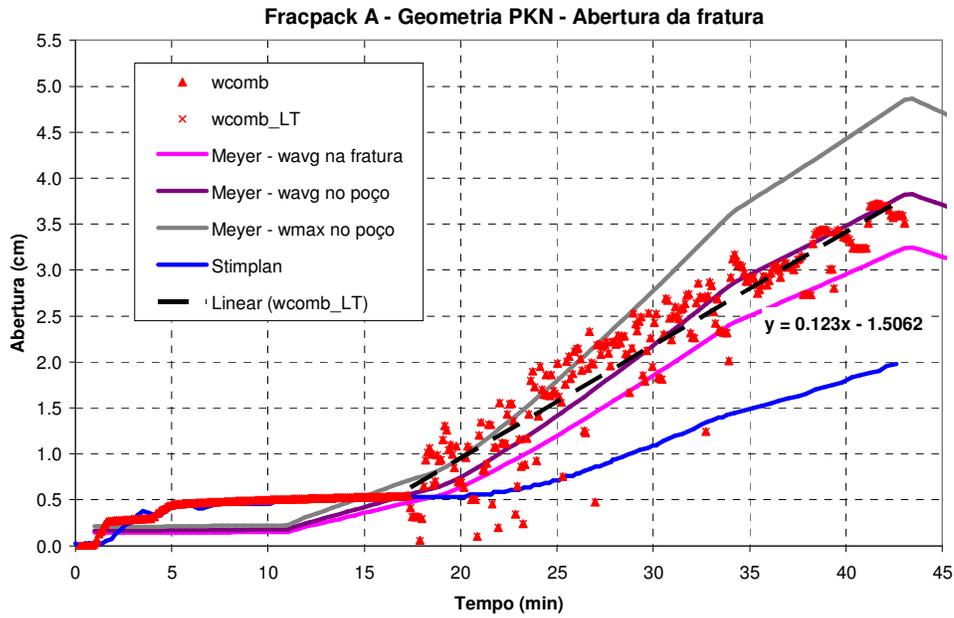


Figura 5.27 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria PKN.

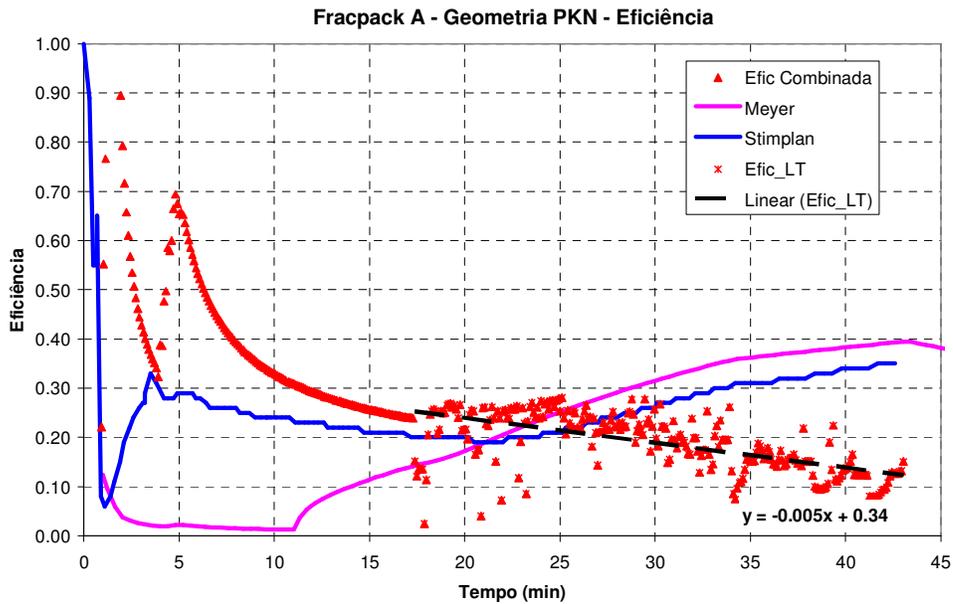


Figura 5.28 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack A*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria PKN.

Para a definição do melhor modelo de previsão dos resultados obtidos nos simuladores comerciais foi realizada uma análise de erros utilizando a diferença quadrada entre os índices definidos previamente. A tabela 5.3 apresenta esta comparação, ressaltando-se que os resultados dos modelos: Radial-

canhoneado, KGD e PKN foram comparados aos resultados dos simuladores na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e os resultados do modelo Radial-Sh foram comparados aos obtidos na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

<b>Fracpack A - Comparação entre os índices - Diferença quadrada</b>				
Modelo	Modelo desenvolvido x Simulador comercial	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	Índice geométrico
		(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm/m)
RADIAL Canh	Radial - Canh x Meyer	32,9	0,8	3,8E-03
	Radial - Canh x Stimplan	1,1	4,9	4,2E-04
RADIAL Sh	Radial - Sh x Meyer	17,4	1,7	1,4E-05
	Radial - Sh x Stimplan	11,4	9,0	5,4E-04
KGD	KGD x Meyer	3,4	0,9	3,5E-03
	KGD x Stimplan	74,8	5,0	5,2E-04
PKN	PKN x Meyer	16,4	59,3	1,0E-03
	PKN x Stimplan	117,7	81,0	2,5E-03
<b>Melhor previsão - MEYER:</b>		<b>KGD</b>	Radial Canh	Radial Sh
<b>Melhor previsão - Stimplan:</b>		<b>Radial Canh</b>	<b>Radial Canh</b>	<b>Radial Canh</b>

Tabela 5.3 – Comparação entre os índices dos modelos desenvolvidos com os obtidos nos simuladores comerciais para o *fracpack A*.

Observando a tabela 5.3 tem-se que o modelo que fez a melhor previsão dos resultados obtidos pelo simulador MFrac (Meyer) foi o modelo desenvolvido com a geometria KGD, seguindo a condição de que se cada índice indicasse um modelo diferente, seria escolhido como melhor modelo aquele referente ao raio ou comprimento da fratura. A análise de erros apresentada na tabela 5.3 também pode ser observada na figura 5.29, que mostra o resultado da comparação entre os modelos desenvolvidos e o simulador MFrac (Meyer), sendo que no caso da comparação entre os índices geométricos foi utilizado um fator de 10.000 em função da escala no gráfico.

Observando a figura, é fácil notar que os menores erros quadráticos de cada índice não se concentram em um único modelo, além disso, é possível descartar o modelo desenvolvido com a geometria PKN e com a geometria radial com iniciação da fratura no intervalo canhoneado por apresentarem os maiores erros quadráticos. Desta forma, restaram os modelos desenvolvidos com a geometria KGD e com a geometria radial com iniciação da fratura na menor

tensão, sendo o primeiro escolhido como o melhor modelo seguindo o critério estabelecido anteriormente.

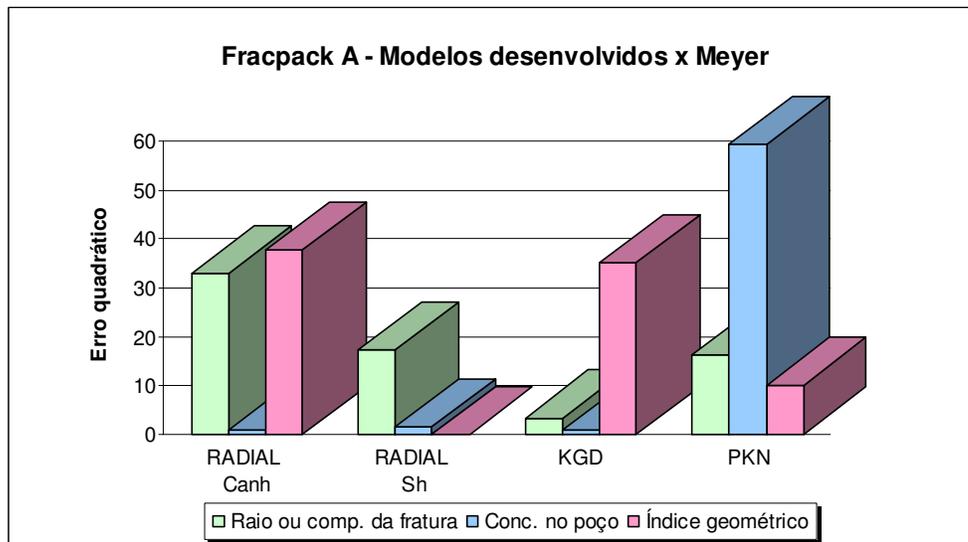


Figura 5.29 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador MFrac (Meyer) para o *fracpack A*.

Analisando a figura 5.21, que apresenta a distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do comprimento da fratura para o modelo desenvolvido com a geometria KGD e comparando seu resultado a curva do simulador MFrac, é possível observar que a concentração no poço estimada por estes dois modelos é bem semelhante, apresentando uma pequena diferença de  $0,9 \text{ lb/ft}^2$ , que se destaca positivamente no gráfico de barras da figura 5.29. Se as concentrações máximas fossem consideradas, a diferença reduziria ainda mais, ficando em  $0,5 \text{ lb/ft}^2$ , sabendo-se que a concentração máxima do modelo desenvolvido ocorrerá sempre no poço enquanto que o simulador MFrac pode apresentar concentrações maiores ao longo de todo o comprimento da fratura. Observando o formato da curva de distribuição do agente de sustentação, os resultados se distanciam a partir do comprimento de fratura próximo a 10 m, quando o modelo desenvolvido prevê uma queda mais acentuada da concentração do agente de sustentação, distribuindo essa massa em um comprimento de fratura final maior que o previsto pelo *software* comercial. Essa diferença no comprimento final pode ser identificada na comparação entre os índices geométricos na figura 5.29.

De acordo com a figura 5.22, boa semelhança pôde ser notada entre o máximo comprimento de empacotamento estimado pelo modelo desenvolvido

com a geometria KGD e o comprimento de empacotamento previsto pelo simulador Meyer, tanto em magnitude, cuja diferença é inferior a 2 m, quanto no tempo de início do empacotamento, que ocorre por volta de 19 min. Vale comentar que o modelo desenvolvido possui duas curvas distintas para representar o comprimento da fratura ao longo do tempo após o início do TSO. O empacotamento da fratura em direção ao poço é mostrado pelos triângulos vermelhos que vão reduzindo com o tempo. Já a propagação da fratura nos períodos onde ocorre o declínio de pressão é representada pelos triângulos vermelhos sobrepostos à curva verde, a qual é resultado do modelo de propagação, definindo o comprimento hidráulico. Nota-se que, ao final do bombeio, o comprimento hidráulico apresenta uma diferença de 11 m em relação ao comprimento final estimado pelo MFrac. Conforme já mencionado, esta diferença fica evidenciada no gráfico de barras da figura 5.29, pois a análise de erros em relação ao índice geométrico se destaca de forma negativa para a geometria KGD.

Com relação à abertura da fratura, figura 5.23, parte dos pontos calculados ficaram sobrepostos a curva estimada pelo simulador. Já a linha de tendência linear utilizada indicou uma abertura um pouco inferior à resposta obtida com o MFrac, no entanto esta diferença foi de apenas 0,25 cm no final do bombeio.

Com relação à eficiência, a linha de tendência utilizada no modelo indicou um pequeno incremento ao longo do tempo, enquanto que o simulador apresenta uma inclinação positiva maior. A eficiência ao final do bombeio no modelo desenvolvido ficou em torno de 0,24, enquanto que o simulador MFrac apresentou uma eficiência de 0,39 neste mesmo instante, de acordo com a figura 5.24.

Considerando o simulador Stimplan, o modelo que fez a melhor previsão dos seus resultados foi aquele desenvolvido para a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, conforme pode ser observado na tabela 5.3 e também no gráfico de barras da figura 5.30, que concentra os menores erros quadráticos neste modelo.

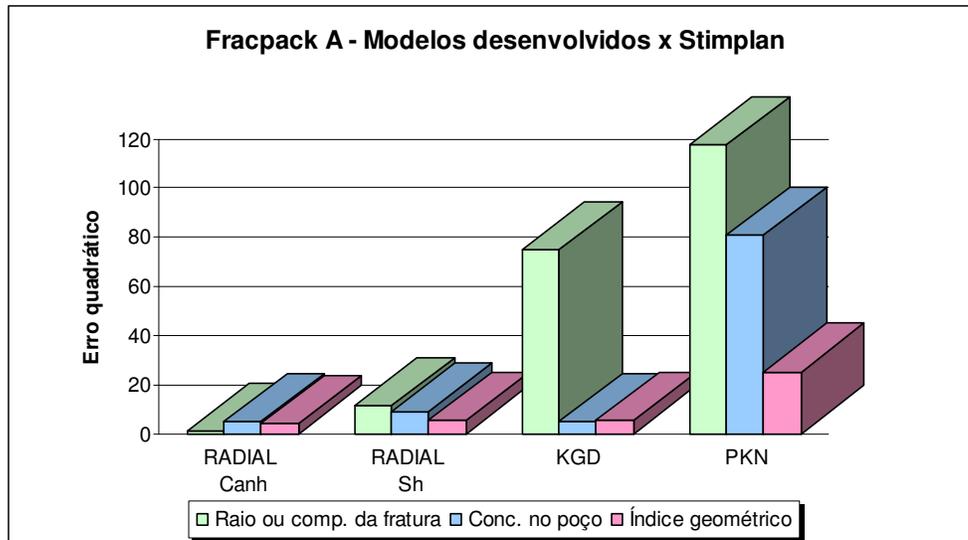


Figura 5.30 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador Stimplan para o *fracpack A*.

Comparando os resultados obtidos com o modelo desenvolvido para a geometria radial com as respostas do simulador comercial Stimplan, considerando a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, pode-se observar uma diferença de aproximadamente  $2,0 \text{ lb/ft}^2$  na concentração no poço, conforme mostrado na figura 5.13. Apesar da grande diferença, este foi o menor erro obtido neste índice comparando-o aos índices dos outros modelos, além disso, nota-se que as duas curvas iniciam um declínio na concentração em torno de um raio de 15 m com o final por volta dos 28 m.

Com relação à propagação do raio da fratura ao longo do tempo, pode-se observar no gráfico da figura 5.14 que o raio de empacotamento máximo e o raio de empacotamento do simulador comercial são bem próximos, apresentando uma diferença de apenas 1 m, com o início do empacotamento no modelo desenvolvido ocorrendo alguns poucos minutos antes.

A previsão da abertura da fratura ao longo do tempo, figura 5.15, apresenta uma curva um pouco maior que a prevista pelo simulador comercial, chegando a uma diferença de 1,0 cm no final do bombeio. No entanto, o gráfico da figura 5.11 mostra que uma diferença semelhante foi obtida com os modelos desenvolvidos para as outras geometrias.

Com relação à eficiência, figura 5.16, a linha de tendência utilizada no modelo desenvolvido indicou um crescimento da curva inferior ao obtido pelo simulador comercial. Enquanto o modelo desenvolvido indicou uma eficiência de 0,25 no final do bombeio, o simulador Stimplan chegou a atingir 0,35.

### 5.5.3. Evolução do modelo de Valkó & Oligney

O modelo combinado proposto por este trabalho sugeriu alguns pontos para serem ajustados no modelo de Valkó & Oligney, que foram: a introdução de um modelo de propagação, sendo este o balanço de massa de Carter; uma estimativa mais acurada do expoente alfa e também uma alteração na forma de resolução da equação do terceiro grau que define o raio de empacotamento na geometria radial. Os gráficos nas figuras 5.31 a 5.34 apresentam os resultados destas modificações no modelo original de Valkó & Oligney, comparando-o ao modelo combinado desenvolvido e às respostas dos simuladores comerciais. Vale lembrar que o modelo original de Valkó & Oligney foi desenvolvido para a geometria radial, e desta forma as melhorias serão apresentadas para esta geometria.

A evolução da distribuição do agente de sustentação ao longo do raio da fratura está apresentada no gráfico da figura 5.31, onde foram plotados dois conjuntos de curvas. O primeiro é referente aos raios de empacotamento do modelo de Valkó & Oligney, sendo apresentada a curva do modelo original, na cor azul clara, e a curva do modelo ajustado, na cor azul escura. Neste conjunto de curvas também está mostrado o resultado obtido pelo modelo combinado desenvolvido, na cor vermelha. É possível observar que houve uma evolução do modelo original até o modelo combinado desenvolvido, sendo esta representada por uma seta azul, já que as curvas vão se aproximando das respostas obtidas pelos simuladores comerciais.

O segundo grupo de curvas está relacionado aos raios hidráulicos do modelo de Valkó & Oligney (curvas verdes) e ao raio hidráulico do modelo desenvolvido (curva amarela). Com relação ao modelo de Valkó & Oligney, foram plotadas três curvas: a primeira, na cor verde clara, se refere ao raio hidráulico do modelo original; a segunda, na cor verde-amarelada, é referente ao raio hidráulico calculado com o expoente alfa estimado a partir do declínio de pressão do minifrac; e a terceira curva, na cor verde escura, se refere ao raio hidráulico do modelo de Valkó e Oligney final, incorporando também a alteração relativa à resolução da equação do terceiro grau. É possível observar que com estes ajustes o modelo de Valkó e Oligney se aproximou da resposta obtida pelo modelo desenvolvido, sendo esta evolução representada pela seta verde. Enquanto o raio hidráulico combinado tem por base o balanço de massa de

Carter, que foi incorporado ao modelo desenvolvido, o raio hidráulico do modelo de Valkó e Oligney se baseia apenas nos raios de empacotamento máximo, já que este não utiliza um modelo de propagação. Desta forma, é interessante observar que mesmo não considerando um modelo de propagação, o modelo de Valkó & Oligney, após as alterações sugeridas por este trabalho, apresenta resultados semelhantes ao modelo combinado, o qual incorpora o modelo de propagação. Essa melhoria no raio hidráulico terá grande impacto nos resultados encontrados para a abertura e para a eficiência da fratura, como será visto nas figuras 5.33 e 5.34.

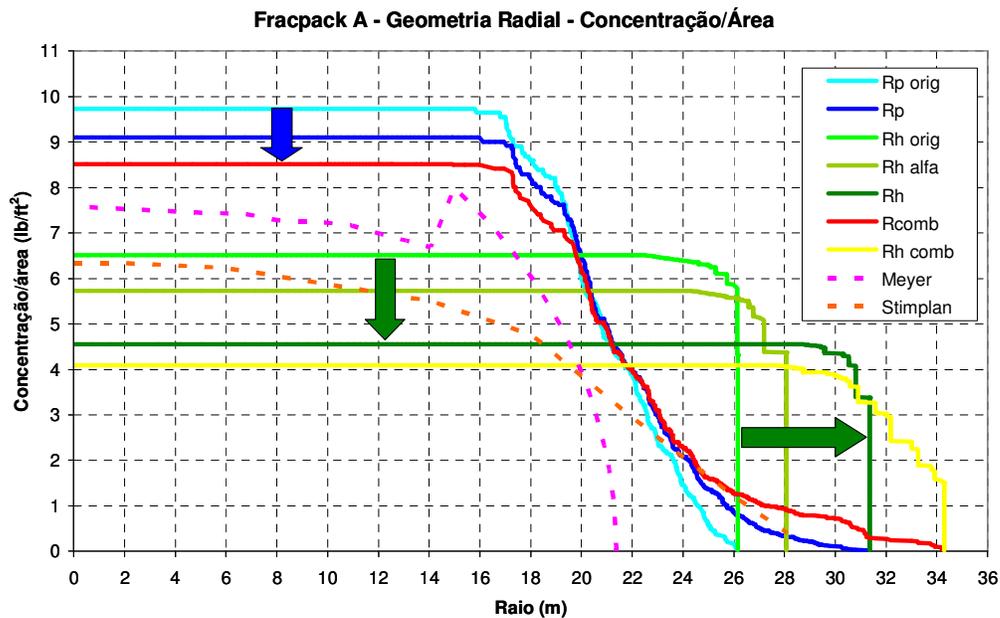


Figura 5.31 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da distribuição do agente de sustentação ao longo do raio da fratura para o *fracpack A*.

Com relação à propagação do raio da fratura ao longo do tempo, a figura 5.32 apresenta as curvas do modelo de Valkó & Oligney relativas ao raio de empacotamento, sendo a curva original representada por pontos pretos e a curva final representada por pontos azuis. As curvas relativas ao raio hidráulico do modelo de Valkó & Oligney também são apresentadas, sendo o raio hidráulico original representado pela cor verde clara e o raio hidráulico final representado pela cor verde escura. Ainda são apresentadas as respostas obtidas com o modelo desenvolvido e com os simuladores comerciais para a propagação do raio da fratura ao longo do tempo. A seta verde indica o aumento do raio hidráulico obtido após as melhorias realizadas no modelo de Valkó & Oligney. Já a seta azul mostra como a curva de propagação da fratura no

modelo de Valkó & Oligney se aproximou da curva de propagação do modelo combinado no período anterior aos empacotamentos, que iniciou por volta de 17 minutos, evidenciando uma relação entre o modelo de propagação de Carter e o modelo de potência proposto por Nolte, após o ajuste do expoente alfa.

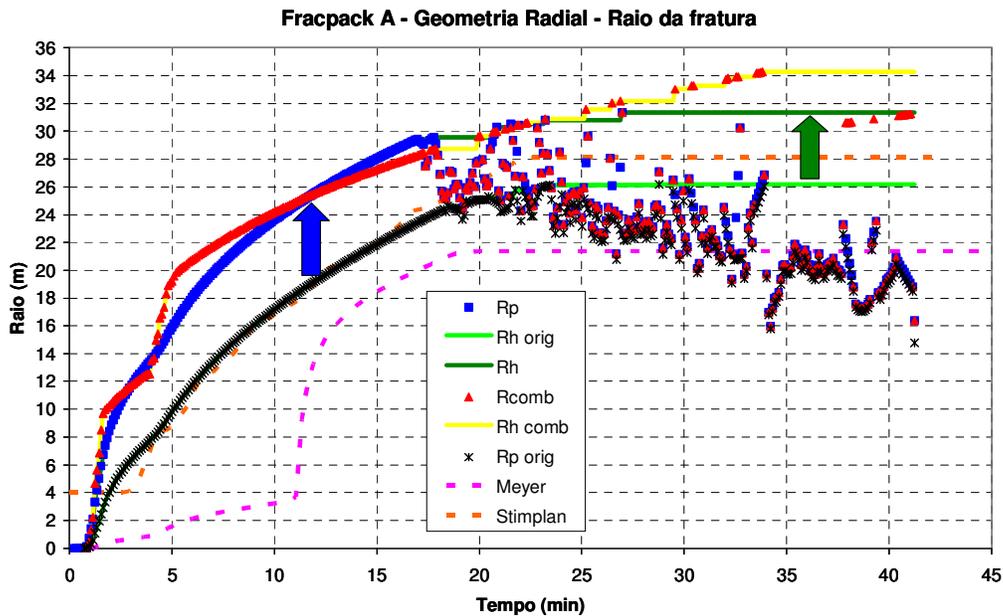


Figura 5.32 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão do raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack* A.

Os maiores impactos das alterações no modelo de Valkó & Oligney estão nas previsões da abertura da fratura ao longo do tempo, figura 5.33, e da eficiência ao longo do tempo, figura 5.34. A abertura calculada no modelo original de Valkó & Oligney está representada pela curva de bolinhas na cor verde clara, a qual se encontra superior às respostas dos simuladores. Além dos resultados finais do modelo de Valkó & Oligney, representado por losangos verde-escuros, do modelo desenvolvido, representado por triângulos vermelhos, e da resposta dos simuladores, o gráfico também apresenta a abertura da fratura calculada com o raio de empacotamento, sendo esta a abertura  $w_p$ . A abertura  $w_p$  está representada por quadrados azuis e mostra valores muito maiores que os estimados pelos simuladores, confirmando que para a estimativa da abertura média da fratura deve-se utilizar a área calculada a partir do raio hidráulico.

A figura 5.34 apresenta a eficiência calculada com o modelo original de Valkó & Oligney, representada por bolinhas na cor azul clara, e as eficiências

finais. Observa-se que na maior parte do tempo este resultado é superior aos obtidos com os simuladores comerciais.

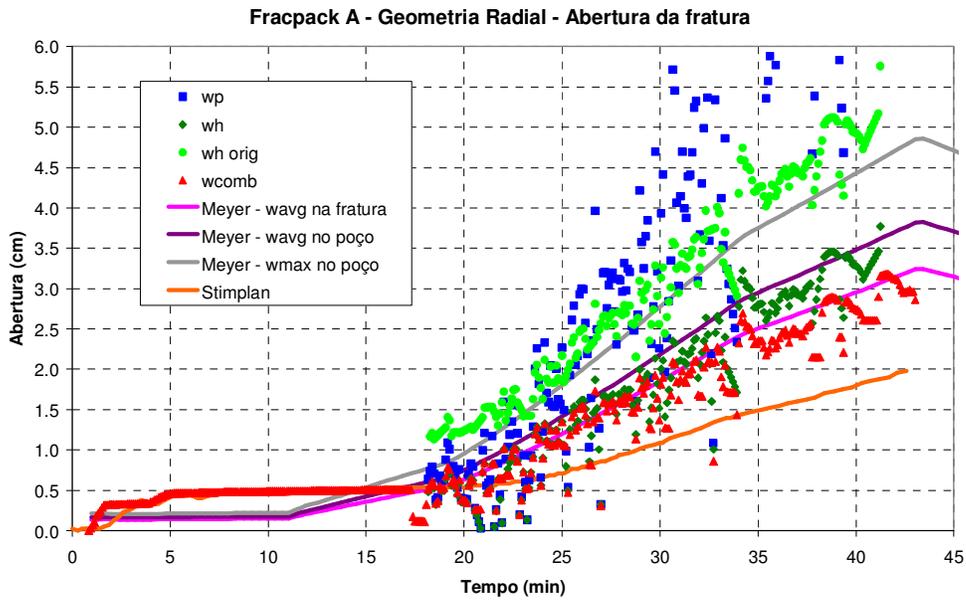


Figura 5.33 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack A*.

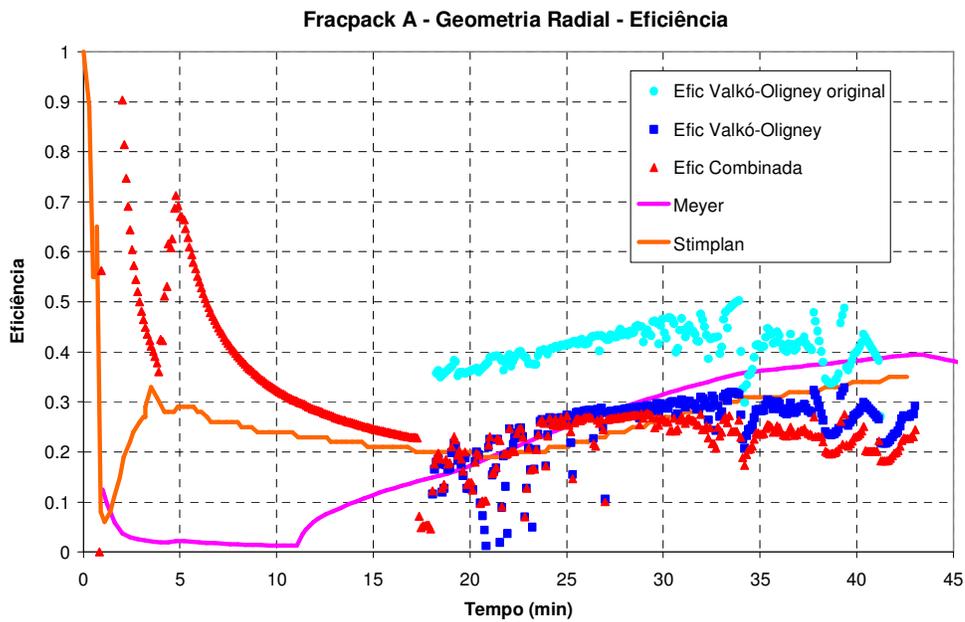


Figura 5.34 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da eficiência da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack A*.

## 5.6. ***Fracpack B***

Esta operação foi executada em lâmina d' água de 1794 m, em um arenito cujo topo encontra-se na profundidade de 3444 m, apresentando 29 m de espessura e 24 m de intervalo canhoneado. A permeabilidade estimada para a formação é de 550 mD, seu módulo de elasticidade é de  $9,25 \times 10^5$  psi ( $6,38 \times 10^3$  MPa) e seu coeficiente de Poisson é 0,32. A temperatura na superfície foi estimada em 23°C enquanto a temperatura no reservatório é de 58°C. O fluido utilizado no tratamento possui uma carga polimérica de 35 lb/Mgal e, utilizando a média das temperaturas da superfície e do reservatório, foram escolhidos os parâmetros reológicos do fluido do tratamento a serem utilizados no modelo, sendo estes:  $n$  igual a 0,4485 e  $K$  igual a  $0,1774 \text{ lbf}\cdot\text{s}^n/\text{ft}^2$ . O agente de sustentação bombeado foi cerâmica leve, sendo sua massa específica igual a  $2,71 \text{ g/cm}^3$ .

### 5.6.1. **Calibração do modelo**

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial MFrac, que neste caso foi obtido com o mesmo coeficiente de filtração, igual a  $0,0077 \text{ ft/min}^{1/2}$ , nas duas condições de iniciação da fratura. Desta forma, as respostas do simulador apresentam pequenas diferenças na comparação dos resultados obtidos em cada condição de iniciação de fratura. Já o modelo desenvolvido para a geometria radial apresenta apenas um caso em função do coeficiente de filtração ser único. A figura 5.35 mostra as curvas de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* comercial MFrac após a calibração do modelo na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. A figura 5.36 mostra, além do perfil litológico e de tensões, a geometria final estimada para a fratura nesta mesma condição, cujo comprimento foi de 34 m e a altura de quase 35 m. Já na condição de iniciação da fratura na menor tensão, as curvas de pressão de fundo, vazão, concentração do agente de sustentação e o ajuste de pressão são apresentados na figura 5.37 e a figura 5.38 apresenta a geometria final da fratura, cujo comprimento foi de 37 m e a altura em torno de 30,5 m

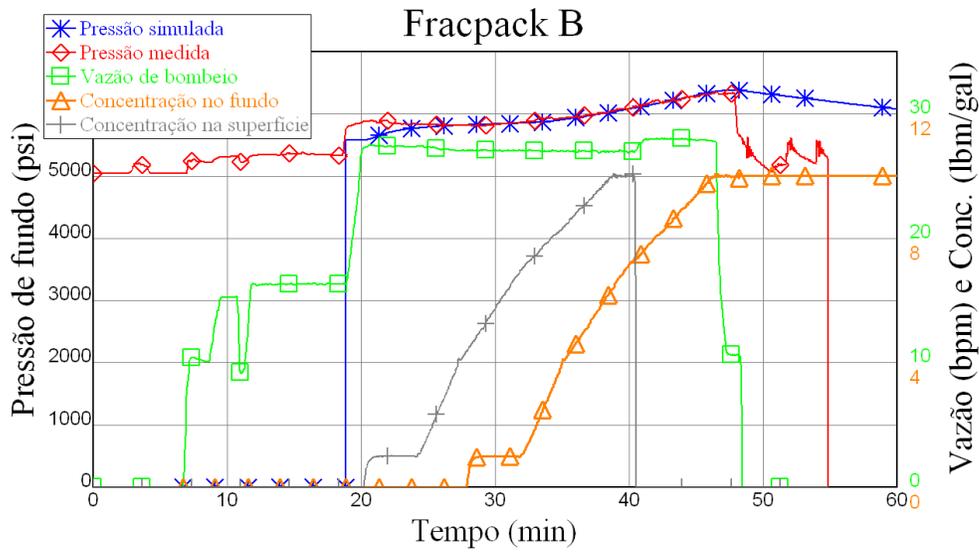


Figura 5.35 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack B* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

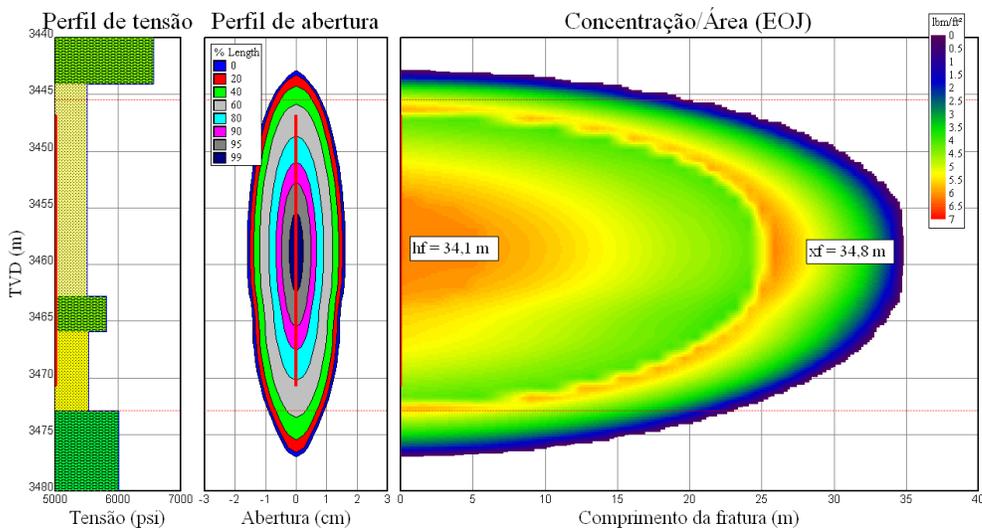


Figura 5.36 – Simulação da fratura executada no *fracpack B* no software Meyer na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

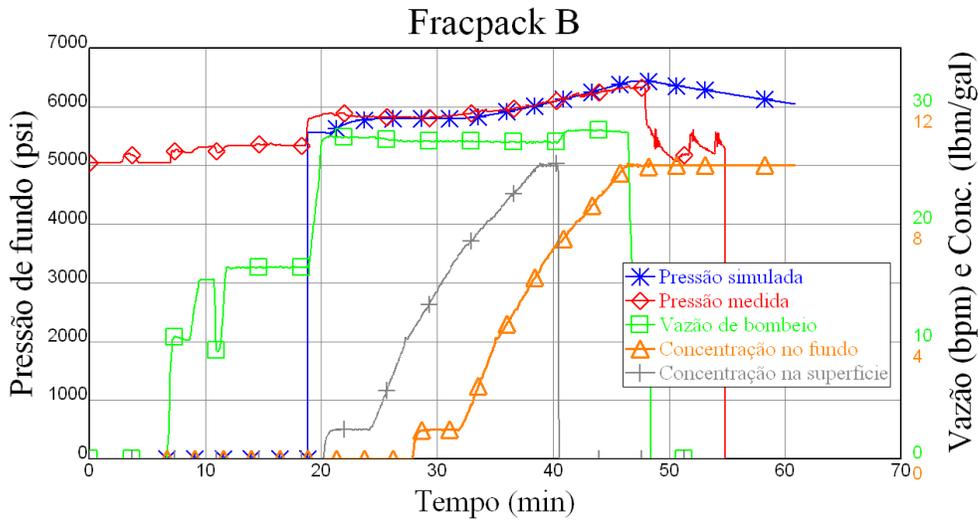


Figura 5.37 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack B* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

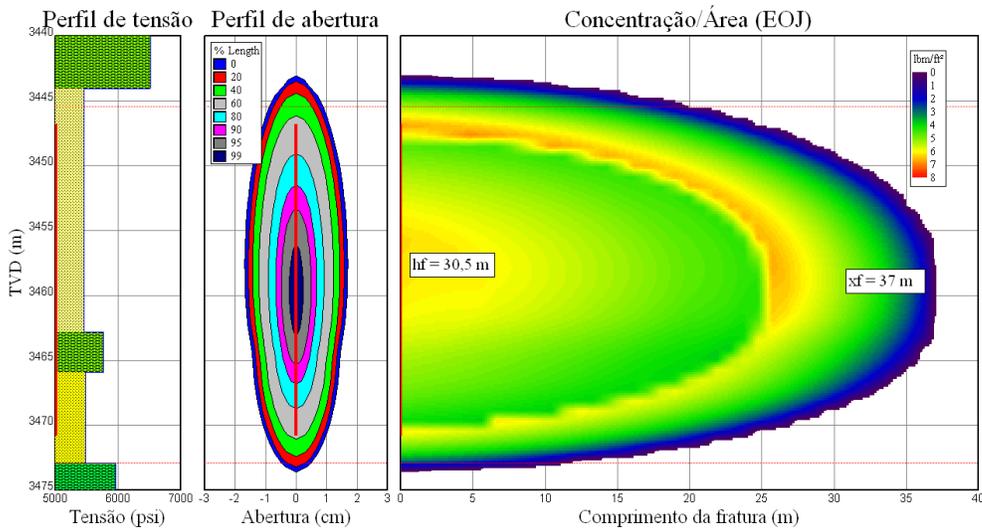


Figura 5.38 – Simulação da fratura executada no *fracpack B* no *software* Meyer na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software* MFrac, foi feita uma simulação no *software* comercial Stimplan. As figuras, 5.39 e 5.40, apresentam a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo Stimplan nas condições de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e de iniciação da fratura na menor tensão respectivamente. Como os dados vindos do MFrac não foram alterados de forma a permitir uma comparação entre os resultados, observa-se que a pressão simulada não conseguiu ser idêntica a pressão medida em campo, principalmente na condição de iniciação da fratura

na menor tensão, de qualquer forma estas simulações foram consideradas válidas para a comparação com os resultados dos modelos desenvolvidos. As figuras, 5.41 e 5.42, mostram as geometrias finais da fratura estimadas pelo *software* 3D nas condições de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e de iniciação da fratura na menor tensão, que apresentaram um comprimento de 39 m e altura de 31 m e um comprimento de 39 m e altura de 32 m respectivamente.

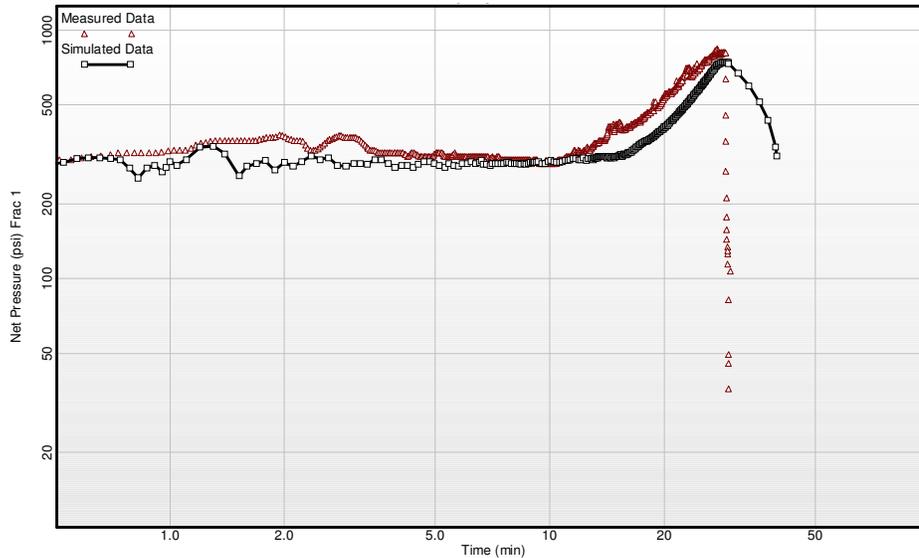


Figura 5.39 – Simulação do *fracpack B* no *software* Stimplan, na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

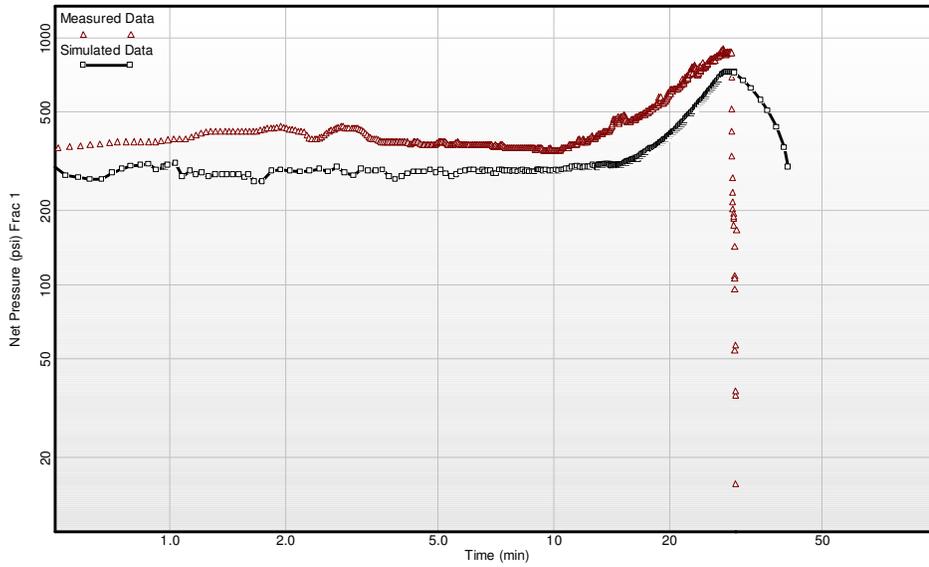


Figura 5.40 – Simulação do *fracpack B* no *software* Stimplan, na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

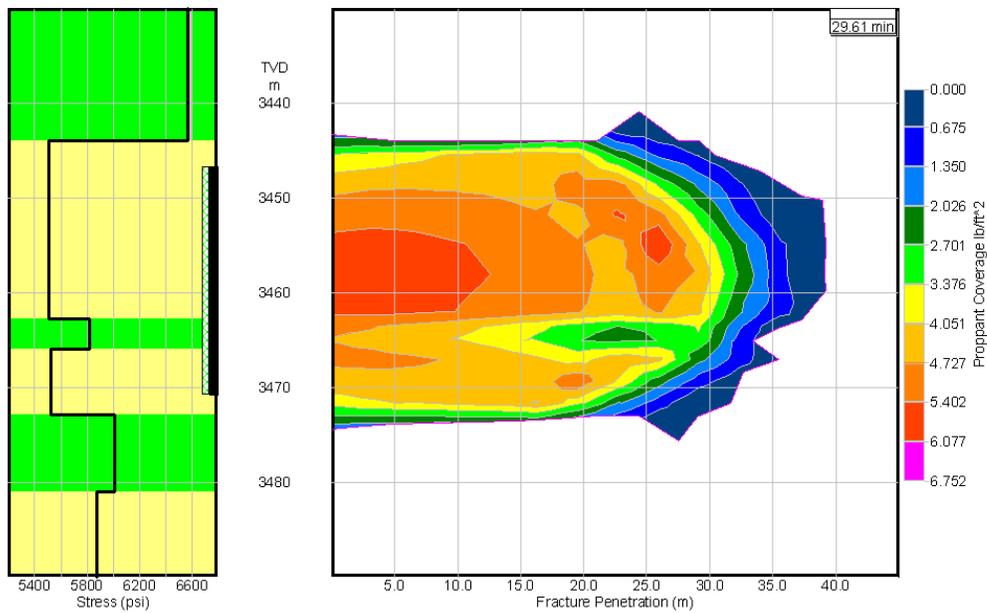


Figura 5.41 – Estimativa da geometria final da fratura executada no *fracpack B* através do *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

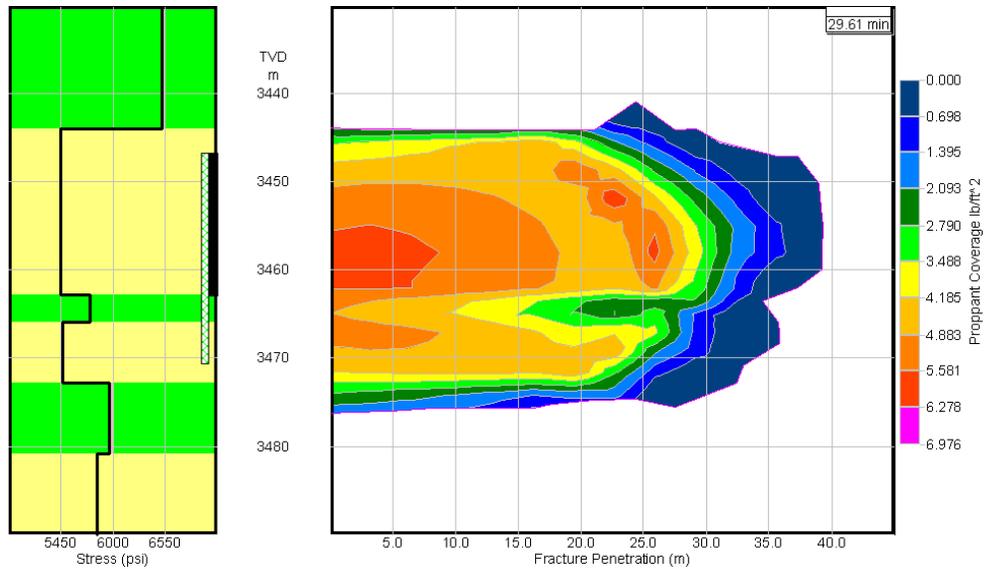


Figura 5.42 – Estimativa da geometria final da fratura executada no *fracpack B* através do *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

### 5.6.2. Resultados e escolha do melhor modelo

Utilizando os dados do declínio de pressão do minifrac foi possível definir o tempo de fechamento da fratura sendo este igual a 5,1 min. Desta forma foi obtida uma eficiência do minifrac em torno de 30% e conseqüentemente os expoentes  $\alpha$  estimados para cada geometria foram: 0,58 para a geometria radial, 0,53 para a geometria KGD e 0,57 para a geometria PKN. Com estas informações e conhecendo-se o coeficiente de filtração, que neste caso foi igual nas duas condições de iniciação da fratura, a pressão de fundo registrada durante a operação de *fracpack* pode ser interpretada utilizando os modelos desenvolvidos para cada geometria. Cabe ressaltar que nas geometrias PKN e KGD a altura da fratura foi assumida como igual à espessura do reservatório, sendo, neste caso, a intercalação impermeável tratada como parte do reservatório na modelagem 2D. A tabela 5.4 e as figuras, 5.43 e 5.44, apresentam um resumo dos resultados obtidos com os modelos desenvolvidos e com os simuladores comerciais.

Fracpack B - Resultados						
Modelo		R ou xf final	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	w médio final	eficiência final
		(m)	(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm)	(%)
Desenvolvido	Radial - Canh	29,1	20,9	6,67	2,84	26,0
	Radial - Sh	29,1	20,9	6,67	2,84	26,0
	KGD	43,7	20,2	7,96	3,38	25,0
	PKN	46,2	21,7	7,77	3,09	23,0
Simuladores Comerciais	Meyer - Canh	34,8	34,8	5,31	2,49	39,0
	Meyer - Sh	37,0	37,0	5,20	2,53	38,0
	Stimplan - Canh	39,2	39,2	4,77	1,93	33,0
	Stimplan - Sh	39,2	39,2	4,97	1,91	34,0

Tabela 5.4 – Resumo dos resultados obtidos a partir da interpretação dos registros do *fracpack B*.

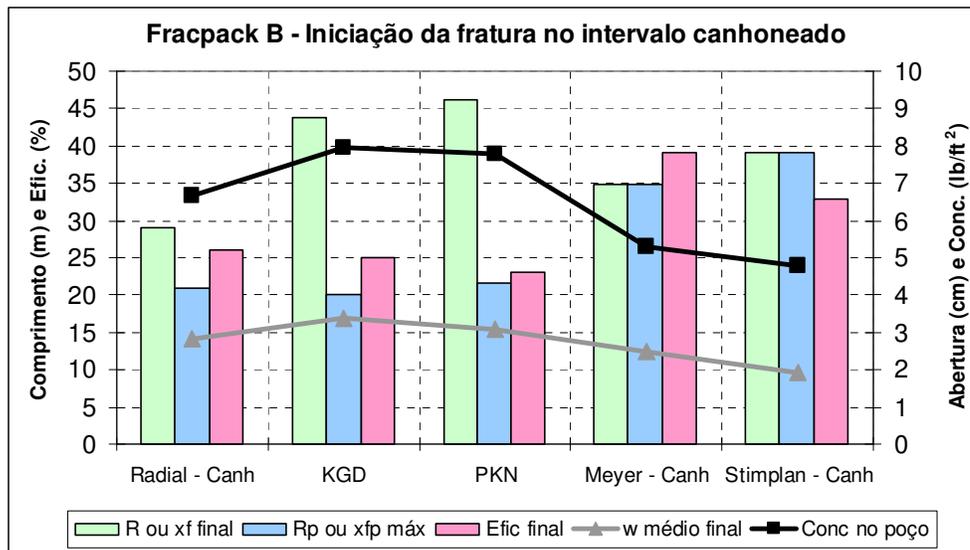


Figura 5.43 – Resultados obtidos para o *fracpack B* com os modelos desenvolvidos e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

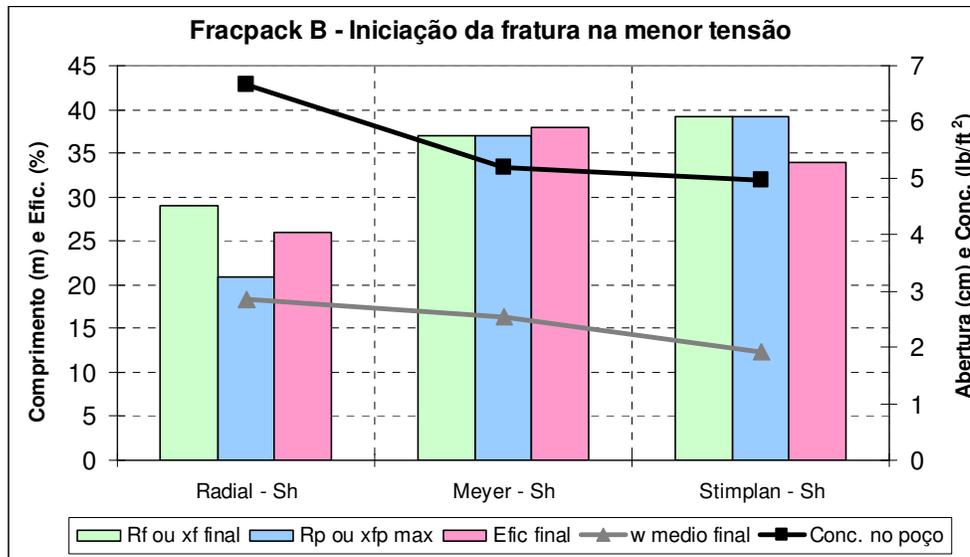


Figura 5.44 – Resultados obtidos para o *fracpack B* com o modelo desenvolvido e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Para a definição do melhor modelo de previsão dos resultados obtidos nos simuladores comerciais foi realizada uma análise de erros utilizando a diferença quadrada entre os índices definidos previamente. A tabela 5.5 e as figuras, 5.45 e 5.46, apresentam esta comparação, sendo que os resultados com relação ao índice do raio da fratura e ao índice geométrico sofreram uma divisão por 10 e uma multiplicação por 10.000 respectivamente para que todos os erros quadráticos pudessem permanecer no mesmo gráfico. É importante ressaltar que apesar dos modelos, Radial-canhoneado e Radial-Sh, possuem o mesmo resultado, eles foram comparados aos resultados dos simuladores comerciais considerando respectivamente a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e a condição de iniciação da fratura na menor tensão, já que os resultados dos simuladores apresentaram pequenas diferenças entre si. Vale lembrar que os modelos desenvolvidos com as geometrias KGD e PKN foram comparados aos resultados dos simuladores na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e que a altura da fratura nestas geometrias foi assumida como igual à espessura do reservatório.

Fracpack B - Comparação entre os índices - Diferença quadrada				
Modelo	Modelo desenvolvido x Simulador comercial	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	Índice geométrico
		(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm/m)
RADIAL Canh	Radial - Canh x Meyer	193,2	1,8	6,8E-04
	Radial - Canh x Stimplan	334,9	3,6	2,3E-03
RADIAL Sh	Radial - Sh x Meyer	259,2	2,2	8,5E-04
	Radial - Sh x Stimplan	334,9	2,9	2,4E-03
KGD	KGD x Meyer	214,0	7,0	3,3E-05
	KGD x Stimplan	362,1	10,2	7,9E-04
PKN	PKN x Meyer	172,1	6,1	2,2E-05
	PKN x Stimplan	307,0	9,0	3,1E-04
<b>Melhor previsão - MEYER:</b>		<b>PKN</b>	Radial Canh	<b>PKN</b>
<b>Melhor previsão - Stimplan:</b>		<b>PKN</b>	Radial Sh	<b>PKN</b>

Tabela 5.5 – Comparação entre os índices dos modelos desenvolvidos com os obtidos nos simuladores comerciais para o *fracpack B*.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

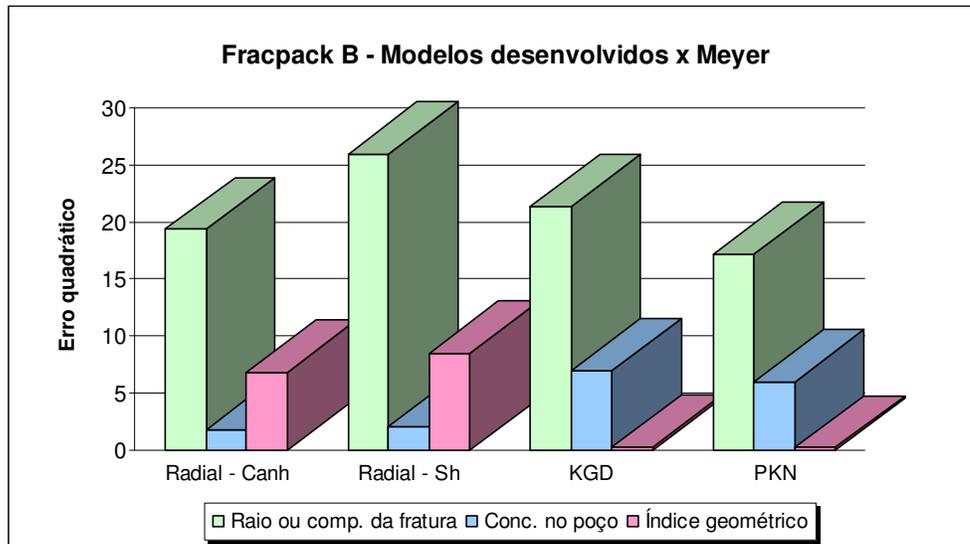


Figura 5.45 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador MFrac (Meyer) para o *fracpack B*.

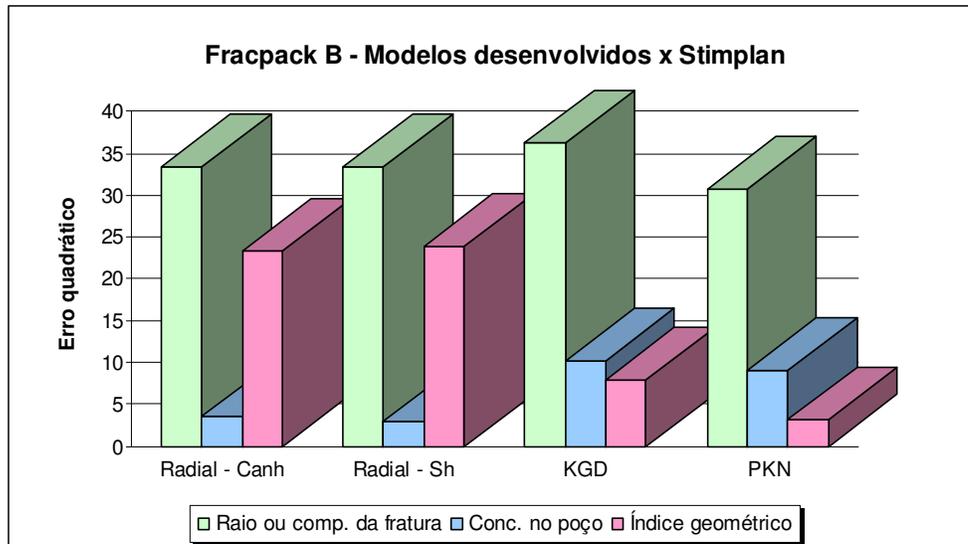


Figura 5.46 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador Stimplan para o *fracpack B*.

Apesar das figuras 5.45 e 5.46 mostrarem que os modelos desenvolvidos não apresentaram resultados muito bons em função das grandes diferenças quadradas observadas nos gráficos, de acordo com a tabela 5.5 a melhor previsão dos resultados tanto para o *software* MFrac (Meyer) quanto para o *software* Stimplan foi feita pelo modelo desenvolvido com a geometria PKN. Os resultados do melhor modelo desenvolvido e dos simuladores comerciais estão apresentados nas figuras 5.47 a 5.50.

A figura 5.47 mostra que o modelo desenvolvido com a geometria PKN previu uma concentração no poço maior que a concentração estimada pelos simuladores comerciais, sendo observada uma diferença em torno de  $2,7 \text{ lb/ft}^2$ , enquanto que o modelo radial apresentou um resultado mais próximo do previsto pelos simuladores com uma diferença de aproximadamente  $1,6 \text{ lb/ft}^2$ , como pode ser observado na tabela 5.4 e também através da comparação entre os índices na tabela 5.5, que indica o modelo radial como o melhor modelo na previsão da concentração do agente de sustentação no poço. No entanto, o modelo PKN mostrou uma melhor distribuição da curva ao longo do comprimento da fratura do que os outros modelos, podendo ser identificada pela menor diferença no índice relativo ao comprimento da fratura, já que este índice considera o máximo comprimento de empacotamento, representando a distância na fratura em que estão as maiores concentrações de agente de sustentação.

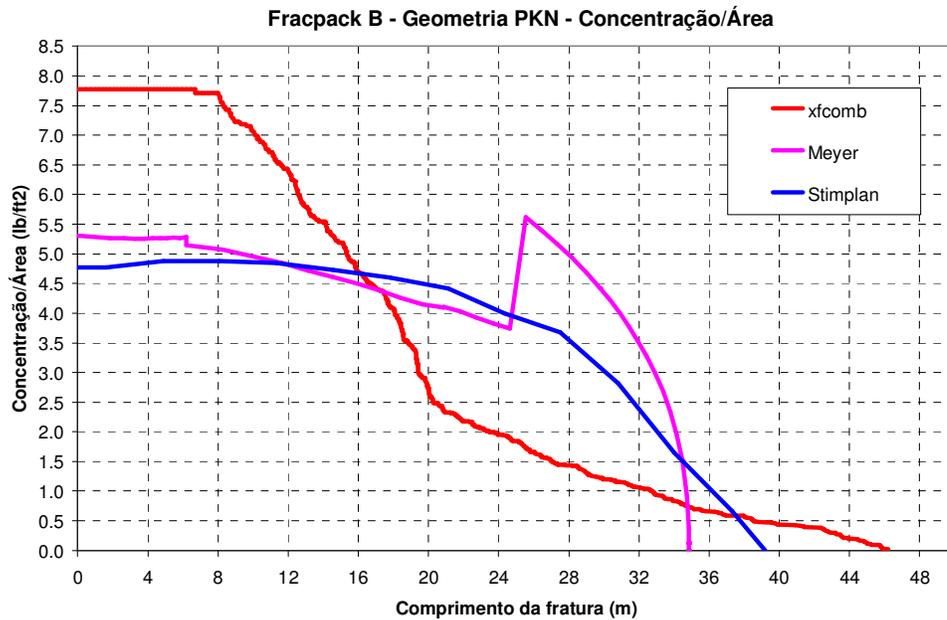


Figura 5.47 – Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do comprimento da fratura ao final do bombeio do *fracpack B*.

Com relação à propagação do comprimento da fratura ao longo do tempo, figura 5.48, observa-se que antes do início dos empacotamentos, até por volta de 10 min, a propagação da fratura é bem semelhante à estimada pelo *software* Meyer e apresenta o mesmo formato da propagação prevista pelo *software* Stimplan, atingindo porém uma diferença de 6 m em relação ao comprimento da fratura previsto pelo simulador 3D. Próximo ao instante de 10 min, o modelo desenvolvido prevê o início do empacotamento da fratura enquanto os *softwares* comerciais iniciam esse empacotamento 5 min mais tarde. Este fato acarretou em grandes diferenças no índice relativo ao comprimento da fratura para todos os modelos desenvolvidos, como mostram os gráficos de barras das figuras 5.45 e 5.46, sendo que a geometria PKN ainda apresentou o melhor resultado, como pôde ser observado na tabela 5.5. Mesmo após iniciado o empacotamento da fratura, o comprimento hidráulico continuou crescendo nos intervalos de declínio de pressão, seguindo a previsão dos simuladores até o instante 22 min, quando passou a atingir valores superiores aos estimados até o final do bombeio, por volta de 27 min.

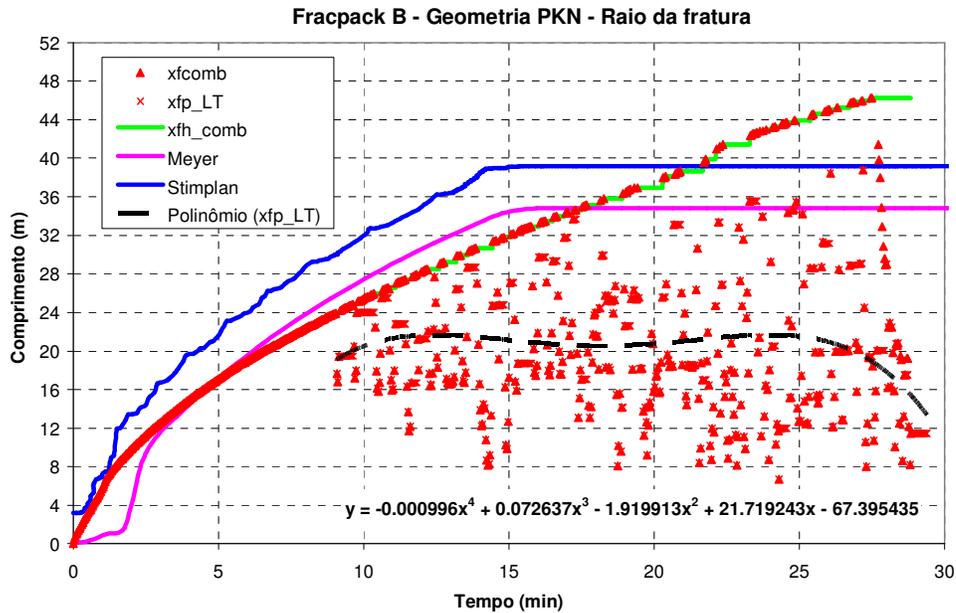


Figura 5.48 – Comprimento da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack B*.

A previsão da abertura da fratura ao longo do tempo pode ser observada na figura 5.49, na qual o modelo desenvolvido mostra boa semelhança com as curvas dos simuladores comerciais até o instante 10 min. Após este instante inicia-se o incremento da abertura e, de acordo com a linha de tendência linear utilizada, os resultados do modelo desenvolvido, apesar de dentro da envoltória de respostas dos simuladores, passam a se concentrar mais entre a previsão da abertura máxima e da abertura média no poço, simuladas pelo *software* Meyer, se distanciando da abertura prevista pelo Stimplan e da abertura média na fratura estimada pelo Meyer. Conforme visto na figura 5.48, em função do modelo desenvolvido prever o início do empacotamento antes dos simuladores, é possível observar na figura 5.49 que a abertura também começa a aumentar antes da previsão dos simuladores.

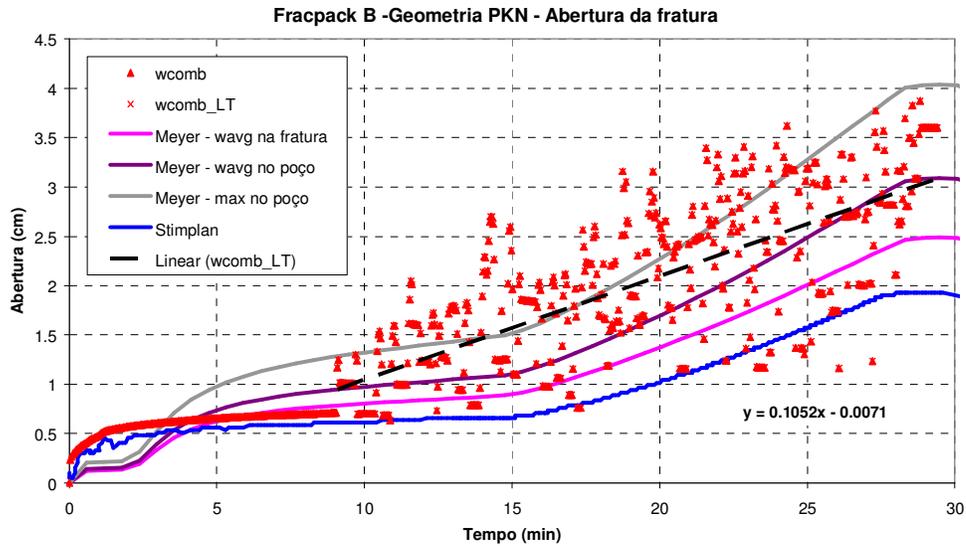


Figura 5.49 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack B*.

Na previsão da eficiência, figura 5.50, apesar da grande semelhança com a curva simulada pelo Stimplan até aproximadamente 10 min, no restante do bombeio a linha de tendência linear indicou, não só na geometria PKN, mas também nos outros modelos, um declínio da eficiência ao longo do tempo enquanto que os simuladores comerciais apresentaram um aumento da eficiência neste mesmo período. Desta forma, ao final do bombeio, enquanto o modelo desenvolvido indicava uma eficiência de 0,23, o simulador Stimplan apresentou um valor de 0,33 e o Meyer de 0,39.

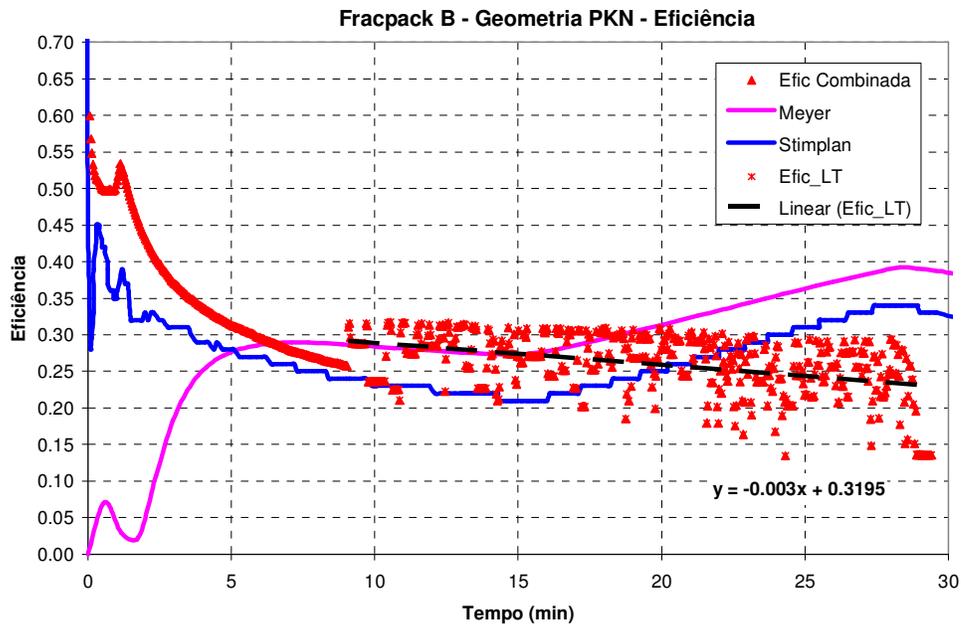


Figura 5.50 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack B*.

### 5.6.3. Evolução do modelo de Valkó & Oligney

Os gráficos nas figuras 5.51 a 5.54 apresentam os resultados dos ajustes efetuados no modelo original de Valkó & Oligney, e os compara ao modelo combinado desenvolvido e às respostas dos simuladores comerciais. Lembrando que o modelo original foi desenvolvido para a geometria radial de fratura, serão apresentados os resultados referentes a esta geometria que, no entanto, não foi considerada a melhor previsão das respostas dos simuladores para o *fracpack B*. De qualquer forma, será possível notar que as modificações elaboradas no modelo original aproximaram seus resultados dos obtidos pelos simuladores comerciais.

A figura 5.51 apresenta a evolução na curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura. A seta azul indica a evolução obtida na curva referente ao raio de empacotamento, sendo seu ponto de partida a curva estimada pelo raio de empacotamento original e seu ponto de chegada a curva referente ao raio de empacotamento final, o qual considera todas as sugestões propostas para o modelo. Já as setas verdes indicam a evolução dos raios hidráulicos, mostrando a curva referente ao raio hidráulico estimado pelo modelo original, a curva referente ao raio hidráulico que contempla o expoente alfa calculado a partir do declínio de pressão do minifrac e

a curva referente ao raio hidráulico final, que inclui também a alteração relativa à resolução da equação do terceiro grau. Como visto no *fracpack A*, as modificações realizadas no modelo de Valkó & Oligney aproximaram sua solução das respostas obtidas pelos simuladores comerciais. Outro ponto também notado foi a convergência da curva referente ao raio hidráulico de Valkó & Oligney na direção da curva referente ao raio hidráulico combinado, que utiliza o balanço de massa de Carter como modelo de propagação. Essa melhoria no raio hidráulico terá grande impacto nos resultados encontrados para a abertura e para a eficiência da fratura, como será visto nas figuras 5.53 e 5.54.

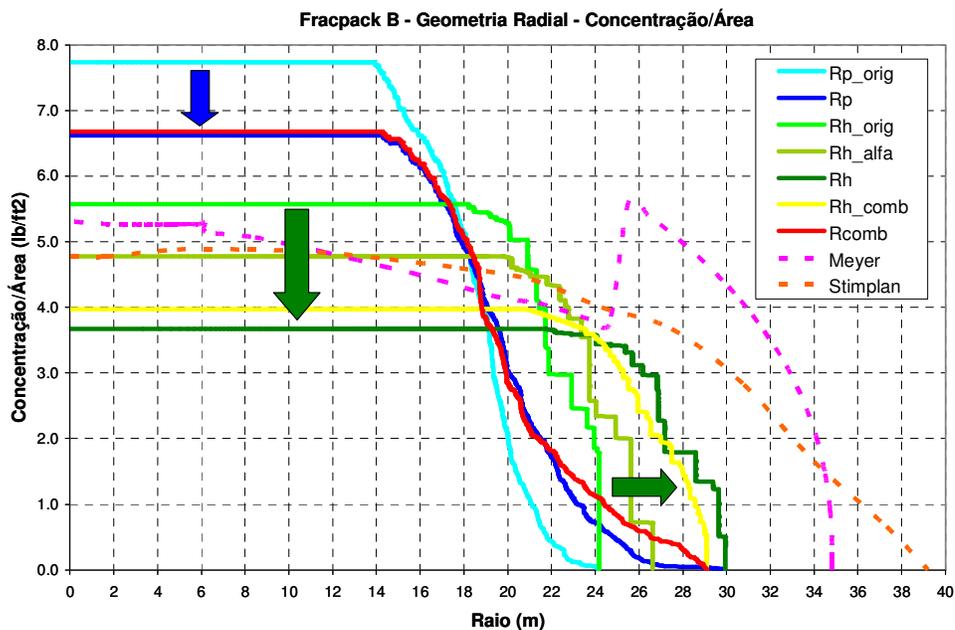


Figura 5.51 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da distribuição do agente de sustentação ao longo do raio da fratura para o *fracpack B*.

Com relação à propagação do raio da fratura ao longo do tempo, figura 5.52, a seta verde indica o aumento do raio hidráulico obtido após as melhorias realizadas no modelo de Valkó & Oligney, aproximando-o das respostas dos simuladores. Mesmo assim ainda é possível notar a grande diferença entre os raios estimados pelos simuladores comerciais e o raio previsto pelo modelo desenvolvido, evidenciando que este modelo não foi responsável pela melhor previsão dos resultados.

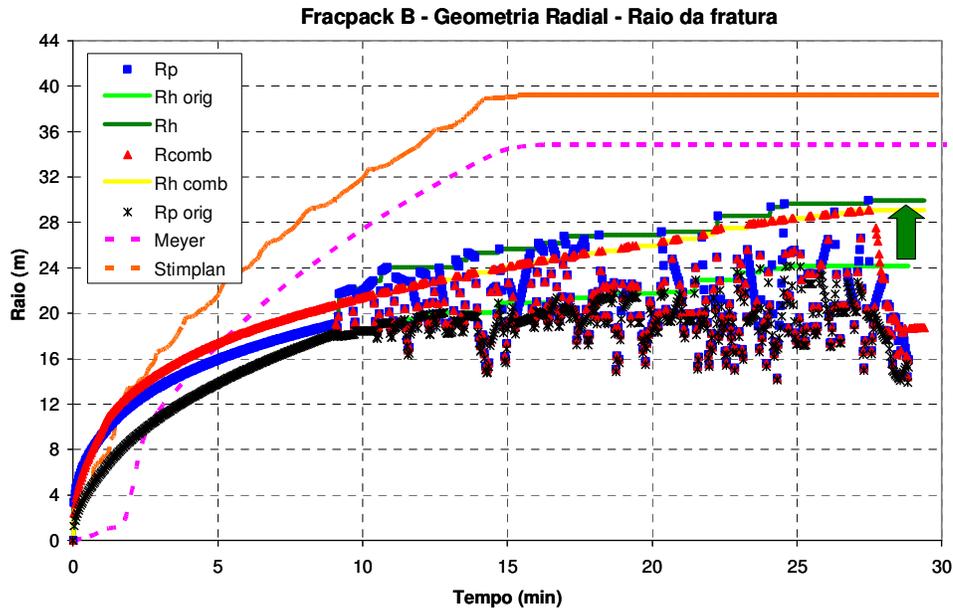


Figura 5.52 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão do raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack B*.

Com relação à previsão do crescimento da abertura da fratura ao longo do tempo, figura 5.53, a abertura calculada pelo modelo original de Valkó e Oligney, representada por bolas verdes, fica fora da envoltória das aberturas estimadas pelos simuladores comerciais, enquanto que as respostas do modelo final de Valkó & Oligney e do modelo combinado se mantêm dentro da envoltória. O mesmo ocorre com a abertura da fratura calculada com a área de empacotamento, representada por quadrados azuis, que ainda apresenta pontos superiores aos calculados com o modelo original, confirmando que para a definição da abertura média da fratura deve-se utilizar a área estimada a partir do raio hidráulico.

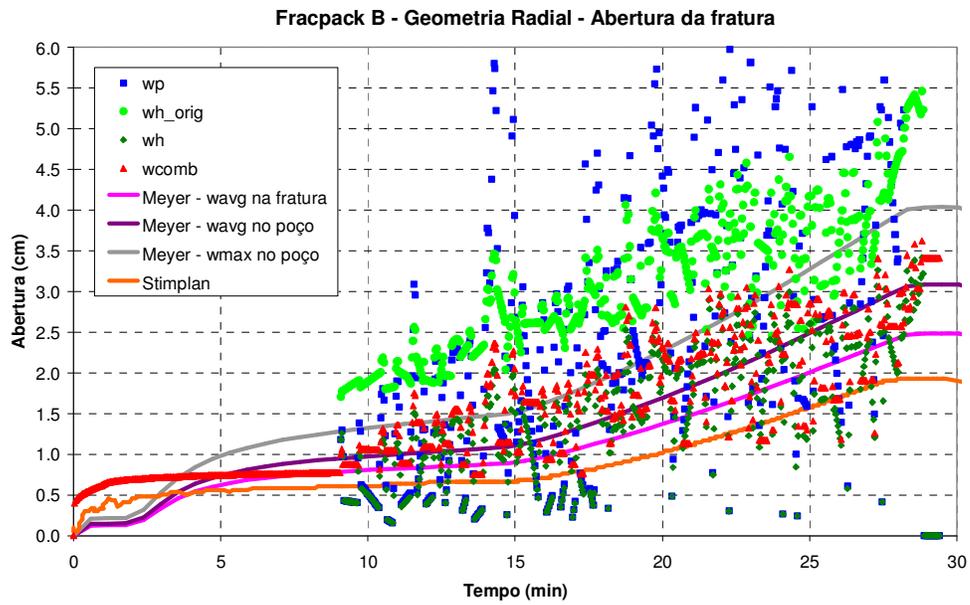


Figura 5.53 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack B*.

A figura 5.54 apresenta a eficiência calculada com o modelo original de Valkó & Oligney, representada por bolinhas na cor azul clara, e as eficiências finais. Observa-se que a eficiência calculada pelo modelo original se mantém superior aos resultados obtidos com os simuladores comerciais durante todo o bombeio.

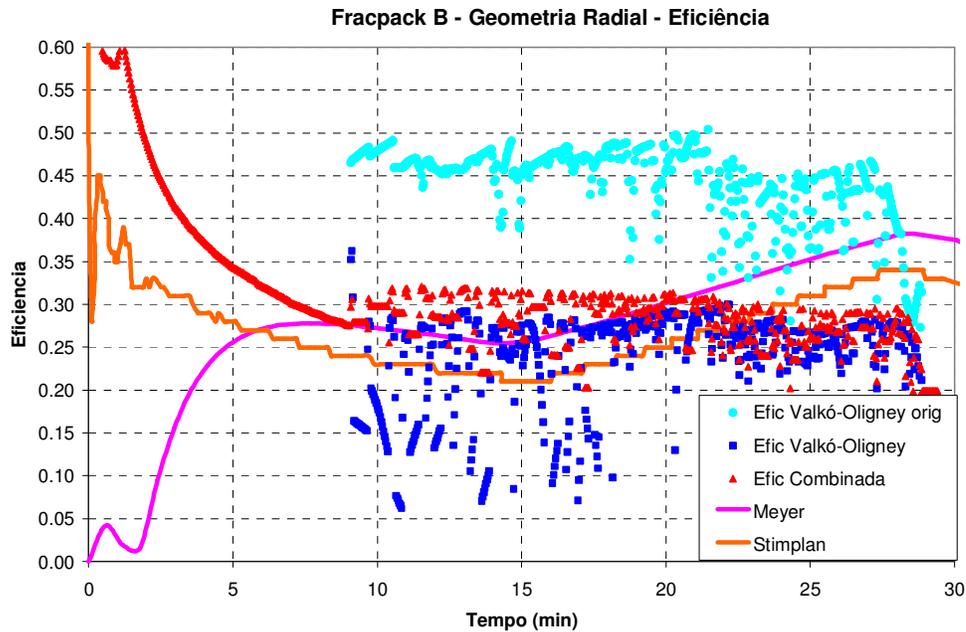


Figura 5.54 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da eficiência da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack B*.

## 5.7. *Fracpack C*

Esta operação foi executada em lâmina d' água de 1852 m, em um arenito cujo topo encontra-se na profundidade de 3464 m, apresentando 65 m de espessura e 25 m de intervalo canhoneado. A permeabilidade estimada para a formação é de 2300 mD, seu módulo de elasticidade é de  $9,25 \times 10^5$  psi ( $6,38 \times 10^3$  MPa) e seu coeficiente de Poisson é 0,30. A temperatura na superfície foi estimada em 23°C enquanto a temperatura no reservatório é de 50°C. O fluido utilizado no tratamento possui uma carga polimérica de 35 lb/Mgal e, utilizando a média das temperaturas da superfície e do reservatório, foram escolhidos os parâmetros reológicos do fluido do tratamento a serem utilizados no modelo, sendo estes:  $n$  igual a 0,4485 e  $K$  igual a  $0,1774 \text{ lbf.s}^n/\text{ft}^2$ . O agente de sustentação bombeado foi cerâmica leve, sendo sua massa específica igual a  $2,71 \text{ g/cm}^3$ .

### 5.7.1. Calibração do modelo

**5.7.1.1. Iniciação da fratura no intervalo canhoneado**

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial MFrac na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, sendo obtido um coeficiente de filtração igual a  $0,026 \text{ ft/min}^{1/2}$ . A figura 5.55 mostra as curvas de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no MFrac após a calibração do modelo na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. Já a figura 5.56, além do perfil litológico e de tensões, apresenta a geometria final estimada para a fratura nesta mesma condição, com 17 m de comprimento e 38 m de altura.

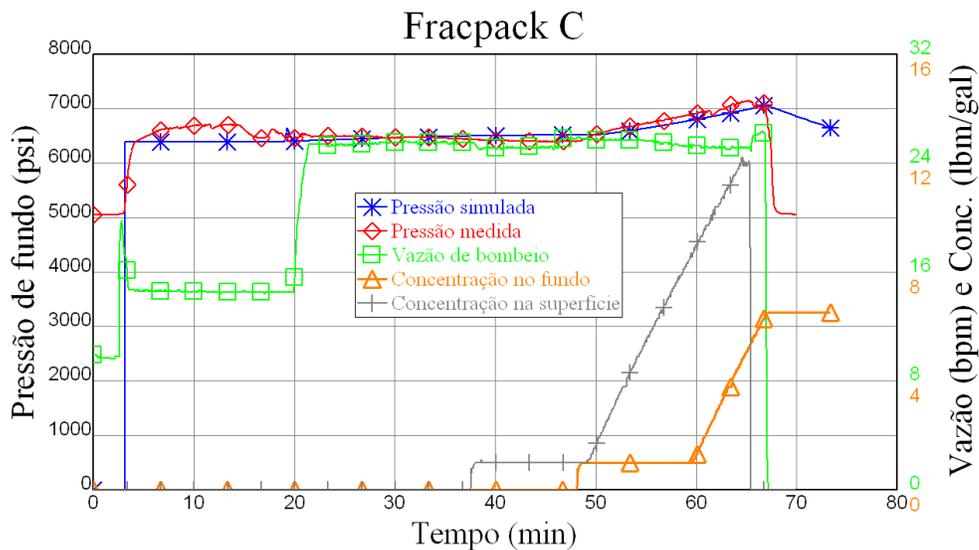


Figura 5.55 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack C* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

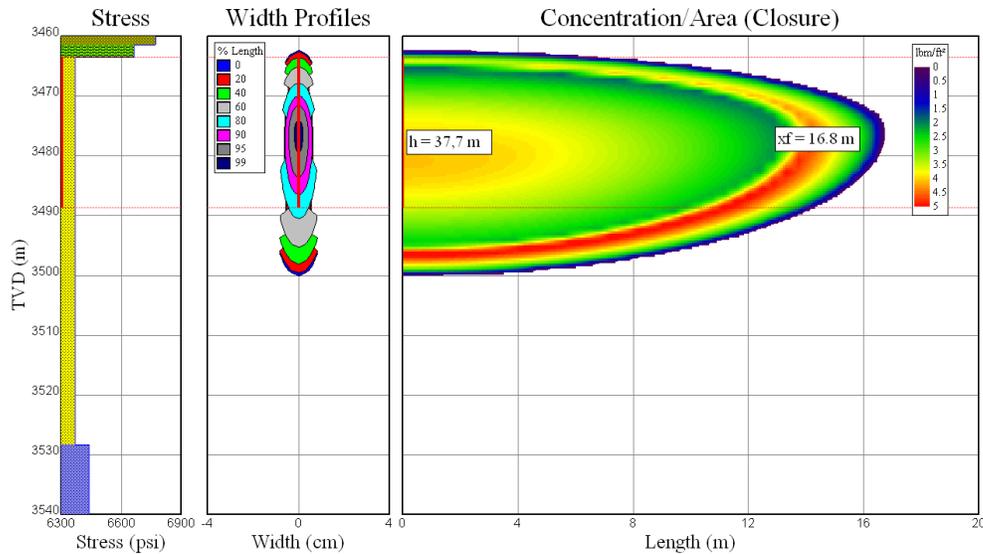


Figura 5.56 – Simulação da fratura executada no *fracpack C* no *software Meyer* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software MFrac*, foi feita uma simulação no *software* comercial *Stimplan* considerando a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. A figura 5.57 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo *Stimplan* e a figura 5.58 mostra a geometria final da fratura estimada pelo *software 3D* nesta mesma condição, que apresentou um comprimento de 24 m e altura de 42 m. Pode-se observar que o gráfico de pressão indicou um bom resultado na comparação entre a curva simulada e a curva medida em campo, e desta forma a simulação no *Stimplan* foi considerada válida para a avaliação das respostas obtidas com os modelos desenvolvidos.

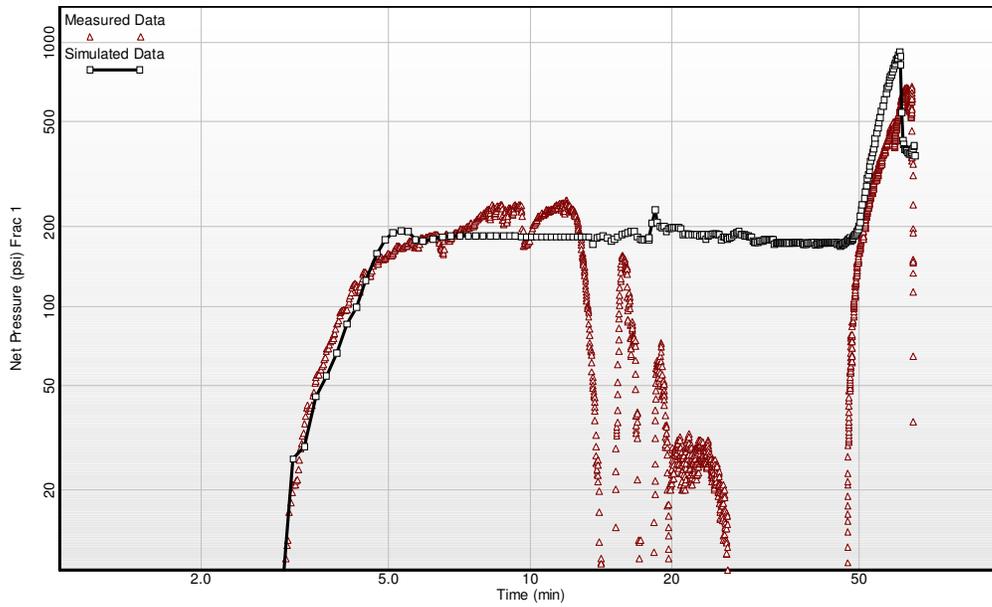


Figura 5.57 – Simulação do *fracpack C* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

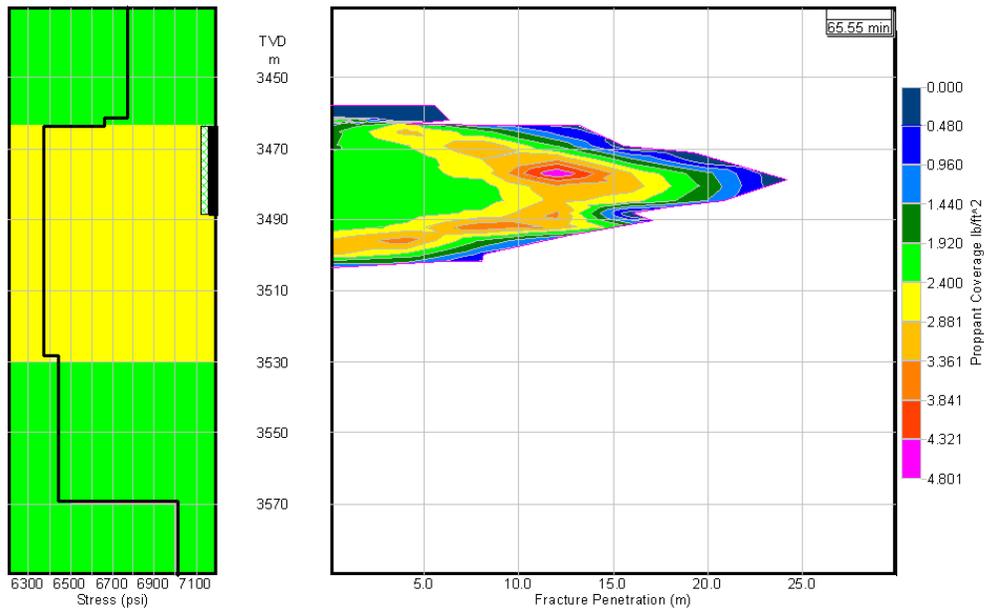


Figura 5.58 – Estimativa da geometria da fratura executada no *fracpack C* utilizando o *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

**5.7.1.2. Iniciação da fratura na menor tensão**

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial MFrac na condição de iniciação da fratura na menor tensão, sendo obtido um coeficiente de filtração igual a  $0,019 \text{ ft/min}^{1/2}$ . A figura 5.59 mostra as curvas de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* comercial MFrac após a calibração do modelo para esta condição. Já a figura 5.60 apresenta, além do perfil litológico e de tensões, a geometria final estimada para a fratura, cujo comprimento foi de 22,4 m e a altura de 38,5 m.

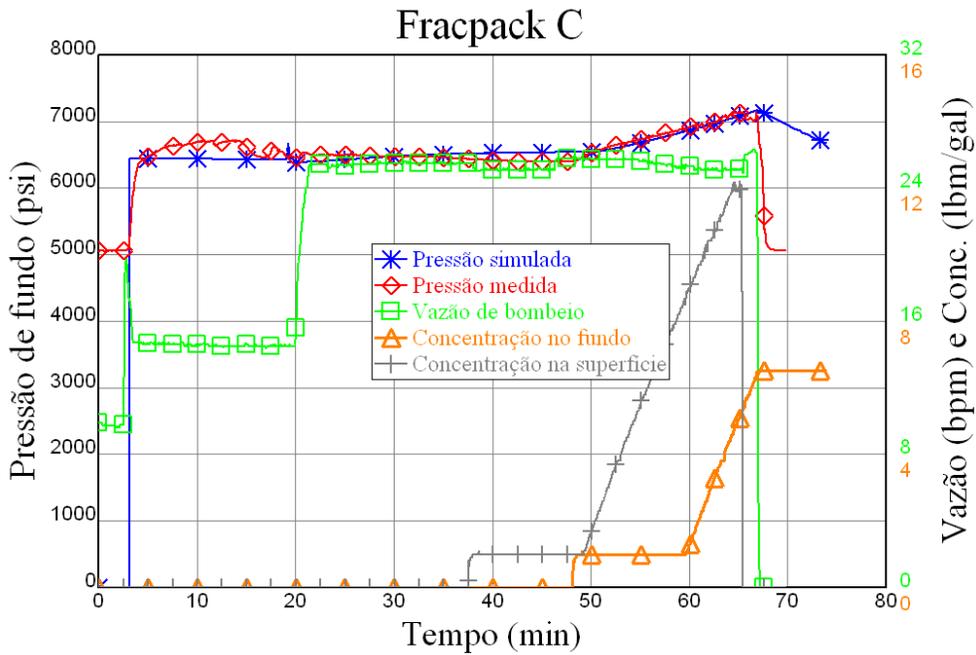


Figura 5.59 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack C* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

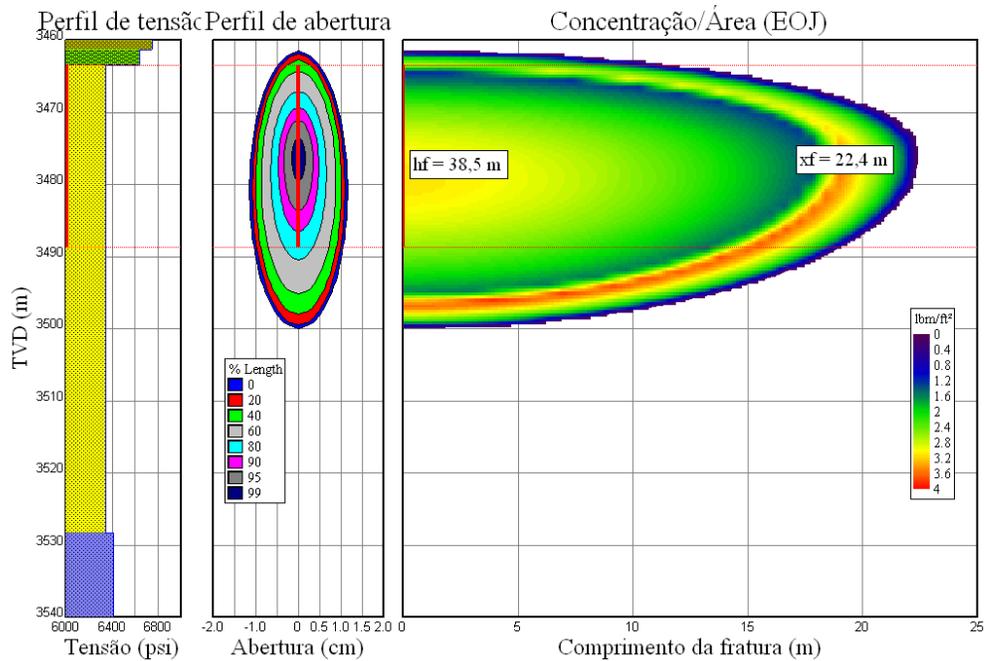


Figura 5.60 – Simulação da fratura executada no *fracpack C* no *software Meyer* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software MFrac*, foi feita uma simulação no *software* comercial Stimplan considerando a condição de iniciação da fratura na menor tensão. A figura 5.61 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo Stimplan e a figura 5.62 mostra a geometria final da fratura estimada pelo *software* 3D nesta condição, que apresentou um comprimento de 20.5 m e altura de 45 m. Assim como na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, a simulação do Stimplan para a iniciação da fratura na menor tensão indicou bons resultados em comparação ao registro de pressões do campo.

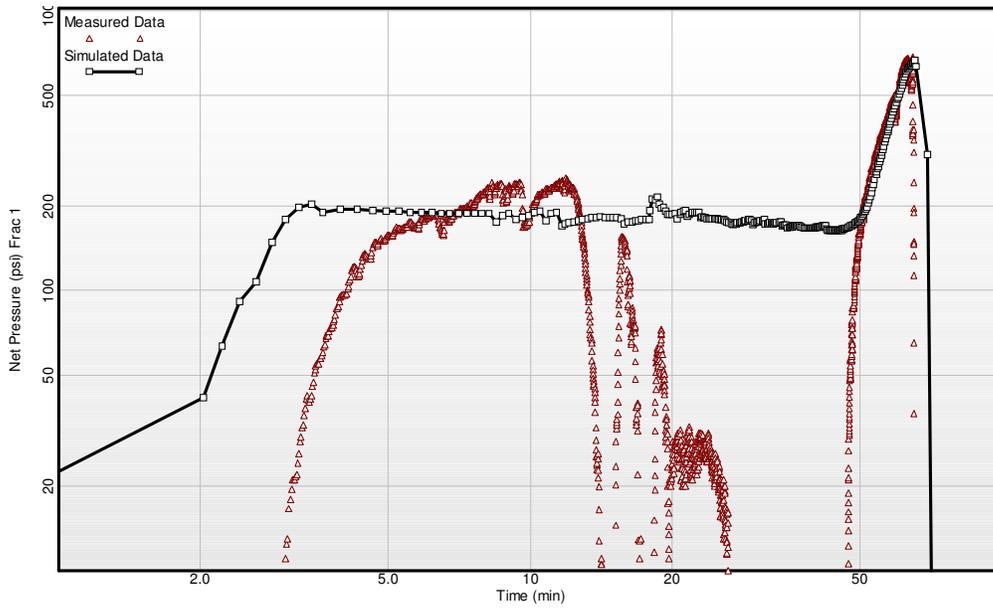


Figura 5.61 – Simulação do *fracpack C* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

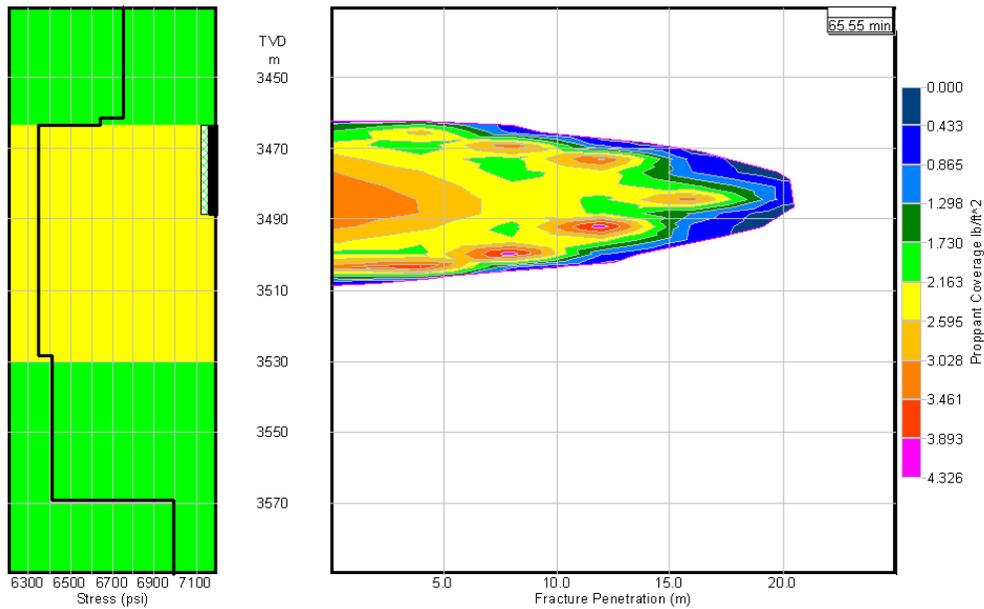


Figura 5.62 – Estimativa da fratura executada no *fracpack C* utilizando o *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

### 5.7.2. Resultados e escolha do melhor modelo

Utilizando os dados do declínio de pressão do minifrac foi possível definir o tempo de fechamento da fratura sendo este igual a 1,1 min. Desta forma foi obtida uma eficiência do minifrac em torno de 5% e conseqüentemente os expoentes  $\alpha$  estimados para cada geometria foram: 0,52 para a geometria radial, 0,50 para a geometria KGD e 0,51 para a geometria PKN. Com estas informações e conhecendo-se o coeficiente de filtração é possível utilizar o modelo desenvolvido para analisar e interpretar a curva de pressão de fundo registrada durante a operação de *fracpack*. A tabela 5.6 e as figuras, 5.63 e 5.64, apresentam um resumo dos resultados obtidos com os modelos desenvolvidos e com os simuladores comerciais. Cabe ressaltar que, em função da grande diferença entre a espessura do reservatório e o intervalo canhoneado, a altura da fratura nas geometrias PKN e KGD foi considerada igual ao intervalo canhoneado neste caso.

Fracpack C - Resultados						
Modelo		R ou xf final	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	w médio final	eficiência final
		(m)	(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm)	(%)
Desenvolvido	Radial - Canh	20,4	16,4	4,22	5,28	16,0
	Radial - Sh	23,6	18,0	3,58	4,95	19,0
	KGD	25,5	15,1	4,74	7,14	19,0
	PKN	25,8	15,4	5,27	6,96	17,0
Simuladores Comerciais	Meyer - Canh	16,8	16,8	3,53	2,62	11,0
	Meyer - Sh	22,4	22,4	2,82	2,01	12,0
	Stimplan - Canh	24,2	24,2	2,22	1,17	7,0
	Stimplan - Sh	20,5	20,5	2,72	1,63	10,0

Tabela 5.6 – Resumo dos resultados obtidos a partir da interpretação dos registros do *fracpack C*.

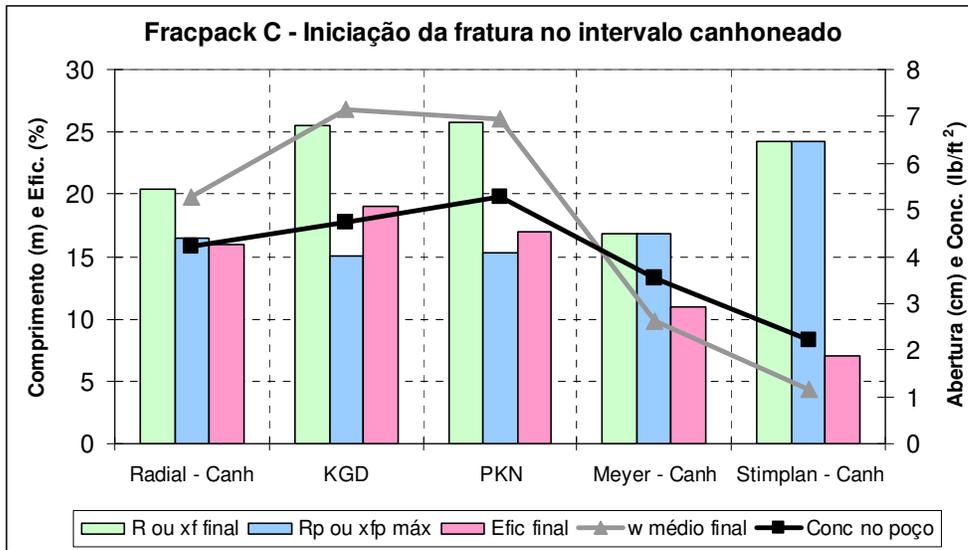


Figura 5.63 – Resultados obtidos para o *fracpack C* com os modelos desenvolvidos e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

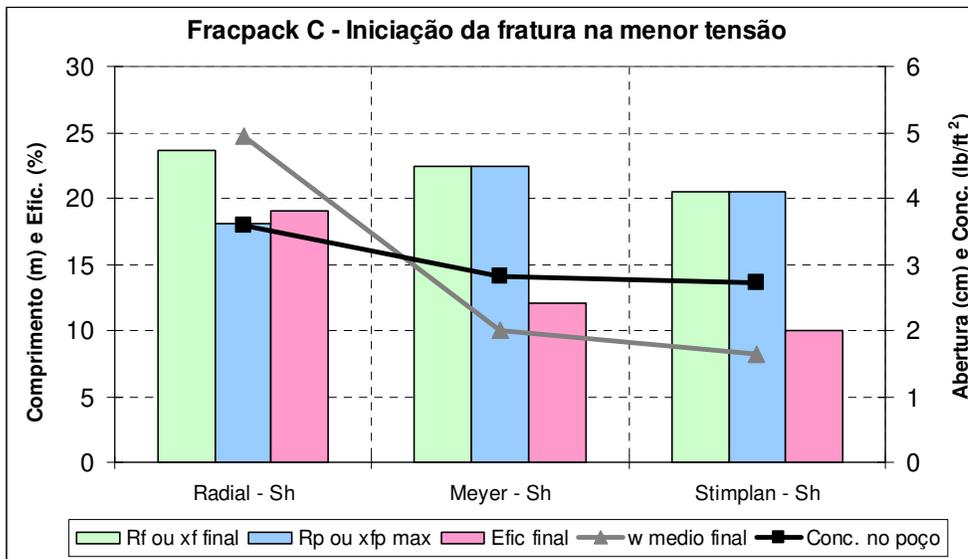


Figura 5.64 – Resultados obtidos para o *fracpack C* com o modelo desenvolvido e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Para a definição do melhor modelo de previsão dos resultados obtidos nos simuladores comerciais foi realizada uma análise de erros utilizando a diferença quadrada entre os índices definidos previamente. A tabela 5.7 apresenta esta comparação, ressaltando-se que os resultados dos modelos: Radial-canhoneado, KGD e PKN foram comparados aos resultados dos simuladores na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e os resultados do

modelo Radial-Sh foram comparados aos obtidos na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

<b>Fracpack C - Comparação entre os índices - Diferença quadrada</b>				
Modelo	Modelo desenvolvido x Simulador comercial	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	Índice geométrico
		(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm/m)
RADIAL Canh	Radial - Canh x Meyer	0,1	0,5	1,1E-02
	Radial - Canh x Stimplan	60,5	4,0	4,4E-02
RADIAL Sh	Radial - Sh x Meyer	19,0	0,6	1,4E-02
	Radial - Sh x Stimplan	6,1	0,7	1,7E-02
KGD	KGD x Meyer	3,0	1,5	1,5E-02
	KGD x Stimplan	83,4	6,4	5,4E-02
PKN	PKN x Meyer	2,0	3,0	1,3E-02
	PKN x Stimplan	77,8	9,3	4,9E-02
<b>Melhor previsão - MEYER:</b>		<b>Radial Canh</b>	<b>Radial Canh</b>	<b>Radial Canh</b>
<b>Melhor previsão - Stimplan:</b>		<b>Radial Sh</b>	<b>Radial Sh</b>	<b>Radial Sh</b>

Tabela 5.7 – Comparação entre os índices dos modelos desenvolvidos com os obtidos nos simuladores comerciais para o *fracpack C*.

De acordo com a tabela 5.7, a melhor previsão dos resultados do *software* Meyer foi feita pelo modelo desenvolvido para a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e a melhor previsão dos resultados do *software* Stimplan foi feita pelo modelo desenvolvido para a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Com relação à previsão dos resultados do simulador Meyer, a comparação apresentada na tabela 5.7 também pode ser observada no gráfico da figura 5.65, onde o erro quadrático referente ao índice geométrico foi multiplicado por um fator de 100 em função da escala do gráfico. É possível notar que o modelo radial com iniciação da fratura no intervalo canhoneado se destacou em função dos pequenos erros apresentados para o raio da fratura e para a concentração no poço, já que o índice geométrico mostrou um erro quadrático semelhante aos obtidos com os modelos desenvolvidos para as outras geometrias. Os resultados do modelo radial com iniciação da fratura no intervalo canhoneado e dos simuladores comerciais estão apresentados nas figuras 5.66 a 5.69.

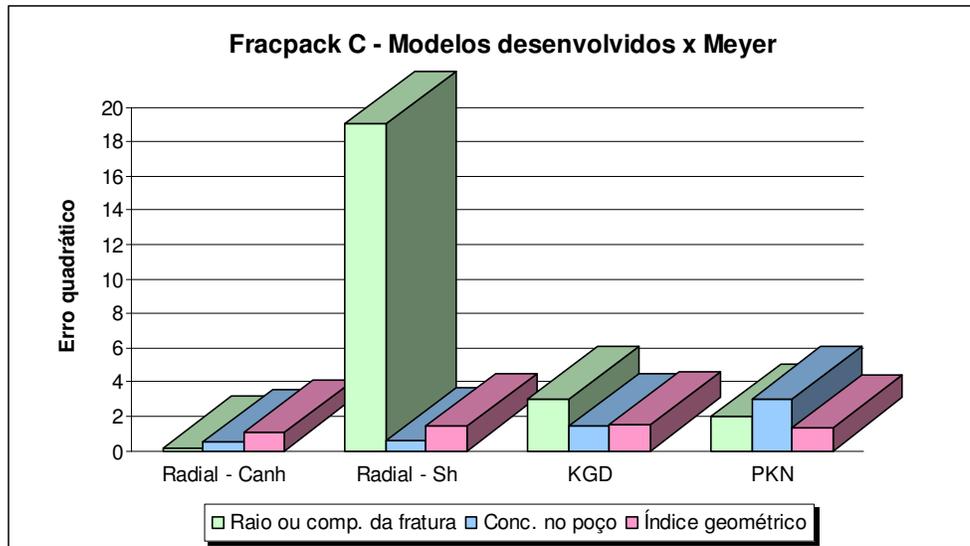


Figura 5.65 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador MFrac (Meyer) para o *fracpack C*.

Analisando o modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e comparando-o com os resultados obtidos pelo simulador Meyer é possível notar uma boa previsão da curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura, conforme apresentado na figura 5.66. A concentração do agente de sustentação no poço prevista pelo modelo ficou aproximadamente 0,7 lb/ft<sup>2</sup> maior que a previsão do simulador, no entanto, se forem comparadas as máximas concentrações estimadas, essa diferença passa a ser de apenas 0.02 lb/ft<sup>2</sup>, ou seja, um erro desprezível. O gráfico também mostra uma boa previsão do raio da fratura, já que o raio de empacotamento estimado pelo modelo desenvolvido, em torno de 16,5 m, é o mesmo previsto pelo simulador. Como pode ser observado na figura, até este raio estão as maiores concentrações de agente de sustentação do modelo desenvolvido, coincidindo assim com a curva do simulador MFrac.

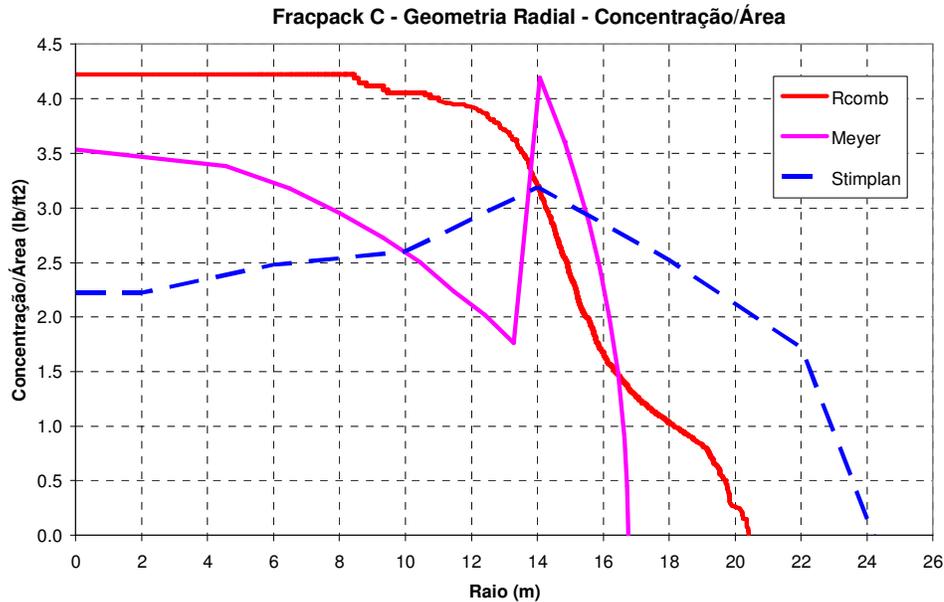


Figura 5.66 – Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura no final do bombeio do *fracpack C*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Com relação à previsão do raio da fratura ao longo do tempo, é possível notar na figura 5.67 que os resultados apresentaram uma grande dispersão, no entanto, utilizando uma linha de tendência polinomial, foi estimado o máximo raio de empacotamento previsto pelo modelo desenvolvido, sendo este praticamente igual ao raio estimado pelo simulador Meyer. Essa estimativa a partir da linha de tendência pode ser validada observando-se a curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura, já que até este comprimento estão as maiores concentrações, conforme já mencionado. Também é possível observar que o empacotamento da fratura foi iniciado no mesmo instante de tempo nos dois modelos, em torno de 45 min. Analisando a propagação do raio hidráulico, ele apresentou o mesmo formato da curva prevista pelo *software* Meyer, se mantendo com uma diferença de 3 m em média em relação à linha de tendência do raio de empacotamento.

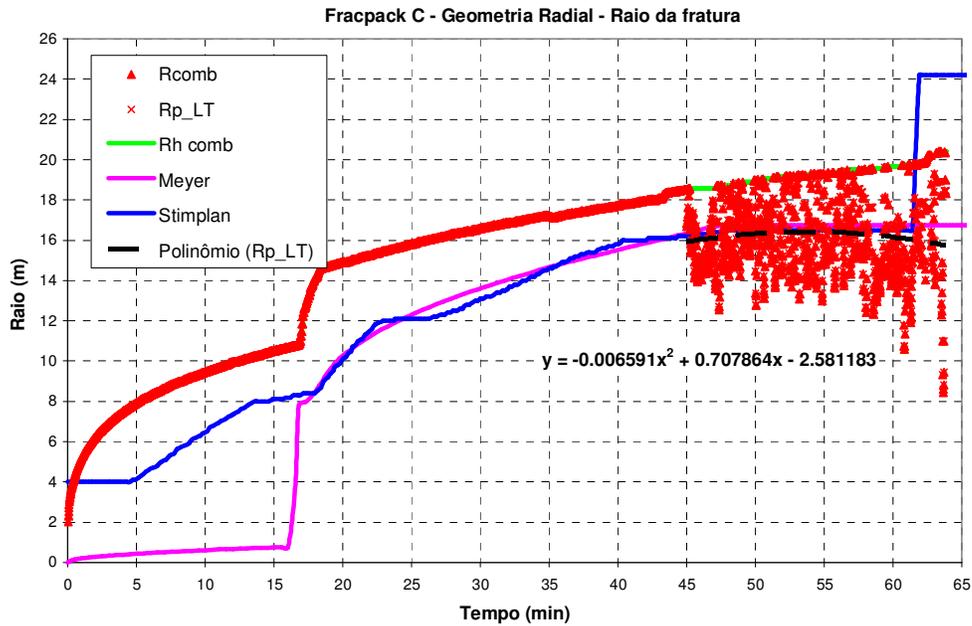


Figura 5.67 – Raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack C*, estimado pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

A previsão da abertura da fratura pelo modelo desenvolvido, figura 5.68, não apresentou bons resultados, além da grande dispersão, ainda ficou fora da envoltória estabelecida com os resultados dos simuladores comerciais. Comparando a resposta do modelo desenvolvido, utilizando a linha de tendência linear, com o resultado da abertura média da fratura estimada pelo simulador MFrac, nota-se uma diferença de aproximadamente 2,7 cm ao final do bombeio. A mesma estimativa ruim foi feita pelos outros modelos desenvolvidos, como pode ser observado na tabela 5.6 e na figura 5.63 através da comparação entre os valores de abertura média estimados.

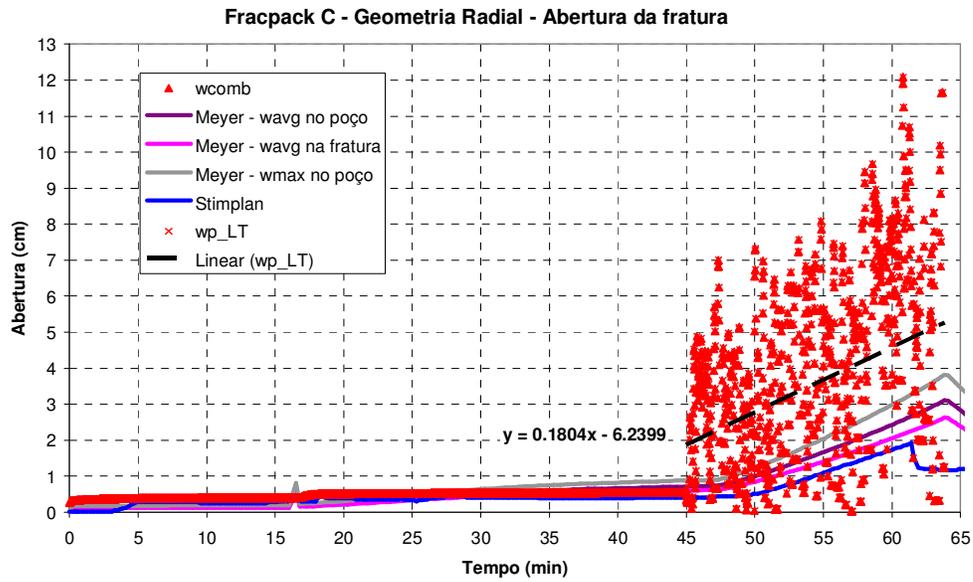


Figura 5.68 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack C*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Com relação à eficiência da fratura, figura 5.69, o modelo desenvolvido fez uma boa previsão antes do início dos empacotamentos, até o instante de 45 min, quando passou a estimar valores maiores que os previstos pelo Meyer de acordo com a linha de tendência linear utilizada. Enquanto a eficiência ao final do bombeio ficou em torno de 0,11 no Meyer, a previsão do modelo desenvolvido foi de 0,16 com base na linha de tendência linear.

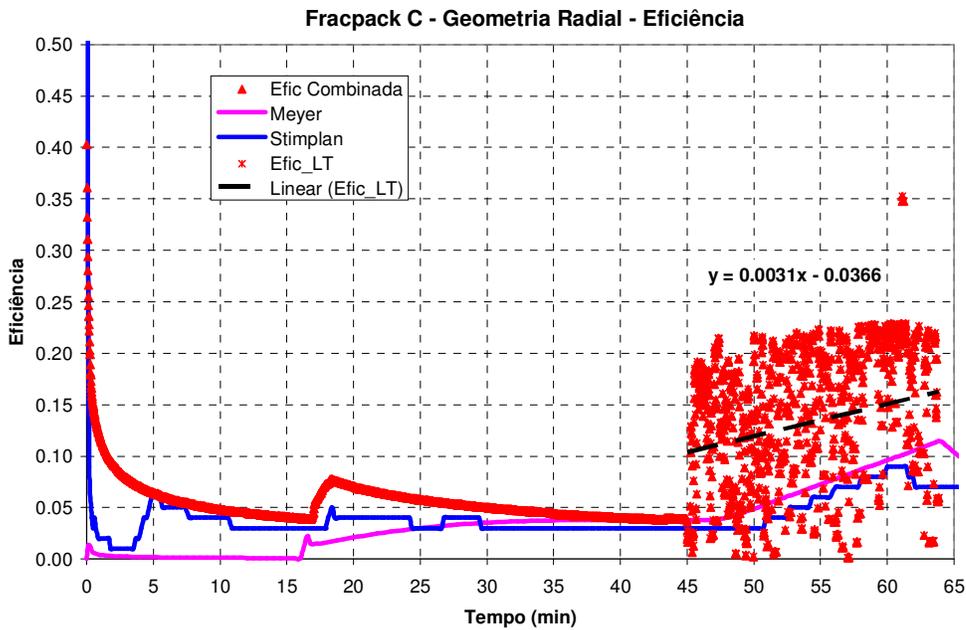


Figura 5.69 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack C*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Com relação ao simulador Stimplan, a tabela 5.7 mostrou que a melhor previsão dos resultados foi feita pelo modelo desenvolvido para a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão. Como pode ser observado no gráfico da figura 5.70, além de apresentar o menor erro quadrático no índice de concentração no poço e no índice geométrico, o modelo desenvolvido com a geometria radial para iniciação da fratura na menor tensão se destacou principalmente na previsão do raio da fratura, apresentando um erro quadrático bem inferior aos dos outros modelos. Vale ressaltar que o erro quadrático relativo ao índice geométrico foi multiplicado por um fator de 100 em função da escala no gráfico. Os resultados deste modelo e dos simuladores comerciais estão apresentados nas figuras 5.71 a 5.74.

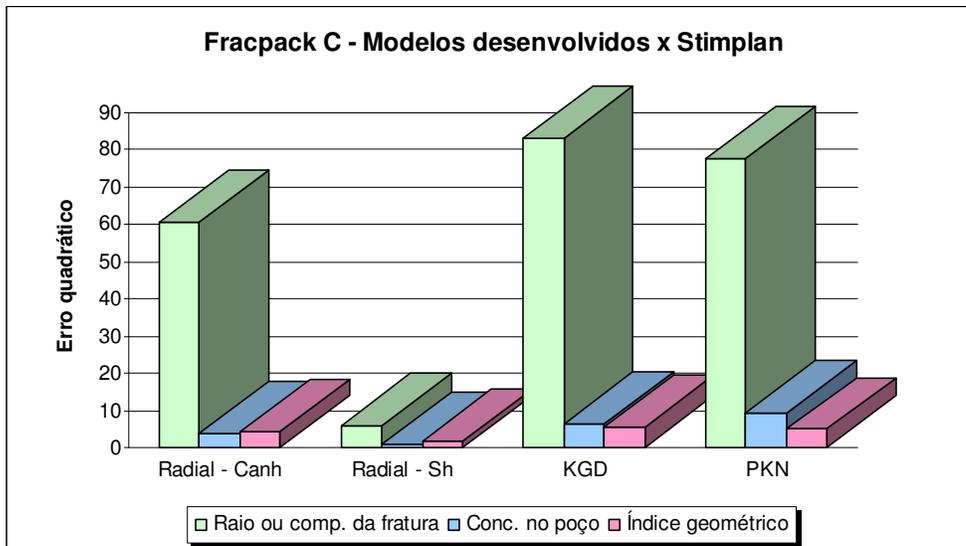


Figura 5.70 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador Stimplan para o *fracpack C*.

Analisando o modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão e comparando-o com os resultados obtidos pelo simulador Stimplan é possível notar uma boa previsão da curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura, conforme apresentado na figura 5.71. Apesar da concentração do agente de sustentação no poço prevista pelo modelo desenvolvido ter ficado aproximadamente 0,9 lb/ft<sup>2</sup> maior que a previsão do simulador, este foi o melhor resultado entre os modelos desenvolvidos e, além disso, as curvas apresentaram um declínio bem semelhante a partir do raio igual a 15 m.

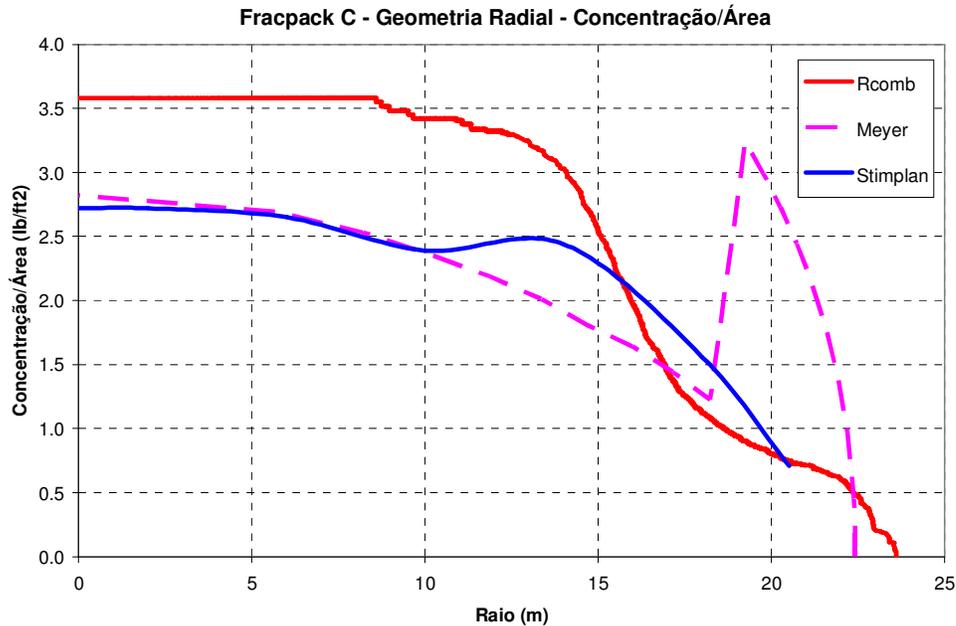


Figura 5.71 – Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura no final do bombeio do *fracpack C*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Da mesma forma que observado no modelo de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, os resultados obtidos para o modelo radial com iniciação da fratura na menor tensão também apresentaram grande dispersão. Considerando a linha de tendência polinomial utilizada, a previsão do raio de empacotamento da fratura mostrou uma diferença de 2 m em relação ao raio estimado pelo Stimplan, o qual ficou exatamente entre os raios, hidráulico e de empacotamento, previstos pelo modelo desenvolvido, figura 5.72. Mesmo com esta diferença é importante ressaltar que este modelo apresentou um erro bastante inferior aos obtidos nos outros modelos na comparação deste índice. Outro ponto também observado foi que o empacotamento da fratura previsto pelo modelo desenvolvido iniciou no mesmo instante de tempo que o simulado pelo *software* comercial, em torno de 45 min. Com relação à propagação do raio hidráulico, a curva prevista pelo modelo desenvolvido possui o mesmo formato da curva estimada pelo Stimplan, no entanto, apresenta uma diferença de aproximadamente 2 m na magnitude dos raios ao longo do tempo, o que pode ser considerado um valor razoável. É interessante observar que a previsão do modelo desenvolvido coincide com a curva estimada pelo *software* MFrac após 15 min de bombeio, no entanto, este resultado não foi levado em consideração

na escolha do melhor modelo, já que o índice estabelecido é função do raio de empacotamento.

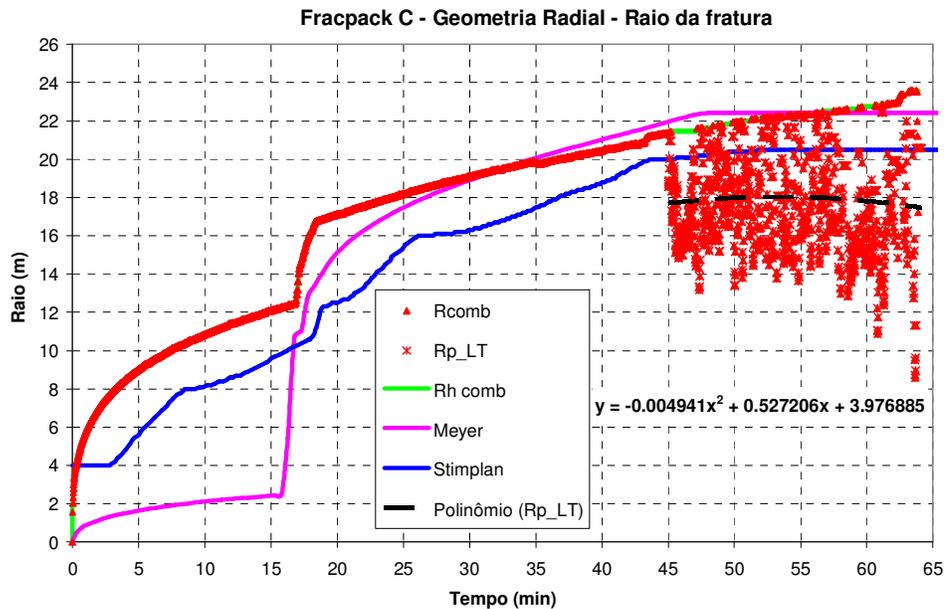


Figura 5.72 – Raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack C*, estimado pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Conforme já mencionado, os modelos desenvolvidos não apresentaram bons resultados na previsão da abertura da fratura, o que pode ser observado na tabela 5.6 e nos gráficos das figuras 5.63 e 5.64, comparando os resultados obtidos nos modelos desenvolvidos com as respostas dos simuladores. A figura 5.73 mostra a previsão da curva de abertura da fratura estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão. Além da grande dispersão dos resultados, a comparação da linha de tendência linear utilizada no modelo desenvolvido com a resposta obtida no Stimplan mostra uma diferença de aproximadamente 3,3 cm na abertura ao final do bombeio.

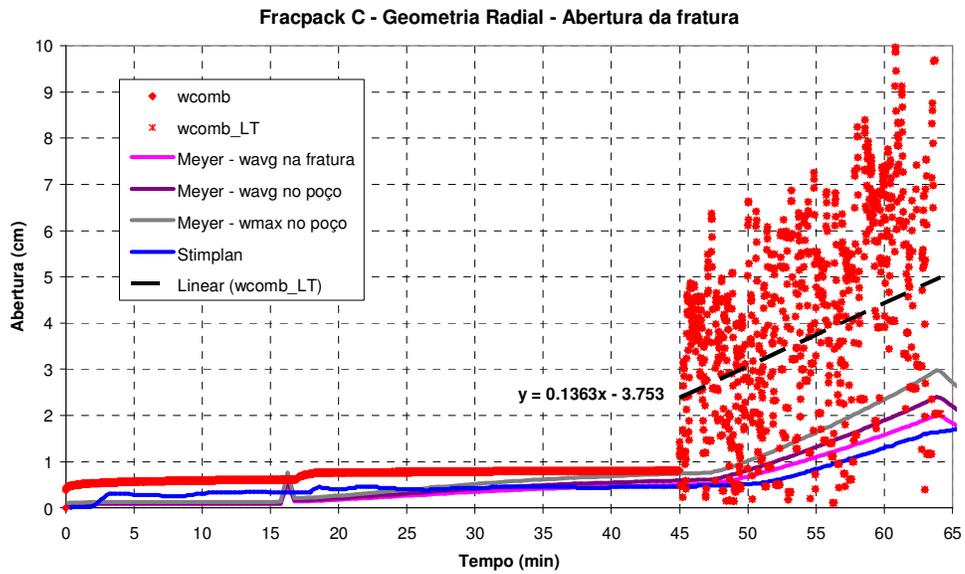


Figura 5.73 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack C*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Com relação à eficiência da fratura, observando a linha de tendência linear na figura 5.74, nota-se que o modelo desenvolvido estimou valores maiores que os previstos pelo Stimplan durante principalmente o empacotamento da fratura. Enquanto a eficiência ao final do bombeio no Stimplan ficou em torno de 0,10, a previsão do modelo desenvolvido foi de 0,19.

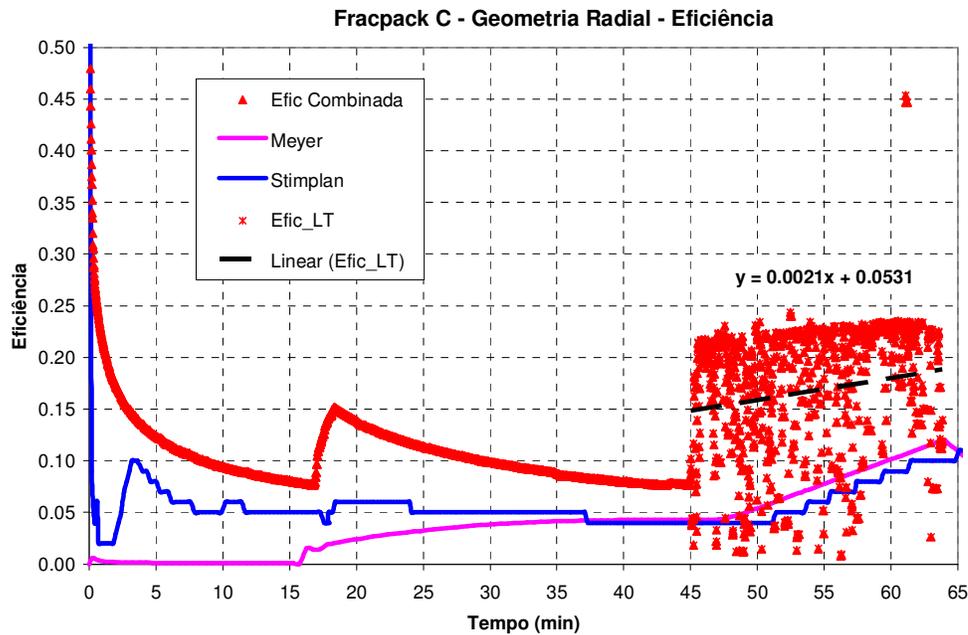


Figura 5.74 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack C*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

### 5.7.3. Evolução do modelo de Valkó & Oligney

A evolução do modelo de Valkó & Oligney será apresentada nos gráficos de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura, figura 5.75, e do raio ao longo do tempo, figura 5.76. Como não foram obtidos bons resultados na previsão da abertura da fratura e da eficiência ao longo do tempo, estes não serão analisados. Lembrando que o modelo original de Valkó & Oligney foi desenvolvido para a geometria radial de fratura, foram escolhidos os resultados relativos à condição de iniciação da fratura na menor tensão para serem apresentados, cujo modelo foi responsável pela melhor previsão das respostas do *software* Stimplan.

A figura 5.75 apresenta a evolução na curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura. A seta azul indica a evolução obtida na curva referente ao raio de empacotamento. É possível notar que as modificações efetuadas trouxeram ganho para o modelo, aproximando a curva prevista das curvas obtidas nos simuladores comerciais. As setas verdes indicam a evolução dos raios hidráulicos, sendo apresentada a curva referente ao raio hidráulico estimado pelo modelo original, a curva

referente ao raio hidráulico que utiliza o expoente alfa calculado a partir do declínio de pressão do minifrac e a curva referente ao raio hidráulico final, que inclui também a alteração relativa à resolução da equação do terceiro grau. Como o raio hidráulico define o comprimento final da fratura, cabe observar que a evolução do modelo levou a um aumento do raio da fratura, aproximando-o principalmente da resposta obtida pelo simulador Meyer. Conforme visto anteriormente, apesar do modelo de Valkó & Oligney não considerar um modelo de propagação, o raio hidráulico final, calculado com as alterações sugeridas por este trabalho, coincide com o raio hidráulico combinado, que é função do balanço de massa de Carter, o qual consiste no modelo de propagação incorporado ao método.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

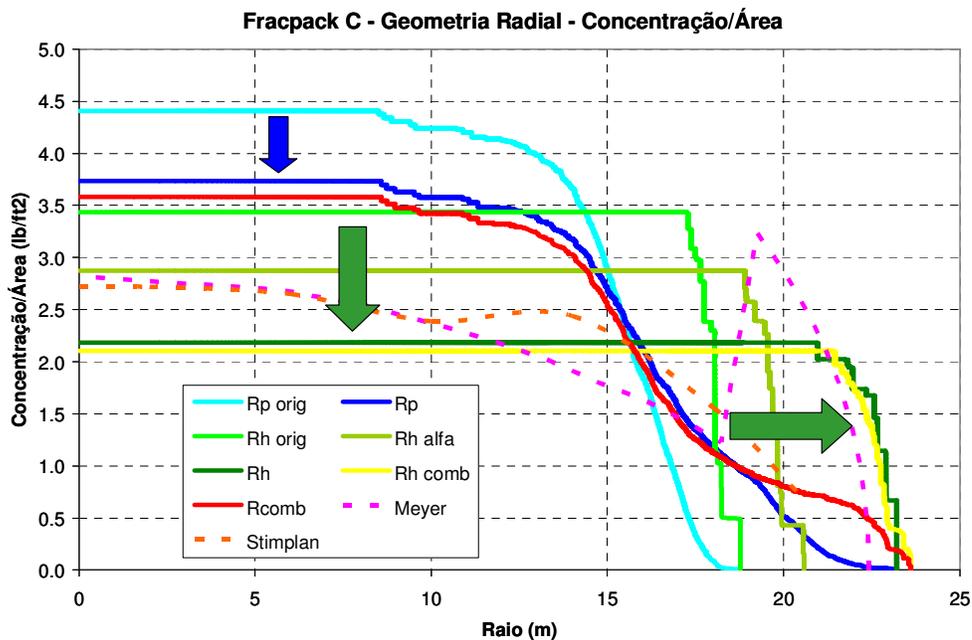


Figura 5.75 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura para o *fracpack C*.

De forma a simplificar a visualização e análise do gráfico da propagação do raio da fratura ao longo do tempo, figura 5.76, optou-se por não plotar os raios de empacotamento, sendo apresentados somente os raios hidráulicos, original e final, do modelo de Valkó & Oligney, o raio hidráulico combinado, resultante do modelo desenvolvido, e as respostas dos simuladores comerciais. Pode-se perceber que, apesar da boa previsão feita pelo modelo original de Valkó & Oligney da resposta obtida pelo Stimplan até aproximadamente 17 min, para o restante do bombeio, que se estende até 64 min, não foi feita uma boa

previsão e a curva original de Valkó & Oligney se manteve inferior às respostas estimadas pelos simuladores comerciais. Já as previsões efetuadas com o modelo desenvolvido e com o modelo de final Valkó & Oligney mantiveram boa concordância com os resultados dos simuladores a partir de 17 min.

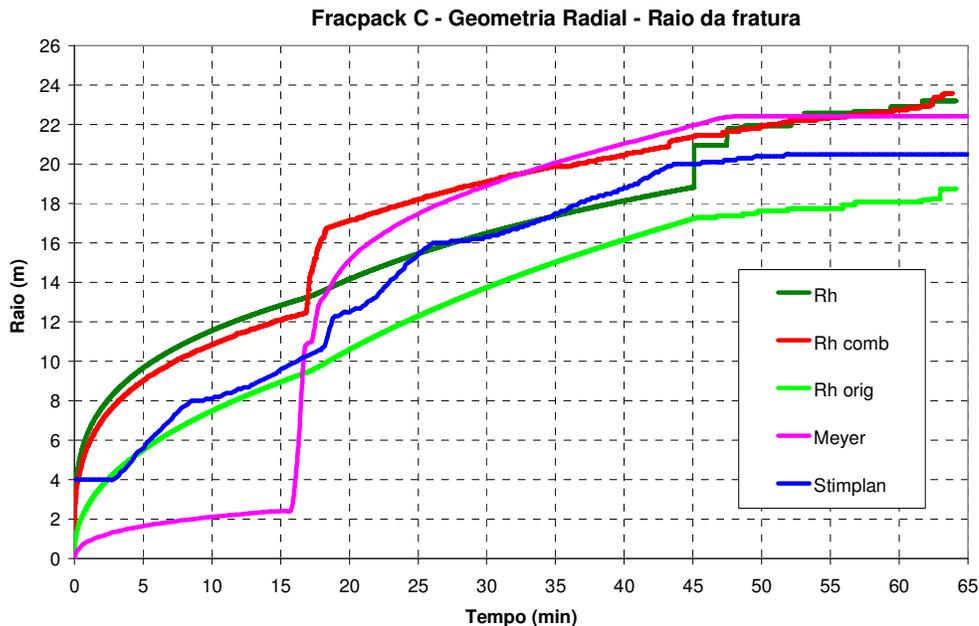


Figura 5.76 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão do raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack C*.

## 5.8. *Fracpack D*

Esta operação foi executada em lâmina d' água de 1852 m, em um arenito cujo topo encontra-se na profundidade de 3423 m, apresentando 38 m de espessura e 28 m de intervalo canhoneado. A permeabilidade estimada para a formação é de 1500 mD, seu módulo de elasticidade é de  $9,25 \times 10^5$  psi ( $6,38 \times 10^3$  MPa) e seu coeficiente de Poisson é 0,30. A temperatura na superfície foi estimada em 23°C enquanto a temperatura no reservatório é de 50°C. O fluido utilizado no tratamento possui uma carga polimérica de 35 lb/Mgal e, utilizando a média das temperaturas da superfície e do reservatório, foram escolhidos os parâmetros reológicos do fluido do tratamento a serem utilizados no modelo, sendo estes:  $n$  igual a 0,4485 e  $K$  igual a  $0,1774 \text{ lbf}\cdot\text{s}^n/\text{ft}^2$ . O agente de sustentação bombeado foi cerâmica leve, sendo sua massa específica igual a  $2,71 \text{ g/cm}^3$ .

### 5.8.1. Calibração do modelo

#### 5.8.1.1. Iniciação da fratura no intervalo canhoneado

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial MFrac na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, sendo obtido o coeficiente de filtração igual a  $0,025 \text{ ft/min}^{1/2}$ . A figura 5.77 mostra as curvas de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada após a calibração do modelo na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. Já a figura 5.78 apresenta, além do perfil litológico e de tensões, a geometria final estimada para a fratura nesta mesma condição, cujo comprimento foi de aproximadamente 14 m e a altura de 37 m.

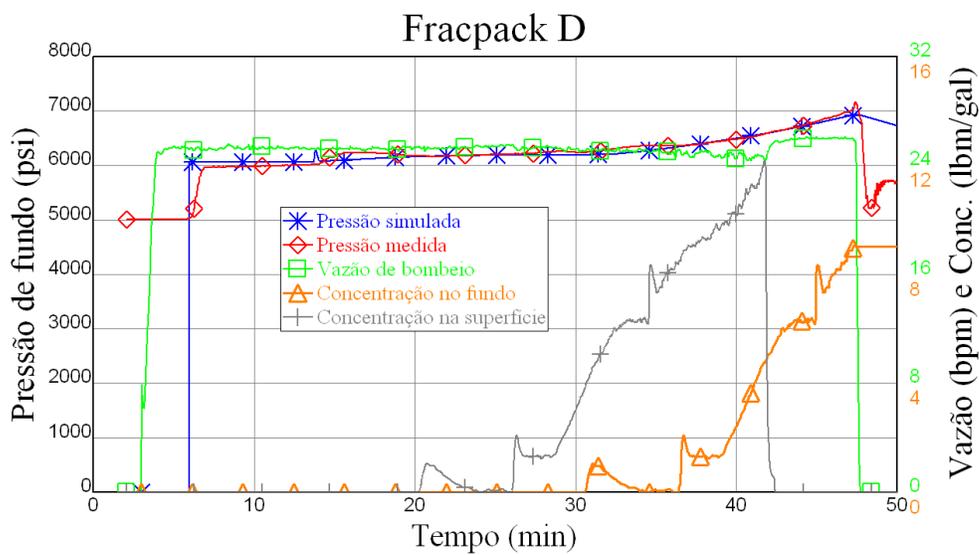


Figura 5.77 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack D* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

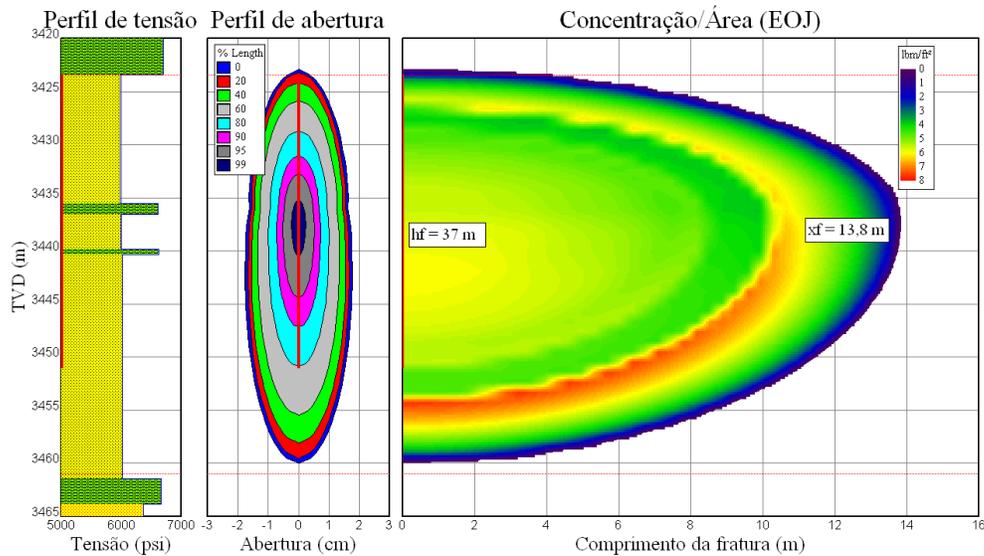


Figura 5.78 – Simulação da fratura executada no *fracpack D* no *software Meyer* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software MFrac*, foi feita uma simulação no *software* comercial *Stimplan* considerando a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. A figura 5.79 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo *Stimplan* e a figura 5.80 mostra a geometria final da fratura estimada nesta mesma condição, que apresentou um comprimento de 17,3 m e altura de 38 m. Em função do bom resultado apresentado pelo gráfico de pressão, a simulação foi considerada válida e será utilizada para comparação com os resultados obtidos nos modelos desenvolvidos.

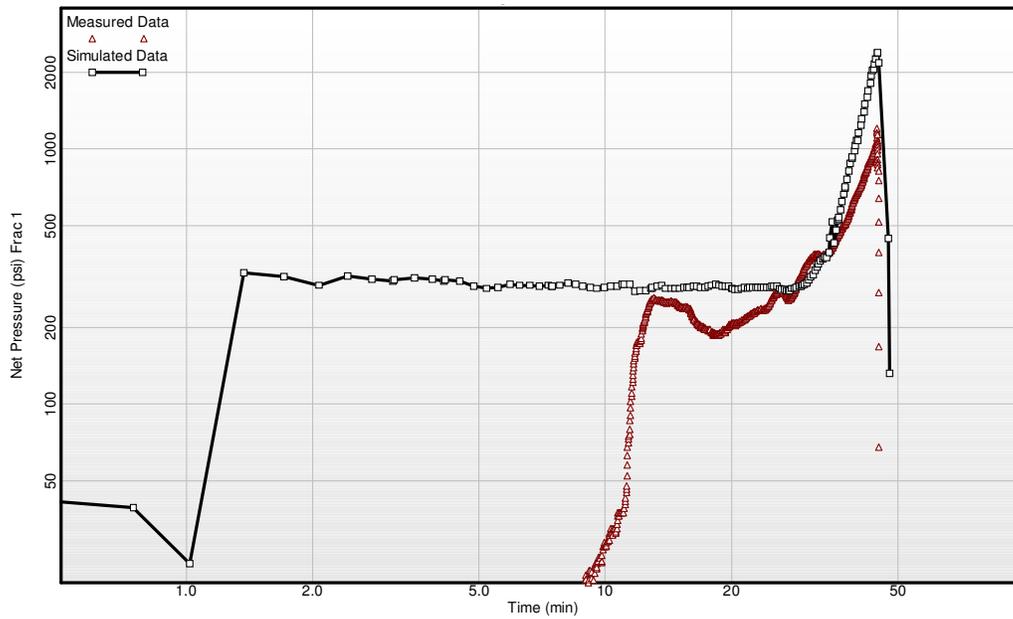


Figura 5.79 – Simulação do *fracpack D* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

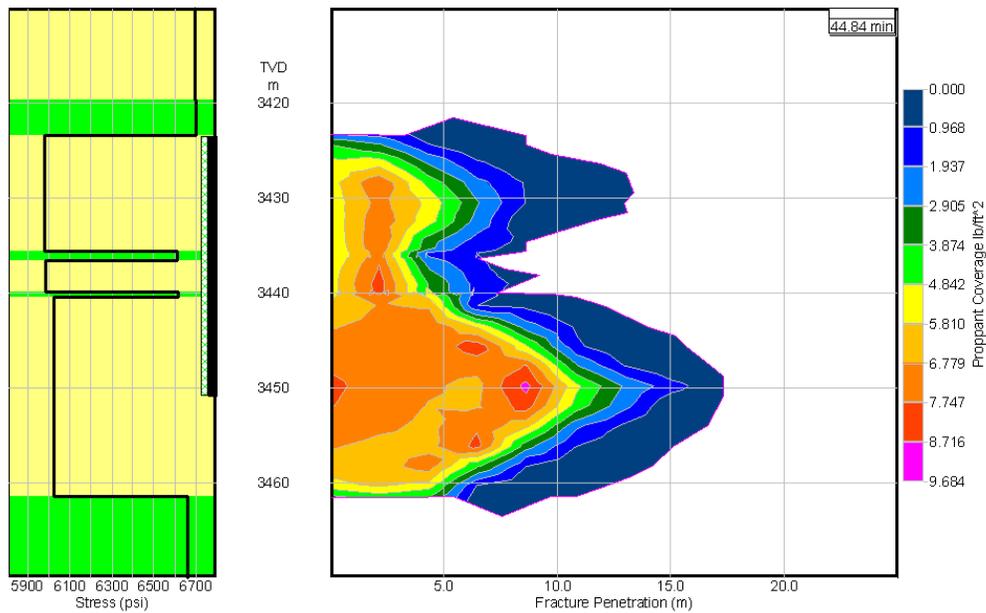


Figura 5.80 – Estimativa da fratura executada no *fracpack D* através da simulação utilizando o *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

### 5.8.1.2. Iniciação da fratura na menor tensão

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial MFrac na condição de iniciação da fratura na menor tensão, sendo obtido um coeficiente de filtração igual a  $0,0147 \text{ ft/min}^{1/2}$ . A figura 5.81 mostra a curva de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* MFrac após a calibração do modelo para esta condição. Já a figura 5.82 apresenta, além do perfil litológico e de tensões, a geometria final estimada para a fratura, cujo comprimento foi de 45 m e a altura de 21 m.

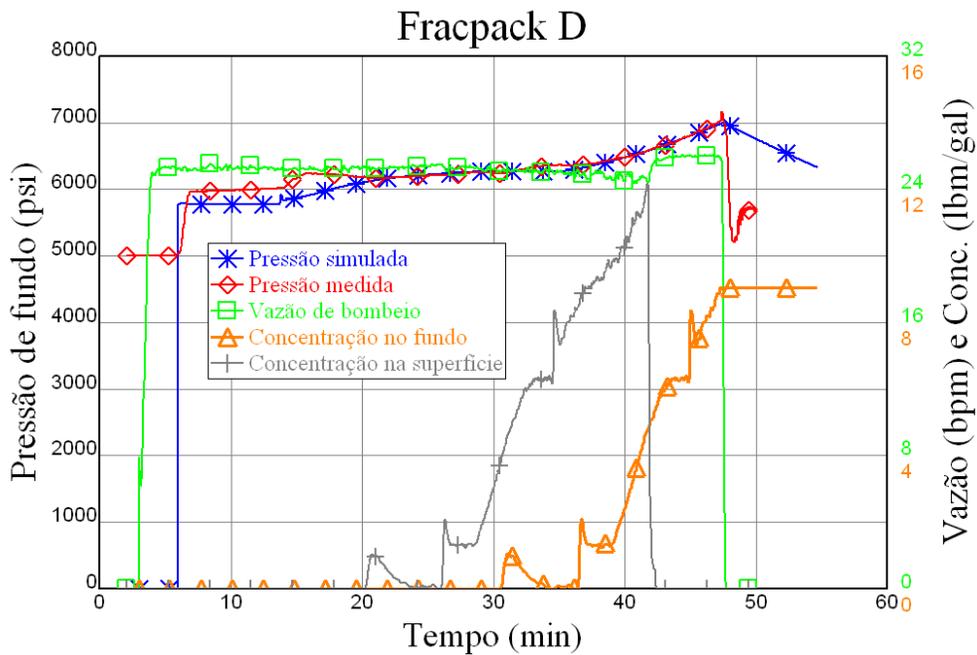


Figura 5.81 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack D* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

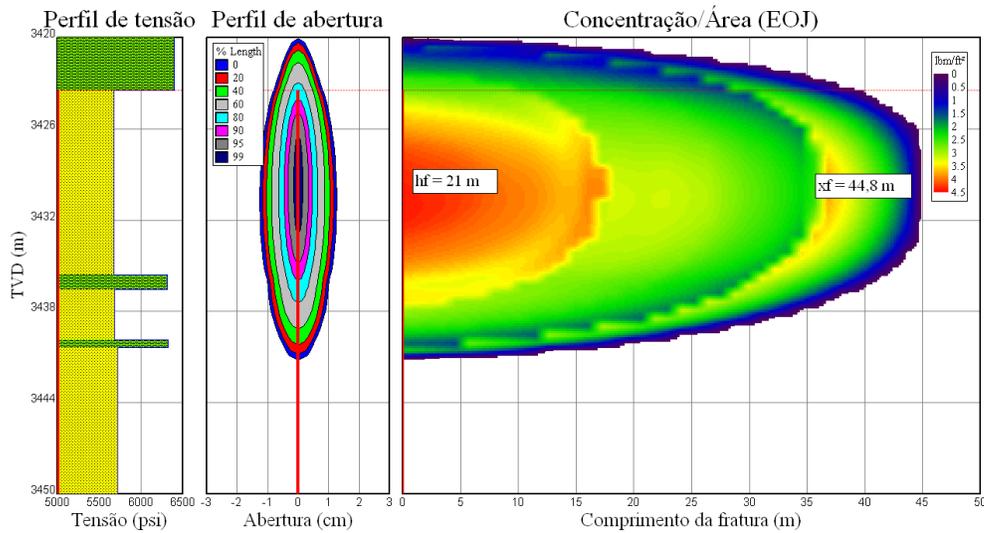


Figura 5.82 – Simulação da fratura executada no *fracpack D* no *software* Meyer na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software* MFrac, foi feita uma simulação no *software* comercial Stimplan considerando a condição de iniciação da fratura na menor tensão. A figura 5.83 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo Stimplan e a figura 5.84 mostra a geometria final da fratura estimada nesta mesma condição, que apresentou um comprimento de 25,9 m e altura de 38 m. Assim como na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, a simulação foi considerada válida e será utilizada para comparação com os resultados dos modelos desenvolvidos.

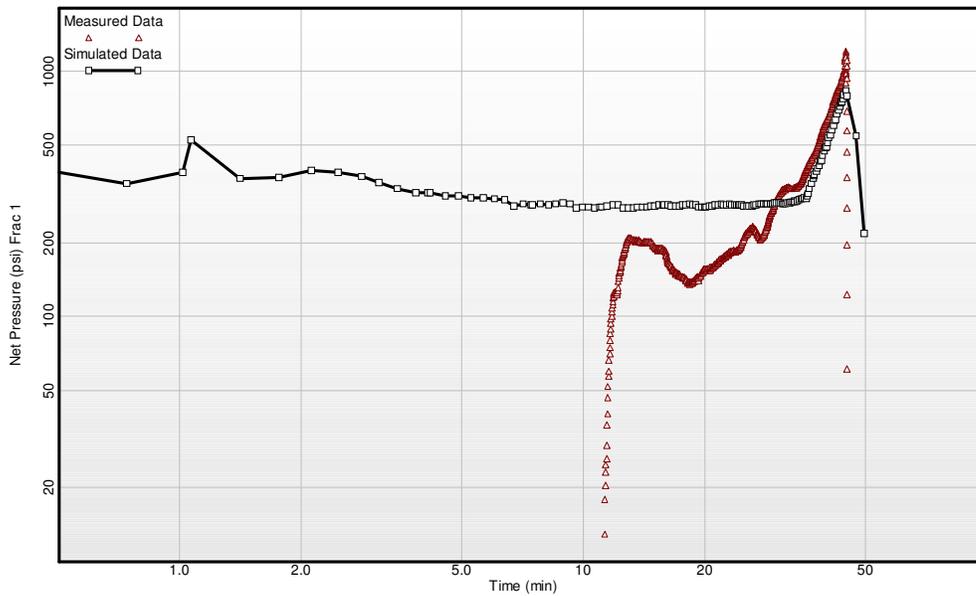


Figura 5.83 – Simulação do *fracpack* D no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

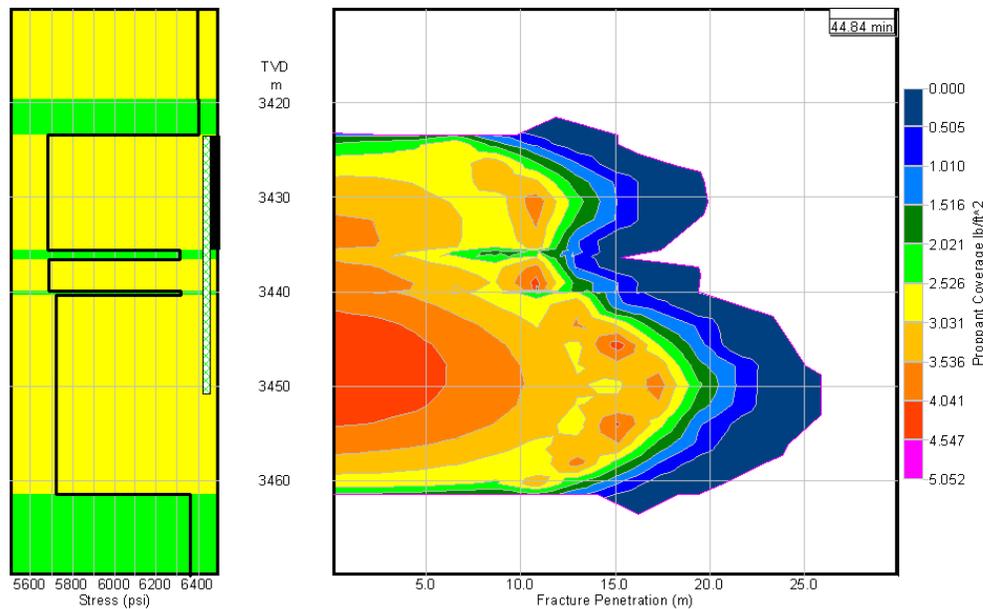


Figura 5.84 – Estimativa da fratura executada no *fracpack* D através da simulação utilizando o *software* Stimplan considerando a iniciação da fratura na menor tensão.

**5.8.2. Resultados e escolha do melhor modelo**

Utilizando os dados do declínio de pressão do minifrac foi possível definir o tempo de fechamento da fratura sendo este igual a 2,0 min. Desta forma foi obtida uma eficiência do minifrac em torno de 8% e conseqüentemente os

expoentes  $\alpha$  estimados para cada geometria foram: 0,52 para a geometria radial, 0,51 para a geometria KGD e 0,51 para a geometria PKN. Com estas informações e conhecendo-se o coeficiente de filtração é possível utilizar o modelo desenvolvido para analisar e interpretar a curva de pressão de fundo registrada durante a operação de *fracpack*. A tabela 5.8 e as figuras, 5.85 e 5.86, apresentam um resumo dos resultados obtidos com os modelos desenvolvidos e com os simuladores comerciais. Cabe ressaltar que nas geometrias PKN e KGD a altura da fratura foi assumida como igual espessura do reservatório.

Fracpack D - Resultados						
Modelo		R ou xf final	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	w médio final	eficiência final
		(m)	(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm)	(%)
Desenvolvido	Radial - Canh	18,8	16,1	6,09	6,00	22,4
	Radial - Sh	24,1	20,0	4,63	5,17	25,1
	KGD	14,8	10,7	6,11	6,14	23,0
	PKN	14,7	9,7	9,30	9,10	22,6
Simuladores Comerciais	Meyer - Canh	13,8	13,8	5,10	3,05	11,4
	Meyer - Sh	44,8	44,8	3,35	1,81	13,5
	Stimplan - Canh	17,3	17,3	6,09	1,96	11,0
	Stimplan - Sh	25,9	25,9	3,65	1,42	13,0

Tabela 5.8 – Resumo dos resultados obtidos a partir da interpretação dos registros do *fracpack D*.

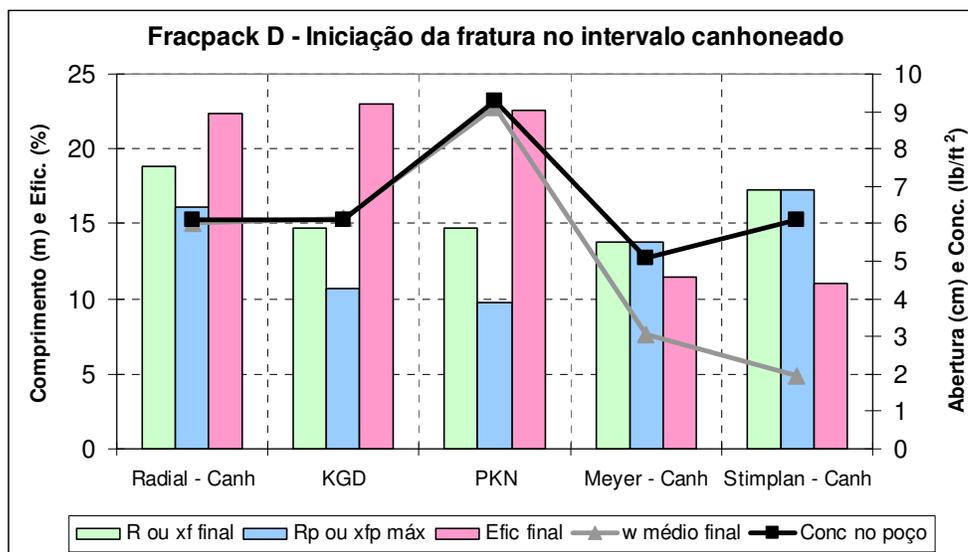


Figura 5.85 – Resultados obtidos para o *fracpack D* com os modelos desenvolvidos e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

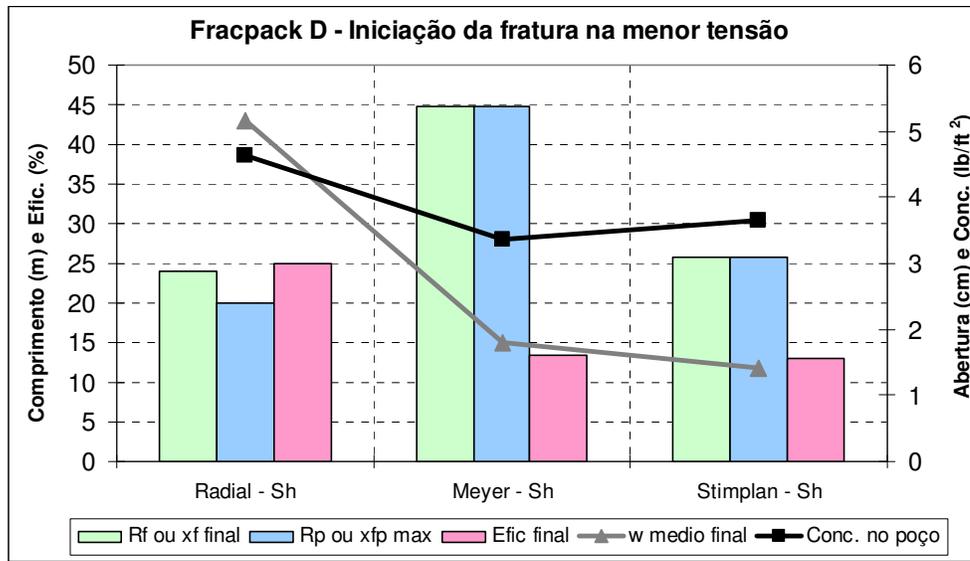


Figura 5.86 – Resultados obtidos para o *fracpack D* com o modelo desenvolvido e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Para a definição do melhor modelo de previsão dos resultados obtidos nos simuladores comerciais foi realizada uma análise de erros utilizando a diferença quadrada entre os índices definidos previamente. A tabela 5.9 apresenta esta comparação, ressaltando-se que os resultados dos modelos: Radial-canhoneado, KGD e PKN foram comparados aos resultados dos simuladores na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e os resultados do modelo Radial-Sh foram comparados aos obtidos na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

<b>Fracpack D - Comparação entre os índices - Diferença quadrada</b>				
Modelo	Modelo desenvolvido x Simulador comercial	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	Índice geométrico
		(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm/m)
RADIAL Canh	Radial - Canh x Meyer	5,5	1,0	9,5E-03
	Radial - Canh x Stimplan	1,3	0,0	4,2E-02
RADIAL Sh	Radial - Sh x Meyer	616,5	1,6	3,0E-02
	Radial - Sh x Stimplan	35,2	1,0	2,6E-02
KGD	KGD x Meyer	9,5	1,0	3,8E-02
	KGD x Stimplan	43,4	0,0	9,1E-02
PKN	PKN x Meyer	16,6	17,6	1,6E-01
	PKN x Stimplan	57,3	10,3	2,6E-01
<b>Melhor previsão - MEYER:</b>		<b>Radial Canh</b>	<b>Radial Canh</b>	<b>Radial Canh</b>
<b>Melhor previsão - Stimplan:</b>		<b>Radial Canh</b>	<b>Radial Canh</b>	Radial Sh

Tabela 5.9 – Comparação entre os índices dos modelos desenvolvidos com os obtidos nos simuladores comerciais para o *fracpack D*.

De acordo com a tabela 5.9, a melhor previsão dos resultados tanto para o *software* MFrac (Meyer) quanto para o *software* Stimplan foi feita pelo modelo desenvolvido com a geometria radial, na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. Esta avaliação também é apresentada nas figuras, 5.87 e 5.88, que mostram como o modelo radial com iniciação da fratura no intervalo canhoneado se destaca na previsão dos resultados dos simuladores comerciais em comparação às outras geometrias, ressaltando que o erro quadrático relativo ao índice geométrico foi multiplicado por um fator de 100 em função da escala do gráfico. Os resultados estão apresentados nas figuras 5.89 a 5.92.

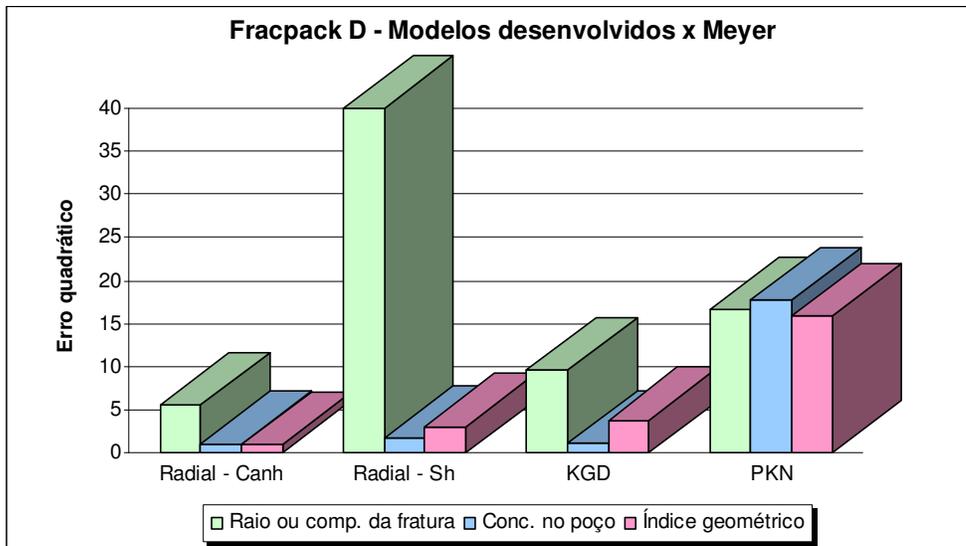


Figura 5.87 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador MFrac (Meyer) para o *fracpack D*.

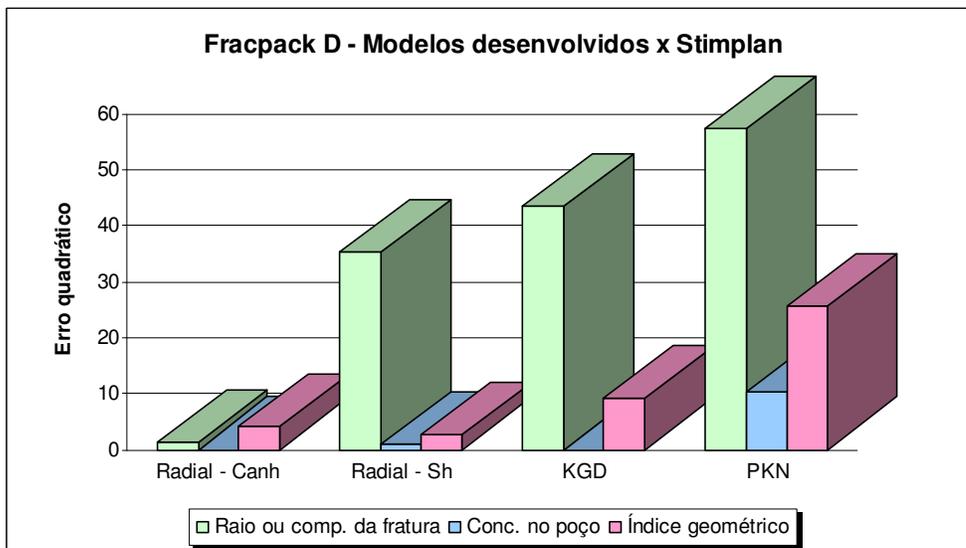


Figura 5.88 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador Stimplan para o *fracpack D*.

Analisando o gráfico de concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura, figura 5.89, e comparando a resposta obtida pelo modelo desenvolvido com o resultado do Stimplan, é possível notar uma boa previsão dos pontos extremos da curva, isto é, da concentração no poço, que ficou igual à estimada pelo simulador Stimplan, e do raio final da fratura, cuja previsão foi apenas 1,5 m maior que a resposta do Stimplan. Já comparando o modelo desenvolvido com o simulador MFrac, observa-se uma melhor previsão da

distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura, isto é, verifica-se uma boa previsão do formato da curva, que ficou no entanto  $1,0 \text{ lb/ft}^2$  na média superior a prevista pelo MFrac, mas com o início do declínio da curva apenas 1 m após o previsto pelo simulador comercial. Já a curva prevista pelo simulador Stimplan inicia esse declínio por volta de um raio de fratura de apenas 5 m.

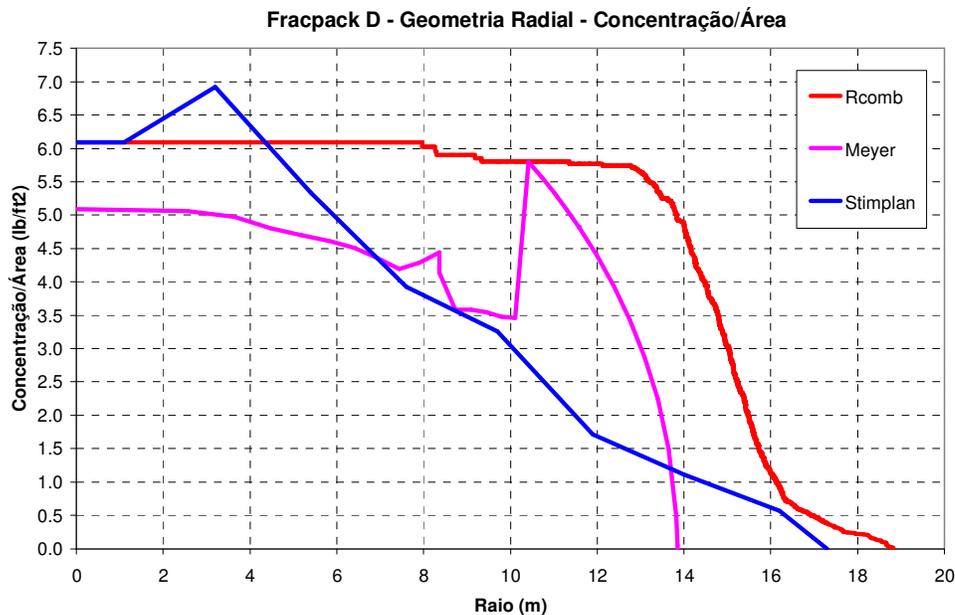


Figura 5.89 – Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura ao final do bombeio do *fracpack D*.

Observando a figura 5.90, que apresenta o gráfico de propagação do raio da fratura ao longo do tempo, nota-se que antes do início dos empacotamentos, o raio previsto pelo modelo desenvolvido ficou superior as respostas obtidas nos simuladores comerciais. Com o início do empacotamento da fratura, que ocorreu por volta dos 28 min, o raio hidráulico estimado pelo modelo desenvolvido se aproxima da previsão obtida pelo Stimplan e o raio de empacotamento fica entre as respostas dos dois simuladores. Cabe ressaltar que entre os instantes 31 min e 34 min, foram registrados crescimentos e declínios de pressão durante a operação de *fracpack* e, como estas intercalações geram o empacotamento e a propagação da fratura respectivamente, foi observado um empacotamento da fratura mais próximo de sua extremidade final. Este efeito é mostrado no gráfico pelo crescimento do raio de empacotamento na direção do raio hidráulico, aproximando desta forma o raio de empacotamento estimado e a resposta obtida

com o simulador Stimplan. O efeito destas intercalações também pode ser observado nos gráficos de abertura e eficiência ao longo do tempo, como será mostrado nas figuras 5.91 e 5.92.

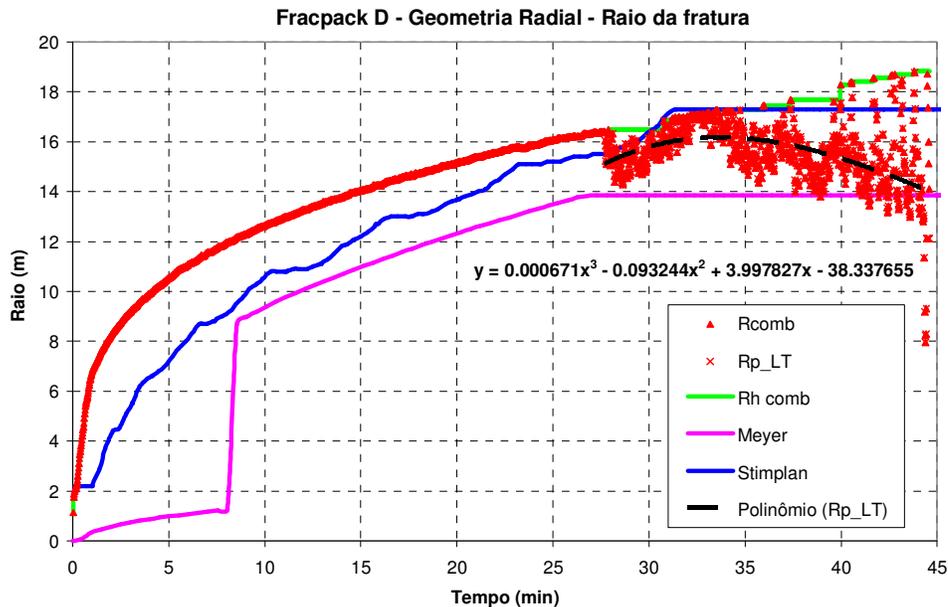


Figura 5.90 – Raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack D*.

A figura 5.91 apresenta a previsão do comportamento da abertura da fratura ao longo do tempo. Até o instante de 28 min, antes do início dos empacotamentos, o modelo desenvolvido fez uma boa previsão da abertura da fratura ao longo do tempo. A partir deste instante, quando a abertura da fratura começa a aumentar, foi utilizada uma linha de tendência linear para representar os pontos registrados. Observa-se que a linha de tendência permanece superior às respostas obtidas com os simuladores comerciais durante todo o restante do bombeio, sendo este comportamento também observado nos outros modelos desenvolvidos, por meio das aberturas finais estimadas, apresentadas na tabela 5.8. Conforme mencionado anteriormente, no intervalo entre 31 min e 34 min nota-se o mesmo comportamento observado no gráfico de propagação do raio da fratura ao longo do tempo, figura 5.90. Como era esperado, enquanto o raio de empacotamento aumenta nos instantes entre 31min e 34 min, ocorre uma redução na abertura da fratura neste mesmo intervalo de tempo.

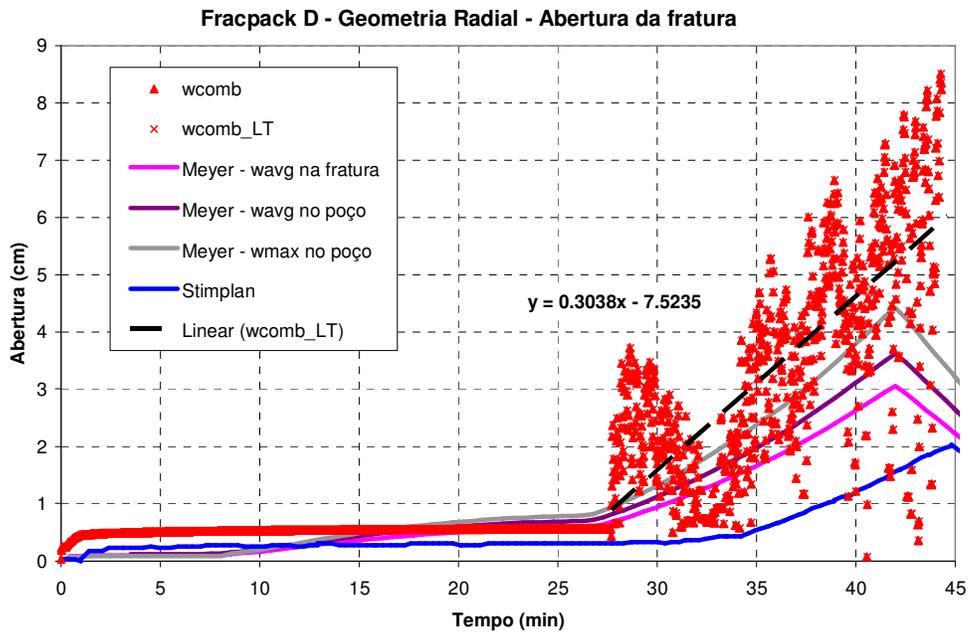


Figura 5.91 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack D*.

A estimativa da eficiência pelo modelo desenvolvido, apresentada na figura 5.92, ficou superior aos resultados obtidos com os modelos comerciais. Enquanto o modelo desenvolvido estimou uma eficiência em torno de 0,22 no final do bombeio, foi estimado pelos simuladores comerciais Meyer e Stimplan eficiências de 0,15 e 0,10 respectivamente.

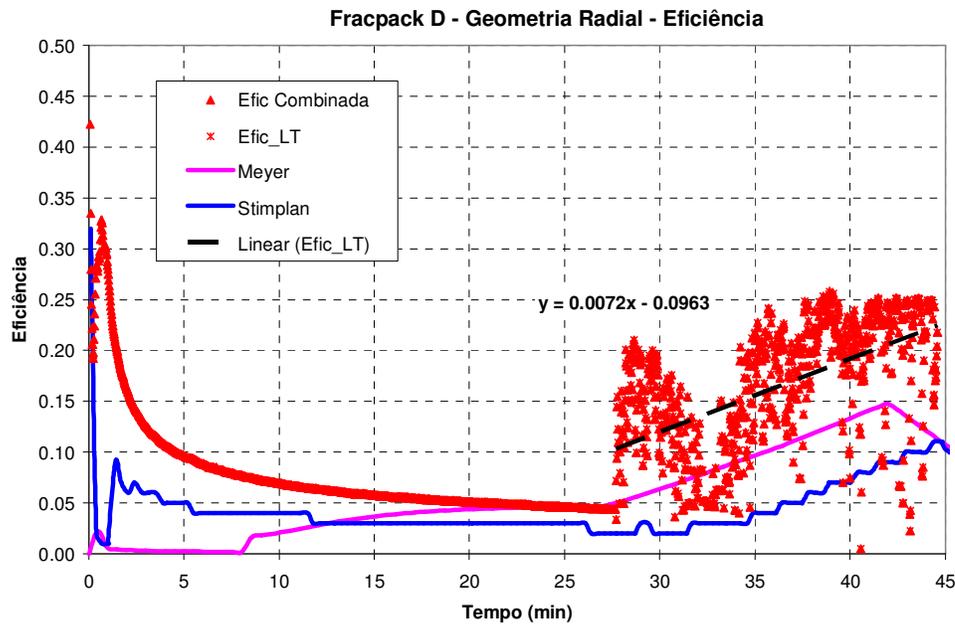


Figura 5.92 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack D*.

### 5.8.3. Evolução do modelo de Valkó & Oligney

Os gráficos nas figuras 5.93 a 5.96 apresentam os resultados dos ajustes efetuados no modelo original de Valkó & Oligney, e os compara ao modelo combinado desenvolvido com a geometria radial considerando a iniciação da fratura no intervalo canhoneado e também às respostas dos simuladores comerciais.

A figura 5.93 apresenta a evolução do modelo de Valkó & Oligney na curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura. A seta azul indica a evolução obtida na curva referente ao raio de empacotamento, sendo seu ponto de partida a curva estimada com o modelo original e seu ponto de chegada a curva referente ao modelo final, o qual considera todas as sugestões propostas por este trabalho. As setas verdes indicam a evolução dos raios hidráulicos, mostrando a curva referente ao raio hidráulico estimado pelo modelo original, a curva referente ao raio hidráulico que contempla o expoente alfa calculado a partir do declínio de pressão do minifrac e a curva referente ao raio hidráulico final, que inclui também a alteração relativa à resolução da equação do terceiro grau. Como pode ser observado no gráfico, as modificações realizadas no modelo de Valkó & Oligney aproximaram a curva referente ao raio de empacotamento das respostas obtidas pelos simuladores

comerciais. Outro ponto também notado foi a convergência das curvas referentes ao raio hidráulico na direção da resposta obtida com o modelo combinado, que tem por base o balanço de massa de Carter como modelo de propagação. Conforme já mencionado, esta melhoria no raio hidráulico apresenta grande impacto nos resultados encontrados para a abertura e para a eficiência da fratura, como será visto nas figuras 5.95 e 5.96.

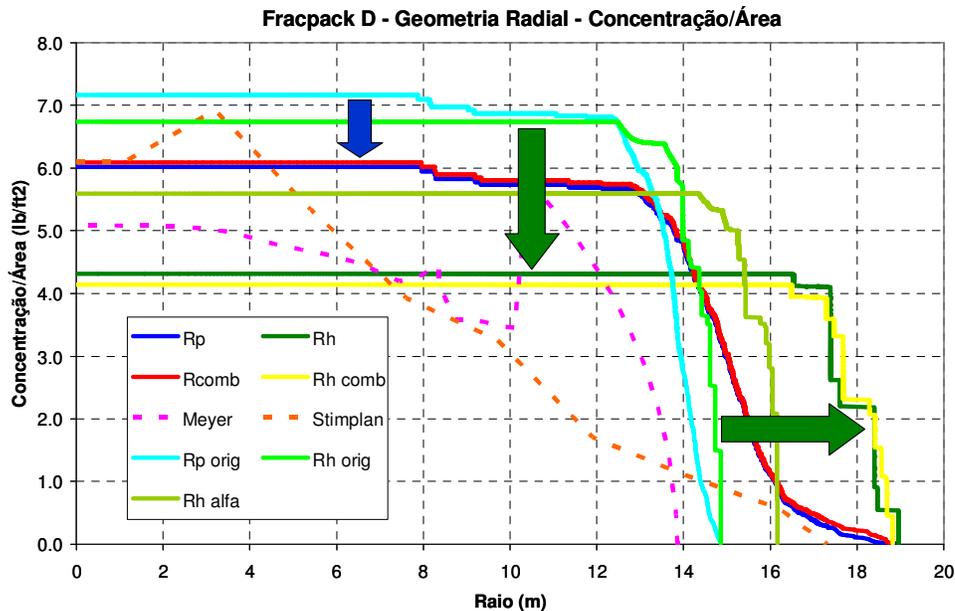


Figura 5.93 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura para o *fracpack D*.

Com relação à propagação do raio da fratura ao longo do tempo, figura 5.94, é possível observar que o raio de empacotamento original, apesar de apresentar valores próximos à resposta obtida com o simulador Meyer, inicia o empacotamento apenas por volta do instante 37 min, enquanto que os simuladores comerciais apresentam um empacotamento a partir de aproximadamente 27 min. Essa diferença ocorre principalmente devido a forma de resolução da equação do terceiro grau no modelo original, que não obtém raízes reais neste intervalo entre 27 e 37 min. Com relação a propagação do raio hidráulico durante o bombeio do colchão, isto é, até aproximadamente 27 min, é possível notar que o modelo desenvolvido apresenta uma curva que permanece superior aos resultados dos simuladores comerciais enquanto que a curva do modelo original permanece abaixo destes mesmos resultados.

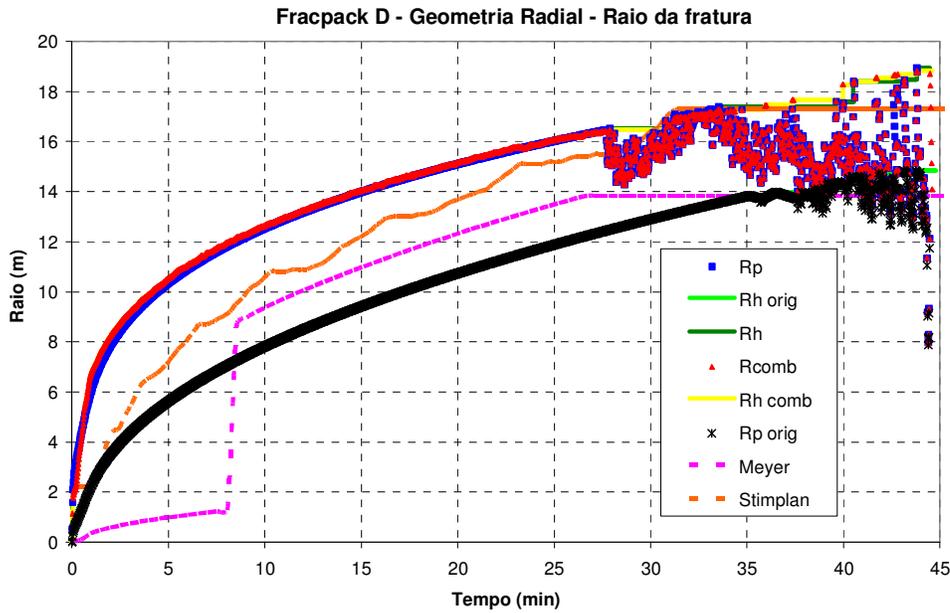


Figura 5.94 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão do raio da fratura ao longo do tempo durante o fracpack D.

Mesmo não tendo apresentado bons resultados, a curva de previsão do crescimento da abertura da fratura ao longo do tempo, figura 5.95, é um bom exemplo da importância dos ajustes no raio hidráulico para o modelo. Conforme pode ser observado, a curva de abertura ao longo do tempo do modelo original apresenta valores maiores que 10,5 cm, muito distantes das respostas obtidas com os simuladores comerciais. Sabendo-se que quanto menor o raio hidráulico, maior a abertura da fratura para um mesmo volume de agente de sustentação, a explicação para os altos valores de abertura no modelo original é a estimativa de um raio hidráulico máximo em torno de 15 m, enquanto que o raio hidráulico previsto pelo modelo final de Valkó & Oligney é de aproximadamente 19 m. Além disso, como o empacotamento da fratura no modelo original somente foi iniciado por volta dos 37 min, o mesmo atraso ocorre para o início do incremento da abertura da fratura, como mostra a figura 5.95. Conforme mencionado anteriormente, a comparação entre a abertura calculada a partir da área empacotada ( $w_p$ ) e a abertura calculada a partir da área hidráulica ( $w_h$  ou  $w_{comb}$ ), reforça ainda mais que o cálculo da abertura no modelo desenvolvido deve utilizar a área hidráulica da fratura, mesmo não tendo sido previsto valores de abertura dentro da envoltória de respostas dos simuladores nesta operação de *fracpack*.

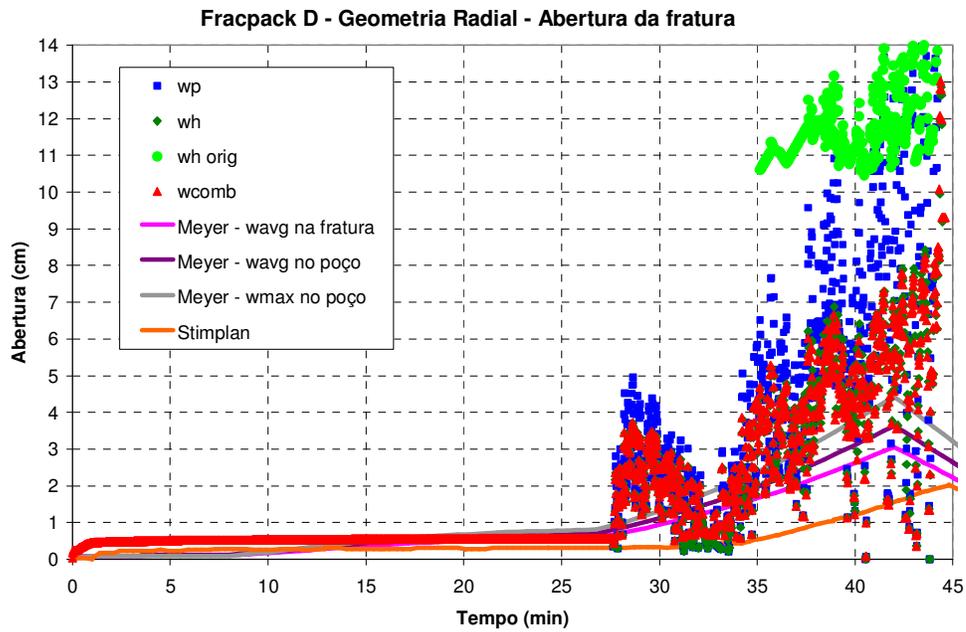


Figura 5.95 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack D*.

A figura 5.96 apresenta a eficiência calculada com o modelo original de Valkó & Oligney, representada por bolinhas na cor azul clara, e as eficiências finais. Como era esperado, o modelo original prevê uma eficiência maior que os modelos finais, já que tem por base a abertura da fratura calculada com o modelo original de Valkó & Oligney que, conforme apresentado na figura 5.95, foi bastante superior à estimada pelo modelo de Valkó & Oligney ajustado.

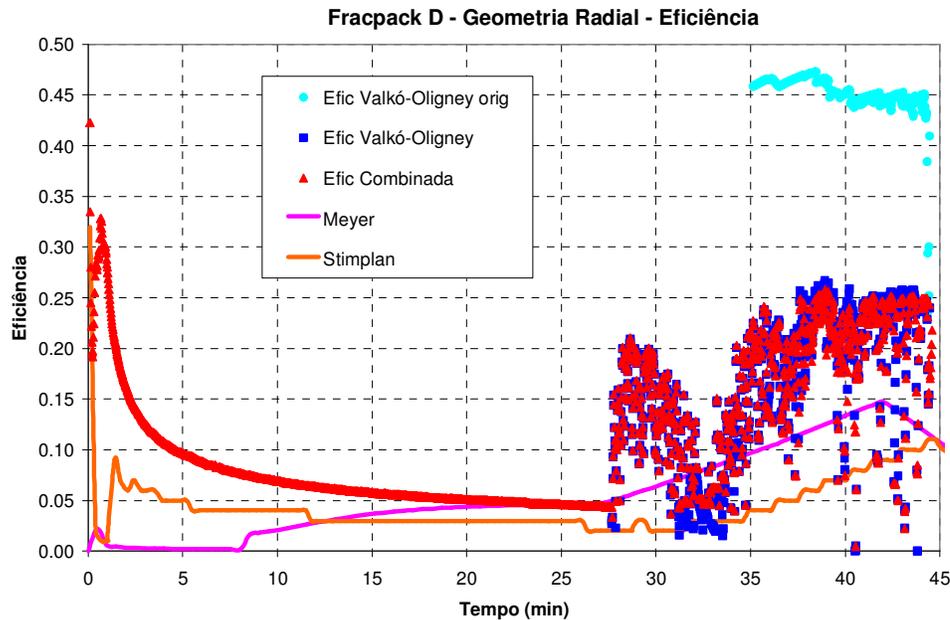


Figura 5.96 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da eficiência da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack D*.

## 5.9. *Fracpack E*

Esta operação foi executada em lâmina d' água de 1843 m, em um arenito cujo topo encontra-se na profundidade de 3303 m, apresentando 38 m de espessura e 29 m de intervalo canhoneado. A permeabilidade estimada para a formação é de 920 mD, seu módulo de elasticidade é de  $8,5 \times 10^5$  psi ( $5,86 \times 10^3$  MPa) e seu coeficiente de Poisson é 0,30. A temperatura na superfície foi estimada em 23°C enquanto a temperatura no reservatório é de 65°C. O fluido utilizado no tratamento possui uma carga polimérica de 35 lb/Mgal e, utilizando a média das temperaturas da superfície e do reservatório, foram escolhidos os parâmetros reológicos do fluido do tratamento a serem utilizados no modelo, sendo estes:  $n$  igual a 0,4562 e  $K$  igual a  $0,1576 \text{ lbf}\cdot\text{s}^n/\text{ft}^2$ . O agente de sustentação bombeado foi cerâmica leve, sendo sua massa específica igual a  $2,71 \text{ g/cm}^3$ .

### 5.9.1. Calibração do modelo

### 5.9.1.1. Iniciação da fratura no intervalo canhoneado

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador MFrac na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, sendo obtido o coeficiente de filtração igual a  $0,018 \text{ ft}/\text{min}^{1/2}$ . A figura 5.97 mostra as curvas de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* comercial após a calibração do modelo para a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. Já a figura 5.98 apresenta, além do perfil litológico e de tensões, a geometria final estimada para a fratura nesta mesma condição, sendo um comprimento de aproximadamente 16 m e altura de 37 m.

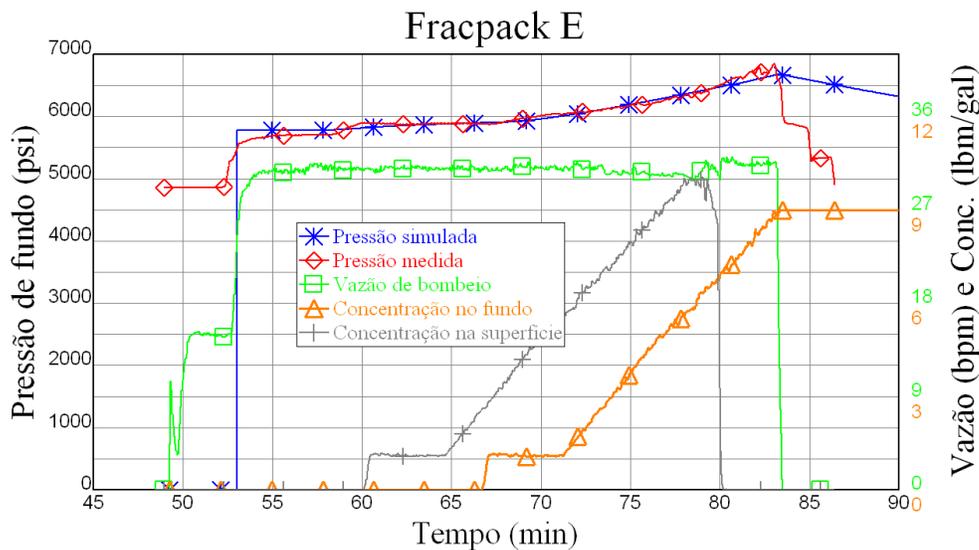


Figura 5.97 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack E* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

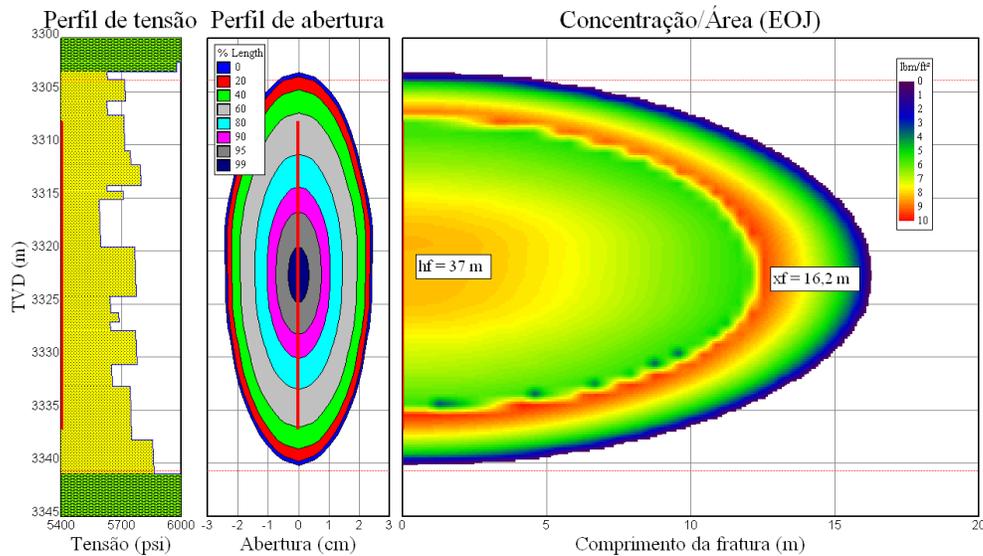


Figura 5.98 – Simulação da fratura executada no *fracpack E* no *software Meyer* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software MFrac*, foi feita uma simulação no *software* comercial *Stimplan* considerando a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. A figura 5.99 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo *Stimplan* e a figura 5.100 mostra a geometria final da fratura estimada pelo *software 3D* nesta mesma condição, que apresentou um comprimento de 19,8 m e altura de 38 m. Apesar do pico de pressão na curva simulada ter ficado maior que o registrado em campo, o resultado da simulação foi considerado válido, sendo utilizado na comparação com os resultados obtidos nos modelos desenvolvidos.

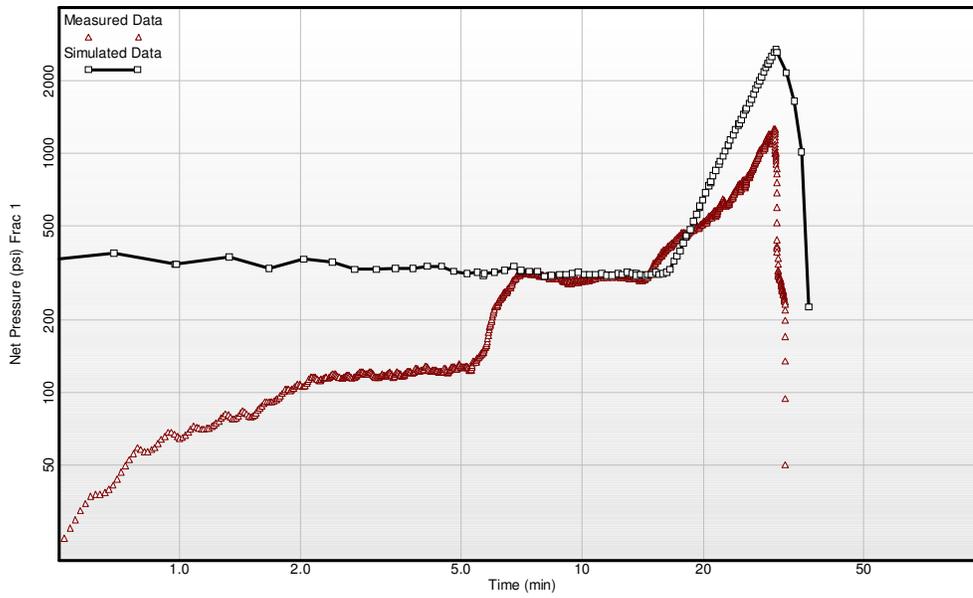


Figura 5.99 – Simulação do *fracpack E* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

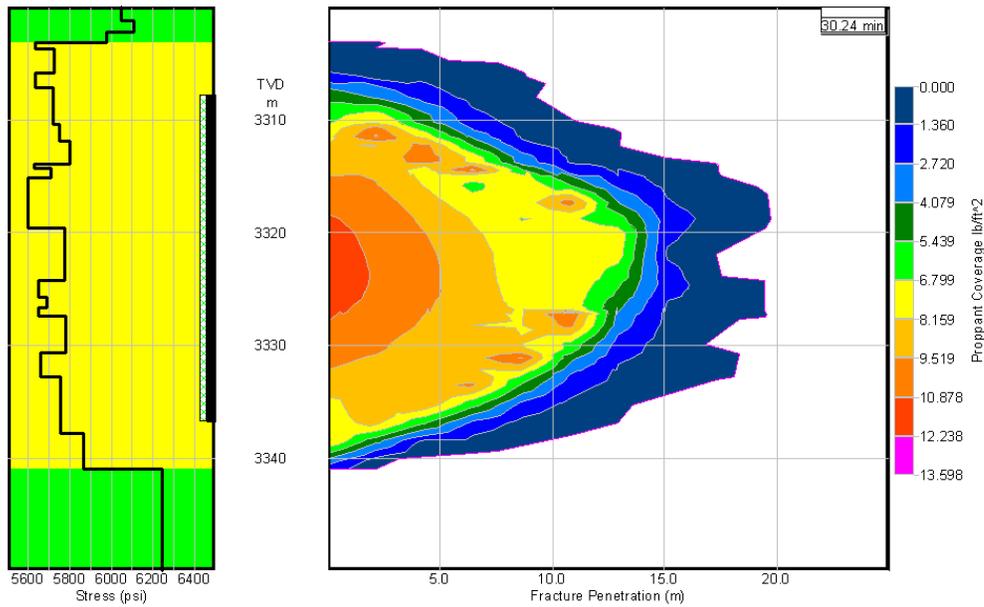


Figura 5.100 – Estimativa da fratura executada no *fracpack E* através da simulação utilizando o *software* Stimplan considerando a iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

### 5.9.1.2. Iniciação da fratura na menor tensão

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial MFrac na condição de iniciação da fratura na menor tensão, sendo obtido um coeficiente de filtração igual a  $0,013 \text{ ft}/\text{min}^{1/2}$ . A figura 5.101 mostra a curva de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* MFrac após a calibração do modelo para esta condição. Já a figura 5.102 apresenta a geometria final estimada para a fratura com um comprimento de aproximadamente 36 m e altura de 22 m, além do perfil litológico e de tensões.

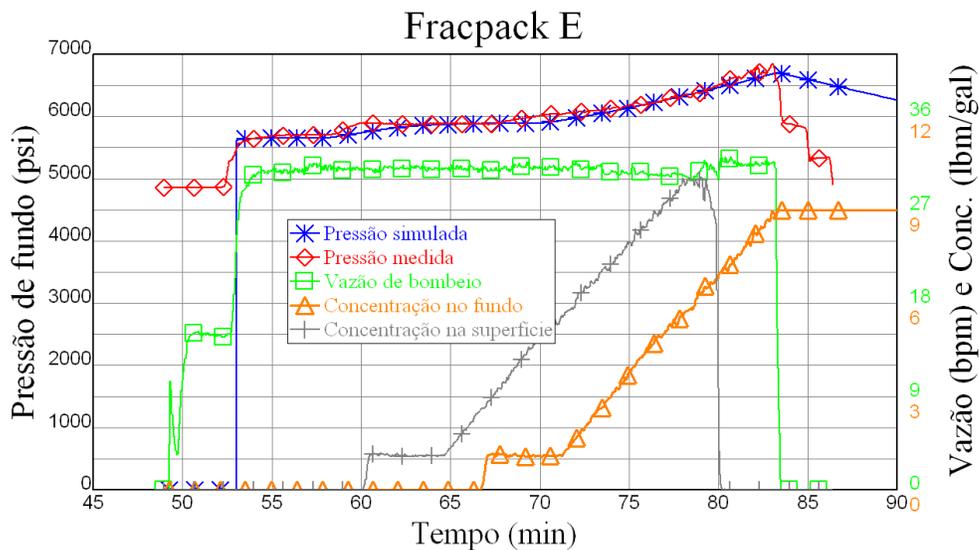


Figura 5.101 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack E* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

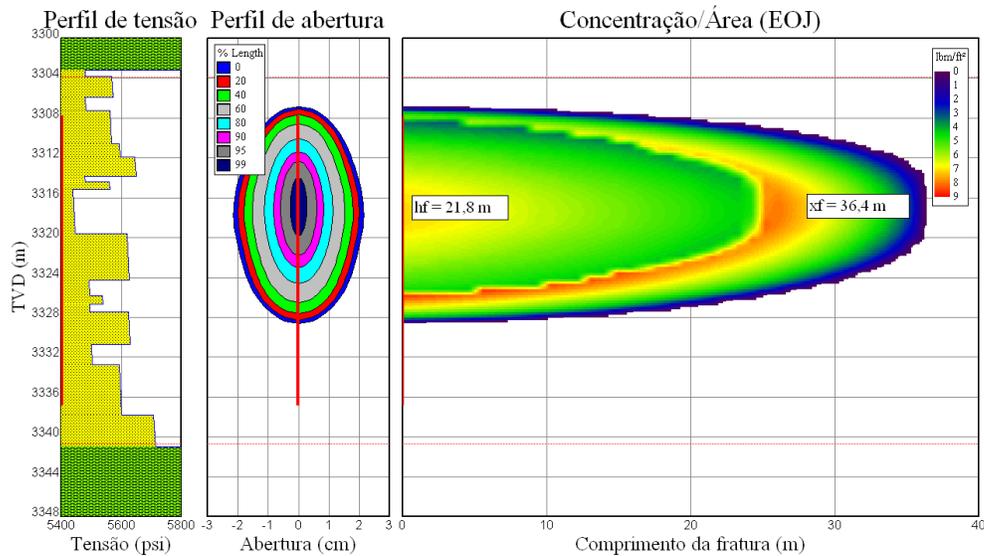


Figura 5.102 – Simulação da fratura executada no *fracpack E* no *software Meyer* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software MFrac*, foi feita uma simulação no *software* comercial Stimplan considerando a condição de iniciação da fratura na menor tensão. A figura 5.103 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo Stimplan e a figura 5.104 mostra a geometria final da fratura estimada nesta mesma condição, que apresentou um comprimento de aproximadamente 26 m e altura de 39 m.

Em função do bom resultado apresentado pelo gráfico de pressão, a simulação foi considerada válida e será utilizada para comparação com os resultados obtidos nos modelos desenvolvidos.

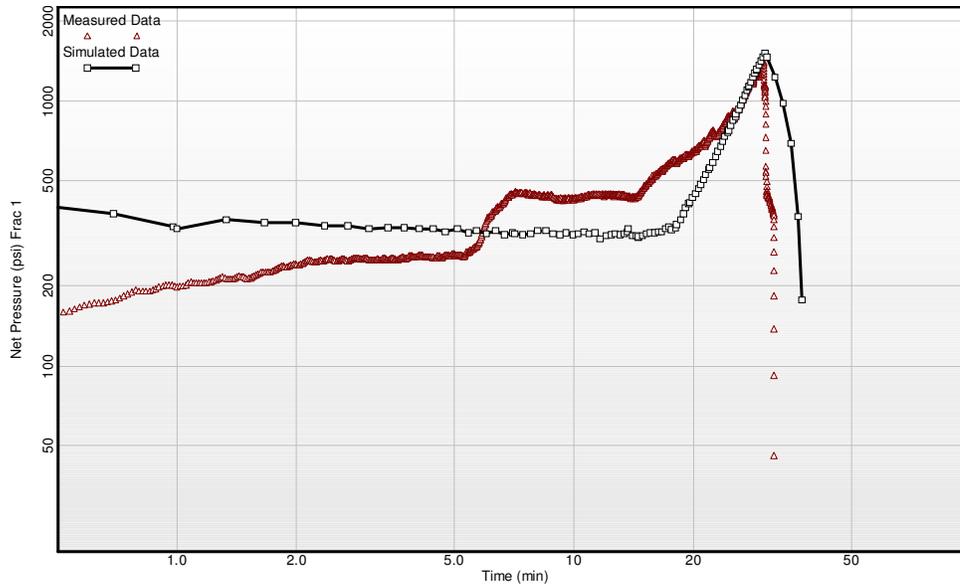


Figura 5.103 – Simulação do *fracpack E* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

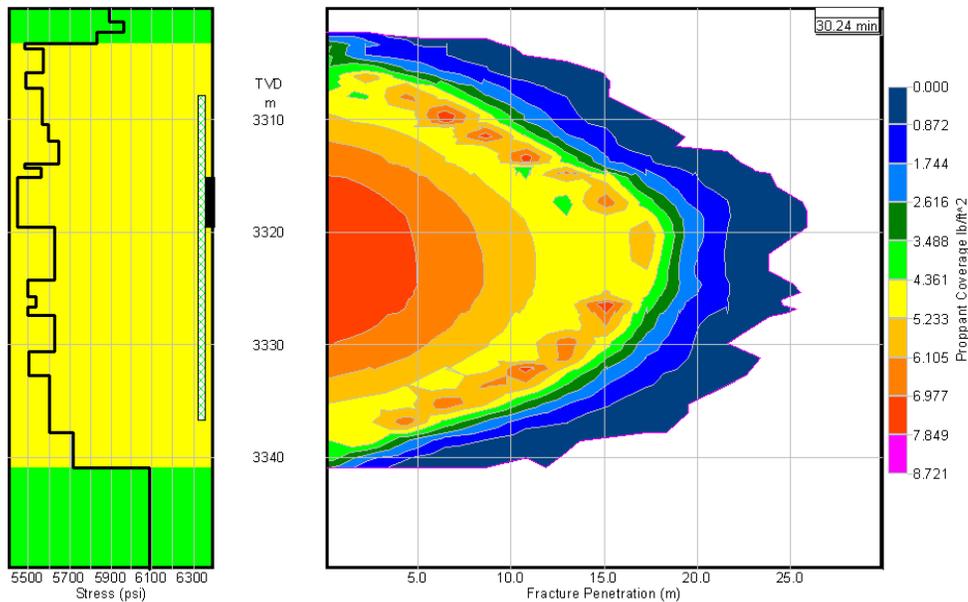


Figura 5.104 – Estimativa da fratura executada no *fracpack E* através da simulação utilizando o *software* Stimplan considerando a iniciação da fratura na menor tensão.

### 5.9.2. Resultados e escolha do melhor modelo

Utilizando os dados do declínio de pressão do minifrac foi possível definir o tempo de fechamento da fratura, sendo este igual a 4,7 min. Desta forma foi obtida uma eficiência do minifrac em torno de 25% e conseqüentemente os

expoentes  $\alpha$  estimados para cada geometria foram: 0,57 para a geometria radial, 0,52 para a geometria KGD e 0,56 para a geometria PKN. Com estas informações e conhecendo-se o coeficiente de filtração é possível utilizar o modelo desenvolvido para analisar e interpretar a curva de pressão de fundo registrada durante a operação de *fracpack*. A tabela 5.10 e as figuras, 5.105 e 5.106, apresentam um resumo dos resultados obtidos com os modelos desenvolvidos e com os simuladores comerciais. Cabe ressaltar que nas geometrias PKN e KGD a altura da fratura foi assumida como igual espessura do reservatório.

Fracpack E - Resultados						
Modelo		R ou xf final	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	w médio final	eficiência final
		(m)	(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm)	(%)
Desenvolvido	Radial - Canh	21,8	16,9	8,28	5,39	25,1
	Radial - Sh	25,3	18,8	7,17	4,64	24,4
	KGD	20,0	11,7	8,39	5,40	24,2
	PKN	19,8	10,0	13,64	7,02	18,6
Simuladores Comerciais	Meyer - Canh	16,3	16,3	6,45	3,88	24,9
	Meyer - Sh	36,4	36,4	5,80	2,93	25,5
	Stimplan - Canh	19,8	19,8	8,41	3,20	23,0
	Stimplan - Sh	25,9	25,9	6,08	2,34	24,0

Tabela 5.10 – Resumo dos resultados obtidos a partir da interpretação dos registros do *fracpack E*.

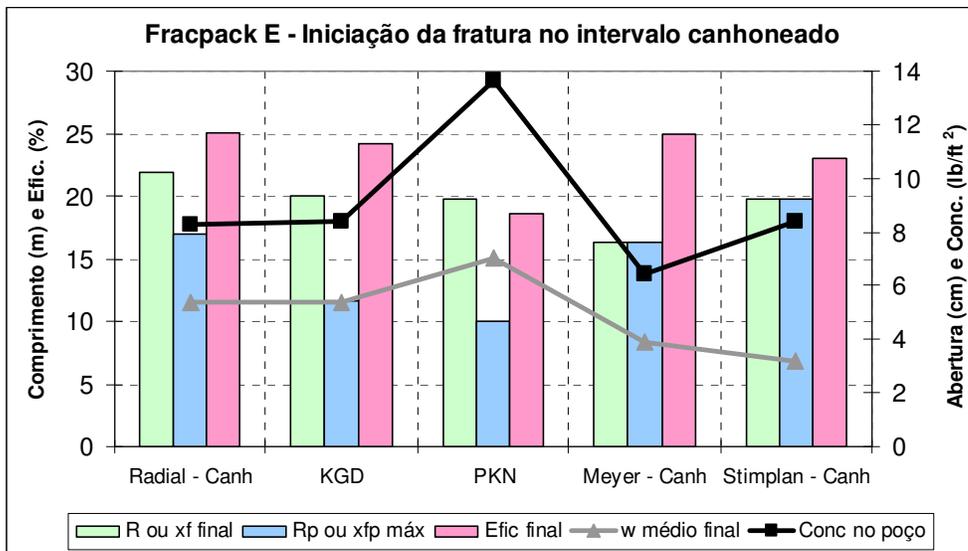


Figura 5.105 – Resultados obtidos para o *fracpack E* com os modelos desenvolvidos e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

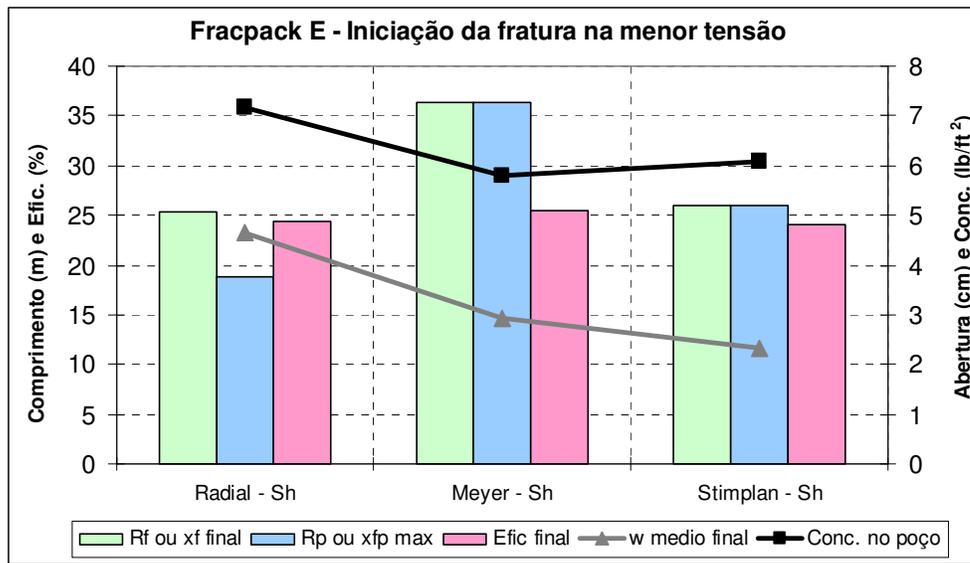


Figura 5.106 – Resultados obtidos para o *fracpack E* com o modelo desenvolvido e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Para a definição do melhor modelo de previsão dos resultados obtidos nos simuladores comerciais foi realizada uma análise de erros utilizando a diferença quadrada entre os índices definidos previamente. A tabela 5.11 apresenta esta comparação, ressaltando-se que os resultados dos modelos: Radial-canhoneado, KGD e PKN foram comparados aos resultados dos simuladores na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e os resultados do modelo Radial-Sh foram comparados aos obtidos na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

<b>Fracpack E - Comparação entre os índices - Diferença quadrada</b>				
Modelo	Modelo desenvolvido x Simulador comercial	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	Índice geométrico
		(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm/m)
RADIAL Canh	Radial - Canh x Meyer	0,4	3,35	7,2E-05
	Radial - Canh x Stimplan	8,2	0,02	7,3E-03
RADIAL Sh	Radial - Sh x Meyer	308,7	1,88	1,1E-02
	Radial - Sh x Stimplan	50,3	1,19	8,6E-03
KGD	KGD x Meyer	21,3	3,76	1,0E-03
	KGD x Stimplan	66,1	0,00	1,2E-02
PKN	PKN x Meyer	39,2	51,70	1,4E-02
	PKN x Stimplan	95,6	27,35	3,7E-02
<b>Melhor previsão - MEYER:</b>		<b>Radial Canh</b>	Radial Sh	<b>Radial Canh</b>
<b>Melhor previsão - Stimplan:</b>		<b>Radial Canh</b>	KGD	<b>Radial Canh</b>

Tabela 5.11 – Comparação entre os índices dos modelos desenvolvidos com os obtidos nos simuladores comerciais para o *fracpack E*.

De acordo com a tabela 5.11, a melhor previsão dos resultados tanto para o *software* MFrac (Meyer) quanto para o *software* Stimplan foi feita pelo modelo desenvolvido com a geometria radial, na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. Esta avaliação também é apresentada nas figuras, 5.107 e 5.108, sendo que o erro quadrático relativo ao índice geométrico foi multiplicado por um fator de 1000 em função da escala do gráfico. As figuras mostram que tanto na comparação com o simulador Meyer, figura 5.107, quanto na comparação com o simulador Stimplan, figura 5.108, o modelo radial com iniciação da fratura no intervalo canhoneado se destaca em relação às outras geometrias principalmente no índice relativo à estimativa do raio da fratura, além disso, pode-se notar que o modelo desenvolvido com a geometria PKN foi responsável pela pior previsão. Os resultados das estimativas feitas pelo melhor modelo desenvolvido e pelos simuladores comerciais estão apresentados nas figuras 5.109 a 5.112.

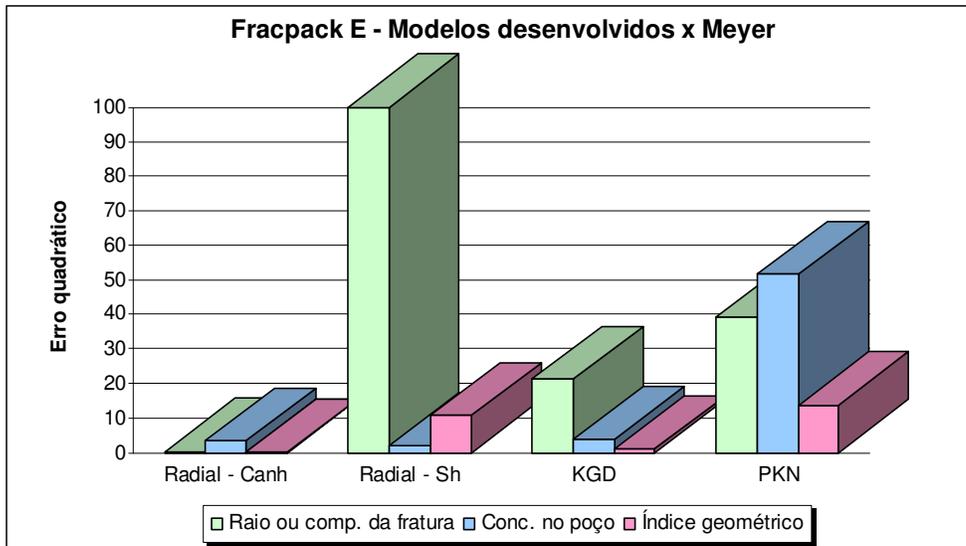


Figura 5.107 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador MFrac (Meyer) para o *fracpack E*.

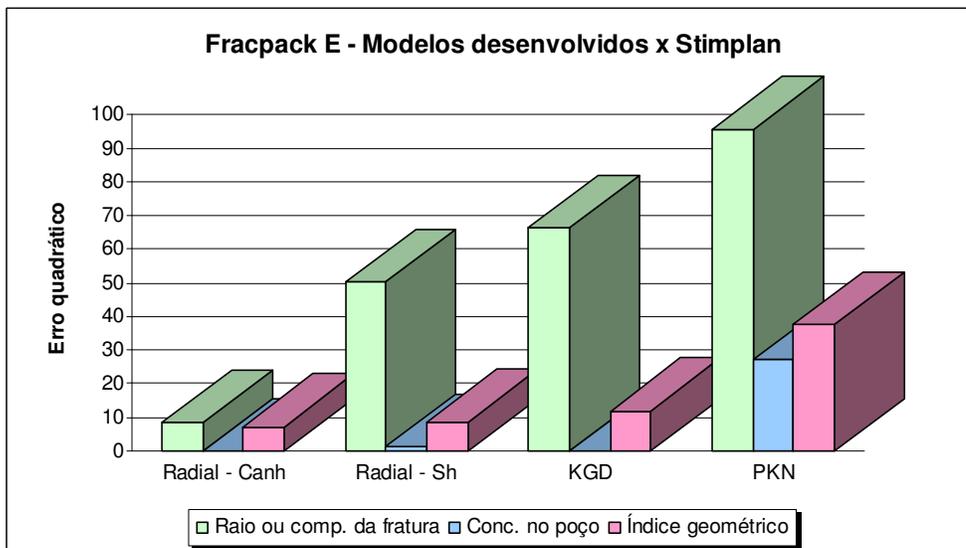
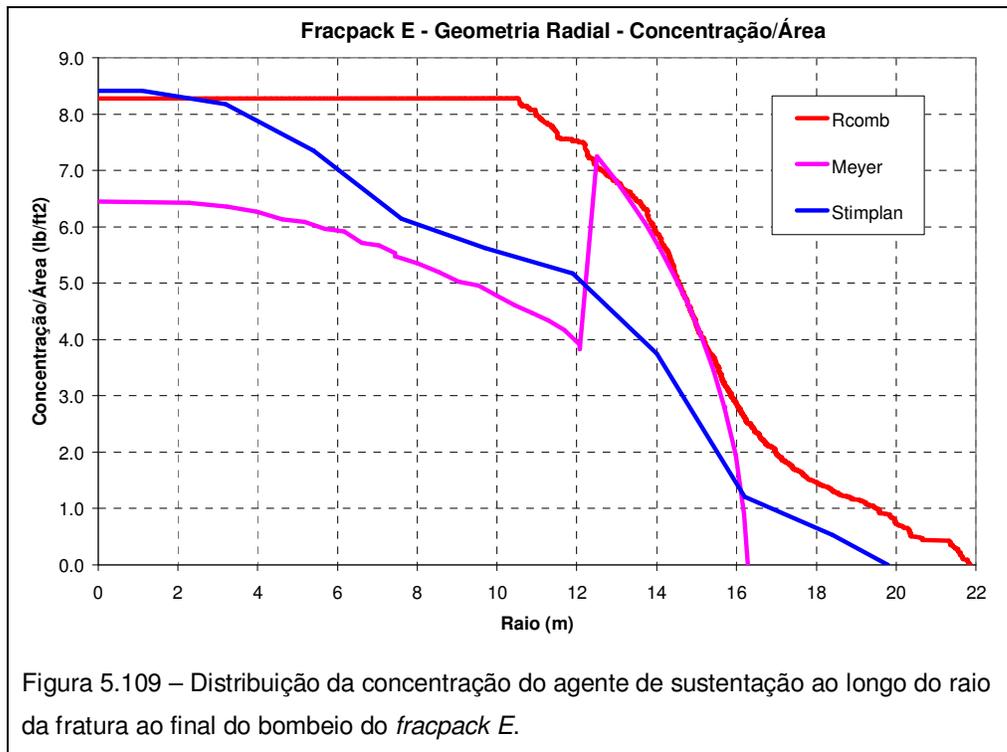


Figura 5.108 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador Stimplan para o *fracpack E*.

Analisando o gráfico de concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura, figura 5.109, pode-se considerar que o modelo desenvolvido fez uma boa estimativa das curvas previstas pelos simuladores. Enquanto a concentração no poço prevista pelo Stimplan foi praticamente a mesma obtida no modelo desenvolvido, a diferença em relação ao simulador MFrac ficou em torno de 1,5 lb/ft<sup>2</sup>. Para compensar essa diferença, o declínio da curva

apresentado pelo modelo desenvolvido foi muito semelhante ao previsto por este simulador.



Observando a figura 5.110, que apresenta o gráfico de propagação do raio da fratura ao longo do tempo, nota-se que a propagação inicial da fratura estimada pelo modelo desenvolvido foi semelhante à prevista pelo simulador Stimplan, ficando superior a previsão do Meyer. Com o início dos empacotamentos, a linha de tendência utilizada indica um raio de empacotamento muito próximo ao raio da fratura estimado pelo Meyer, enquanto que o raio hidráulico do modelo desenvolvido se mantém semelhante ao raio da fratura previsto pelo Stimplan.

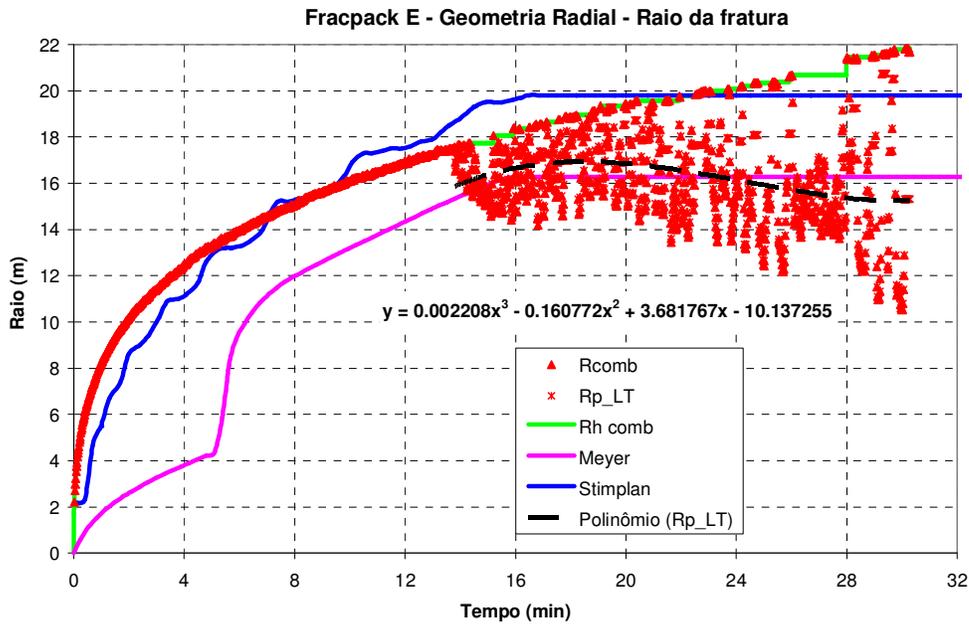


Figura 5.110 – Raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack E*.

A figura 5.111 apresenta a previsão do comportamento da abertura da fratura ao longo do tempo. Até o instante de 14 min, antes do início dos empacotamentos, o modelo desenvolvido fez uma boa previsão da abertura da fratura ao longo do tempo. A partir deste instante, quando a abertura da fratura começa a aumentar, a linha de tendência linear utilizada para representar os pontos registrados permanece superior às respostas obtidas com os simuladores comerciais, retornando à envoltória de respostas ao final do bombeio, por volta do instante de 28 min. Mesmo assim, a previsão final do modelo desenvolvido ficou superior a estimada pelo Meyer e pelo Stimplan, sendo elas iguais a 5,4 cm, 3,9 cm e 3,2 cm respectivamente.

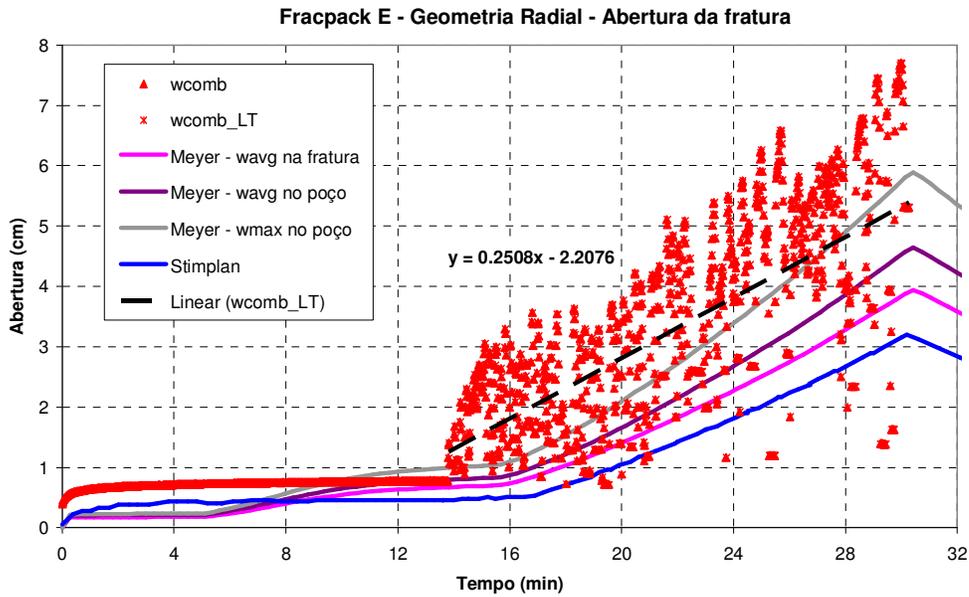


Figura 5.111 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack E*.

Na figura 5.112, nota-se que apesar da curva de eficiência estimada pelo modelo desenvolvido apresentar um valor final próximo ao previsto pelos simuladores, ela permaneceu superior à resposta dos simuladores ao longo de todo o bombeio, apresentando, no entanto, um formato semelhante à estimativa feita pelo Stimplan antes do início do período de TSO.

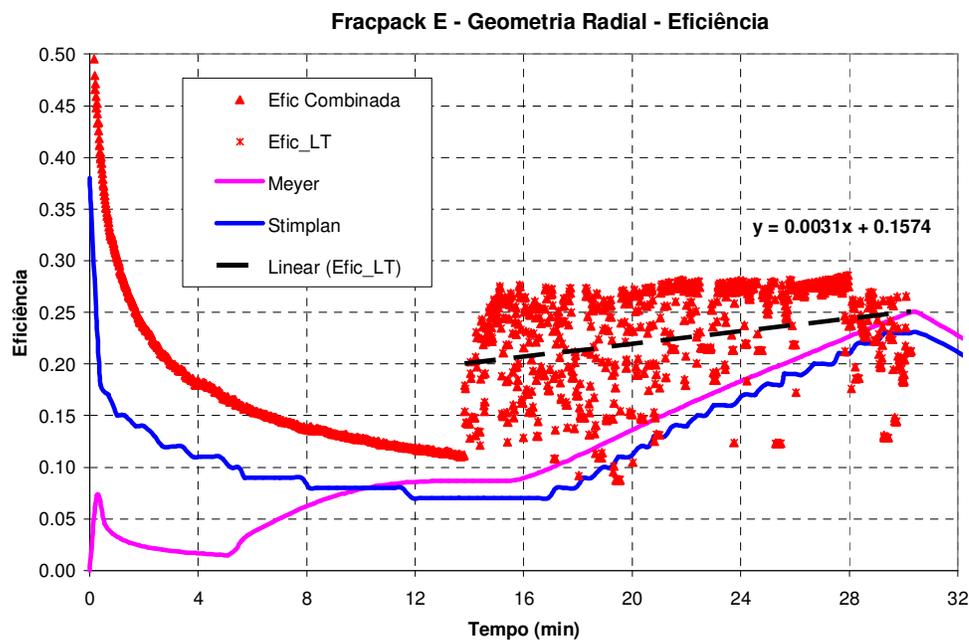


Figura 5.112 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack E*.

### 5.9.3. Evolução do modelo de Valkó & Oligney

Os gráficos nas figuras 5.113 a 5.116 apresentam os resultados dos ajustes efetuados no modelo original de Valkó & Oligney, e os compara ao modelo combinado desenvolvido com a geometria radial considerando a iniciação da fratura no intervalo canhoneado e também às respostas dos simuladores comerciais.

A figura 5.113 apresenta a evolução do modelo de Valkó & Oligney na curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura. A seta azul indica a evolução obtida na curva referente ao raio de empacotamento, sendo seu ponto de partida a curva estimada com o modelo original e seu ponto de chegada a curva referente ao modelo final, o qual considera todas as sugestões propostas por este trabalho. Com os ajustes, nota-se uma aproximação das curvas em relação às respostas dos simuladores. As setas verdes indicam a evolução dos raios hidráulicos, que convergem na direção do resultado obtido com o modelo combinado, que utiliza o balanço de massa de Carter como modelo de propagação. São apresentadas: a curva referente ao raio hidráulico estimado pelo modelo original, a curva referente ao raio hidráulico que contempla o expoente alfa calculado a partir do declínio de pressão do minifrac e a curva referente ao raio hidráulico final, que inclui também a alteração relativa à resolução da equação do terceiro grau. Conforme já mencionado, esta melhoria no raio hidráulico apresenta grande impacto nos resultados encontrados para a abertura e para a eficiência da fratura, como será visto nas figuras 5.115 e 5.116.

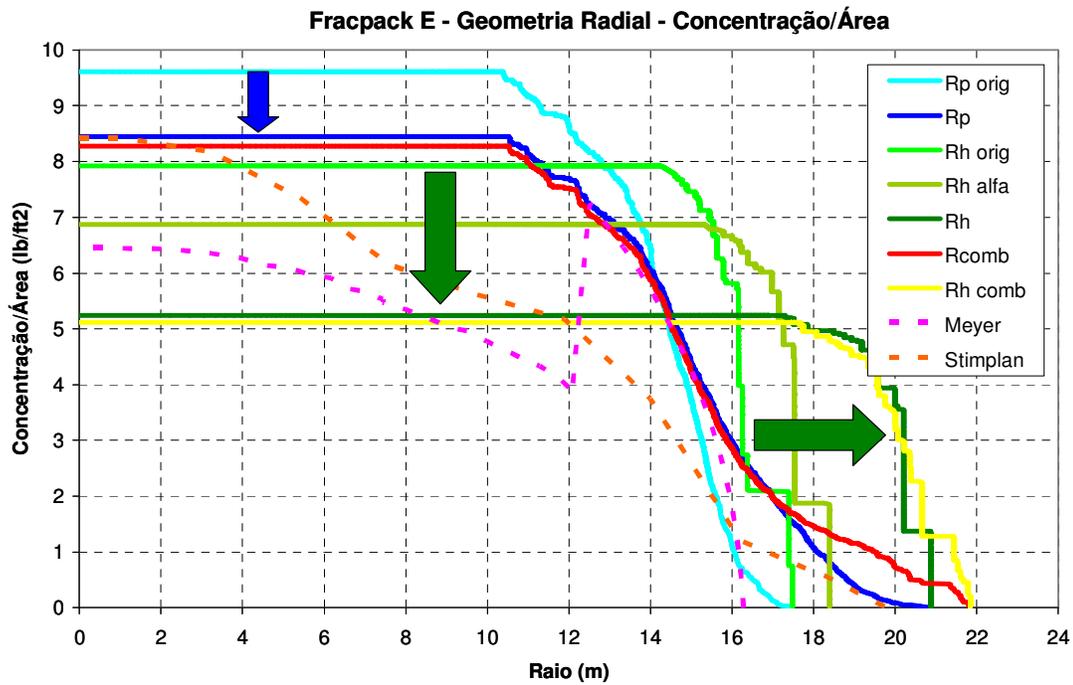


Figura 5.113 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura para o *fracpack E*.

Com relação à propagação do raio da fratura ao longo do tempo, figura 5.114, observa-se que no modelo original a propagação do raio antes do início dos empacotamentos foi semelhante a resposta obtida no simulador Meyer, já após os ajustes no modelo de Valkó & Oligney, a propagação do raio da fratura se aproximou da resposta obtida no simulador 3D. Mesmo com essa semelhança até por volta do instante 14 min, se for considerado o período de empacotamento é possível notar que no modelo original, além do menor número de pontos apresentados, estes se concentram abaixo das respostas obtidas nos simuladores.

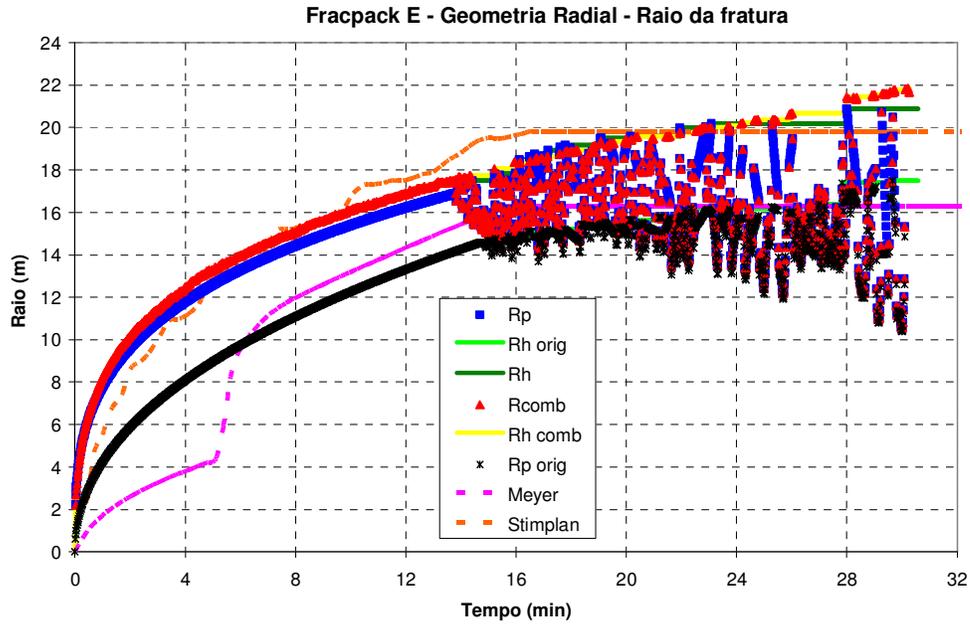


Figura 5.114 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão do raio da fratura ao longo do tempo durante o fracpack E.

Apesar da curva de abertura ao longo do tempo do modelo final de Valkó & Oligney e do modelo combinado não terem ficado dentro da envoltória de respostas dos simuladores, figura 5.115, é possível notar que os ajustes realizados aproximaram os resultados do modelo de Valkó & Oligney às curvas dos simuladores. Esta aproximação pode ser vista comparando-se os pontos verde-claros, referentes ao modelo original, com os pontos verde-escuros, que representam o modelo final de Valkó & Oligney.

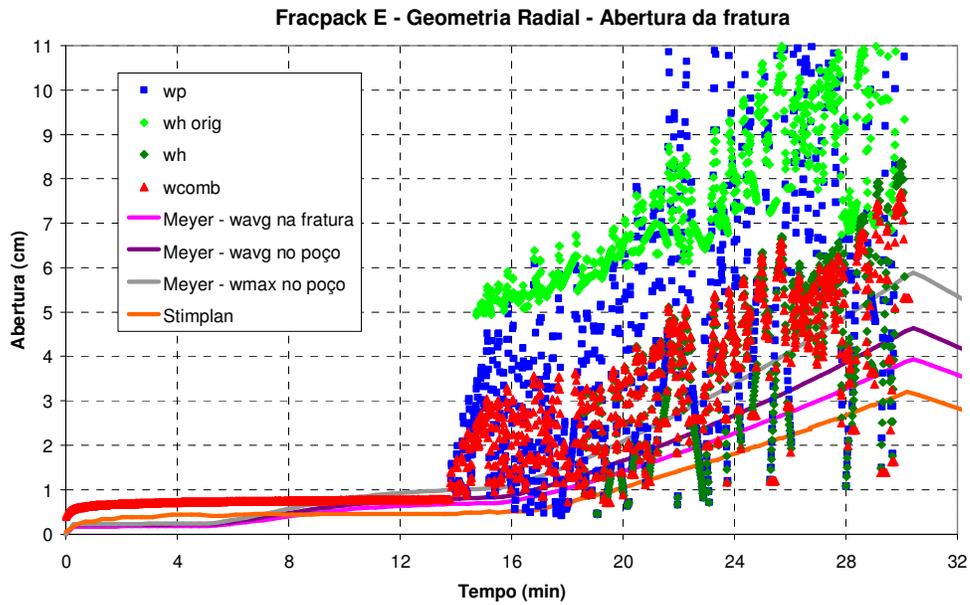


Figura 5.115 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack E*.

A figura 5.116 apresenta a eficiência calculada com o modelo original de Valkó & Oligney, representada por bolinhas na cor azul clara, e as eficiências finais. Como era esperado, o modelo original prevê uma eficiência maior que os modelos finais, já que tem por base a abertura da fratura calculada com o modelo original de Valkó & Oligney que, conforme apresentado na figura 5.115, foi superior à estimada pelo modelo de Valkó & Oligney ajustado.

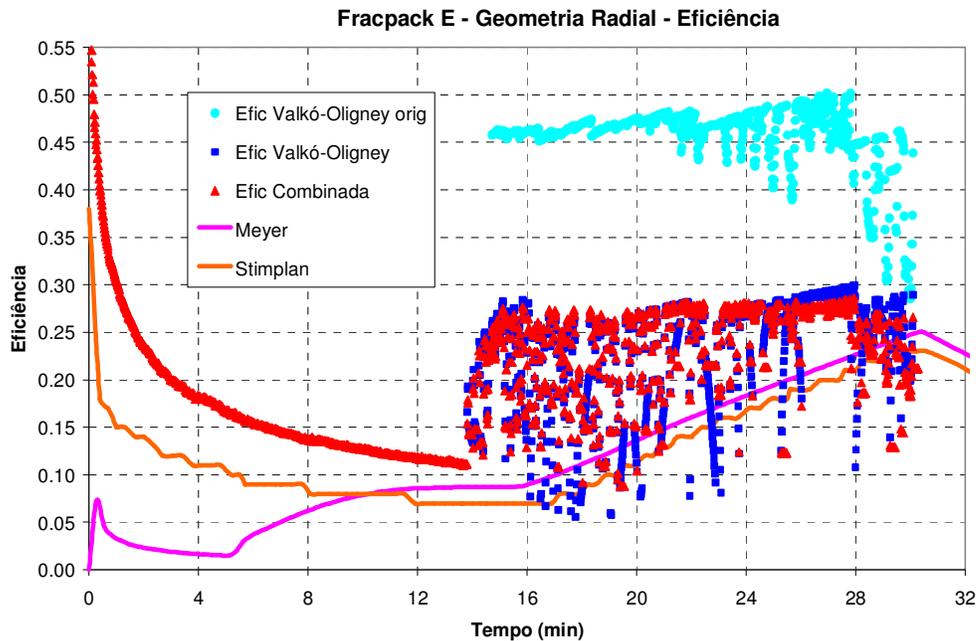


Figura 5.116 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da eficiência da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack E*.

## 5.10.

### ***Fracpack F***

Esta operação foi executada em lâmina d' água de 1871 m, em um arenito cujo topo encontra-se na profundidade de 3415 m, apresentando 13 m de espessura e 11,4 m de intervalo canhoneado. A permeabilidade estimada para a formação é de 800 mD, seu módulo de elasticidade é de  $3,4 \times 10^5$  psi ( $2,37 \times 10^3$  MPa) e seu coeficiente de Poisson é 0,33. A temperatura na superfície foi estimada em 23°C enquanto a temperatura no reservatório é de 50°C. O fluido utilizado no tratamento possui uma carga polimérica de 30 lb/Mgal e, utilizando a média das temperaturas da superfície e do reservatório, foram escolhidos os parâmetros reológicos do fluido do tratamento a serem utilizados no modelo, sendo estes:  $n$  igual a 0,4724 e  $K$  igual a 0,1209 lbf.s<sup>n</sup>/ft<sup>2</sup>. O agente de sustentação bombeado foi cerâmica leve, sendo sua massa específica igual a 2,71 g/cm<sup>3</sup>.

#### 5.10.1.

##### **Calibração do modelo**

### 5.10.1.1. Iniciação da fratura no intervalo canhoneado

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial MFrac na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, no qual foi obtido o coeficiente de filtração igual a  $0,019 \text{ ft/min}^{1/2}$ . A figura 5.117 mostra as curvas de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* comercial após a calibração do modelo para a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. Já a figura 5.118 apresenta, além do perfil litológico e de tensões, a geometria final da fratura nesta mesma condição, sendo um comprimento de aproximadamente 16 m e altura de 13 m.

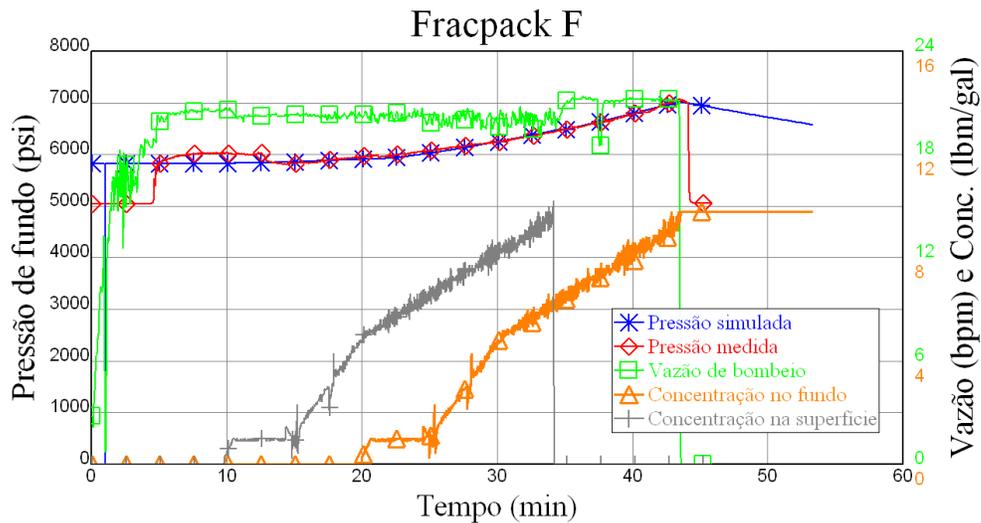


Figura 5.117 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack F* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

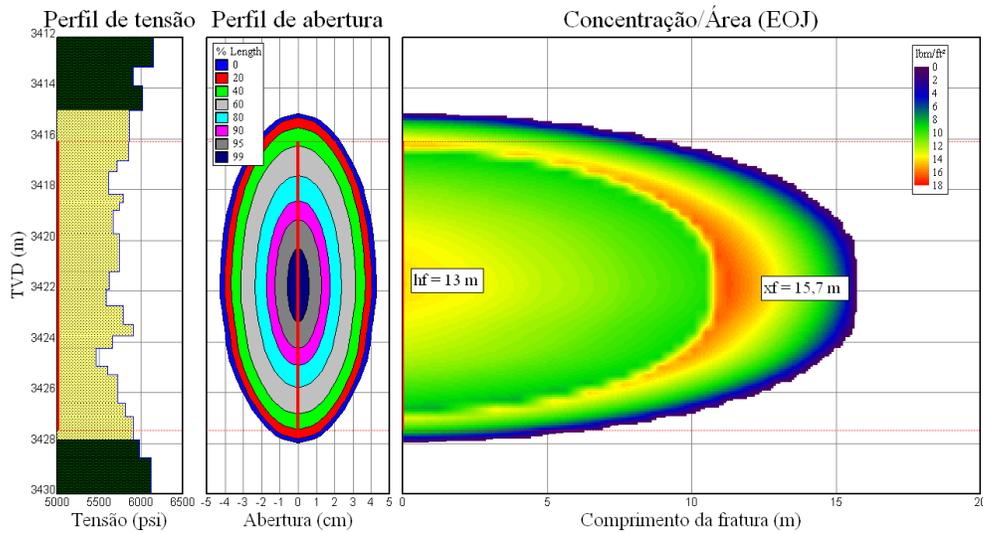


Figura 5.118 – Simulação da fratura executada no *fracpack F* no *software* Meyer na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software* MFrac, foi feita uma simulação no *software* comercial Stimplan considerando a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. A figura 5.119 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo Stimplan e a figura 5.120 mostra a geometria final da fratura estimada pelo *software* 3D nesta mesma condição, que apresentou um comprimento de 35 m e altura de 15 m. Em função do bom resultado apresentado pelo gráfico de pressão, a simulação foi considerada válida e será utilizada para comparação com os resultados obtidos nos modelos desenvolvidos.

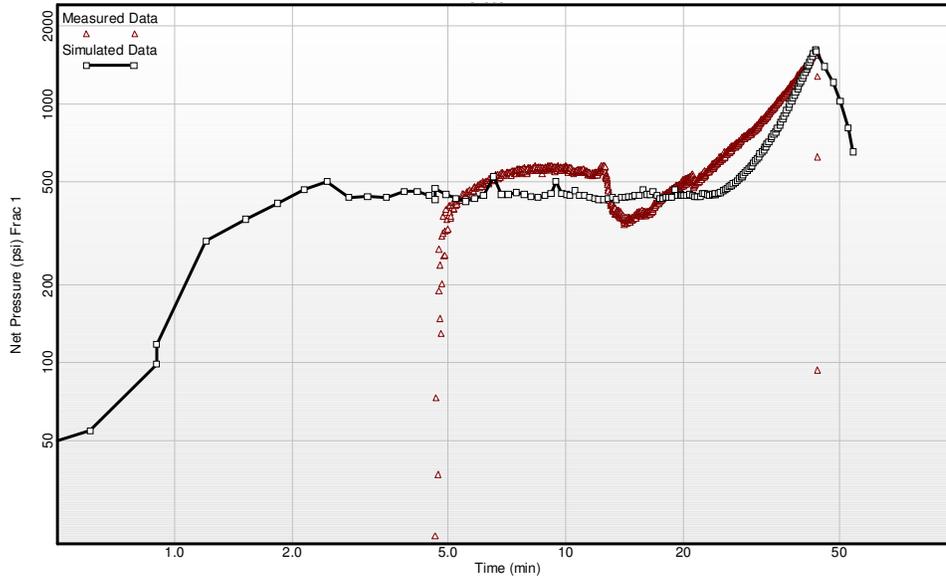


Figura 5.119 – Simulação do *fracpack F* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

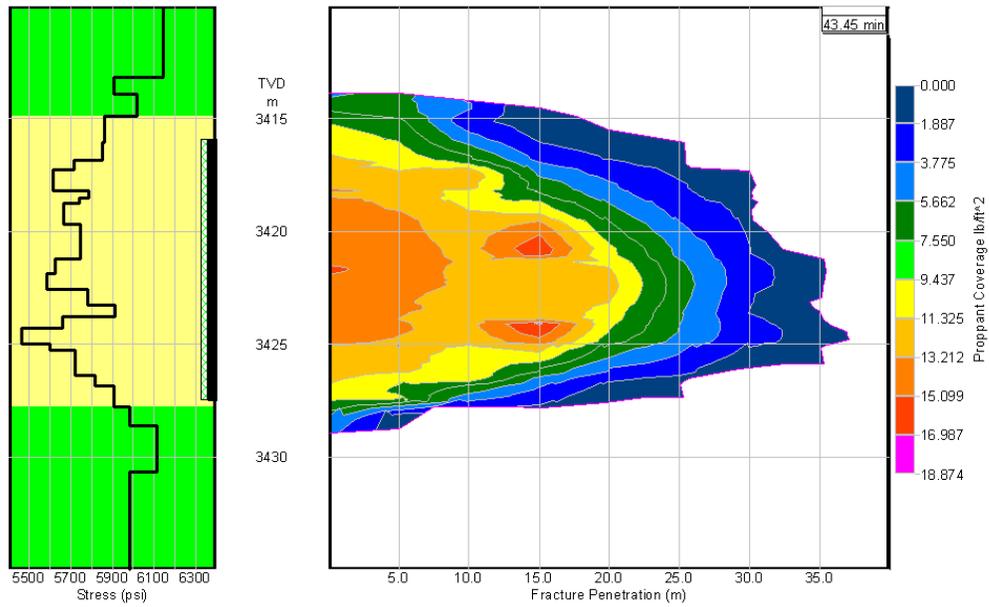


Figura 5.120 – Estimativa da fratura executada no *fracpack F* através da simulação utilizando o *software* Stimplan, considerando a iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

### 5.10.1.2. Iniciação da fratura na menor tensão

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial MFrac na condição de iniciação da fratura na menor tensão, sendo obtido um coeficiente de filtração igual a  $0,008 \text{ ft/min}^{1/2}$ . A figura 5.121 mostra a curva de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* MFrac após a calibração do modelo para esta condição. Já a figura 5.122 apresenta, além do perfil litológico e de tensões, a geometria final da fratura, com um comprimento de 46,5 m e altura de 8,5 m.

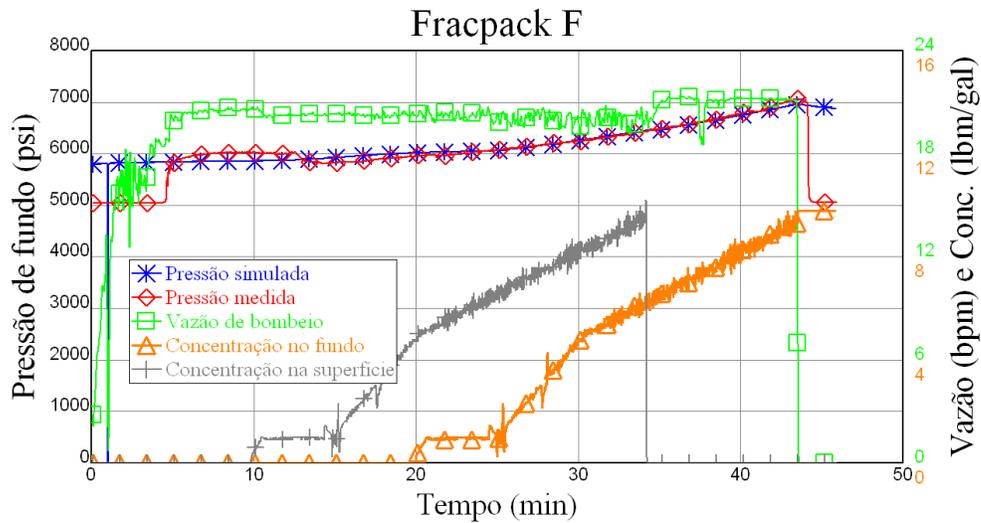


Figura 5.121– Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack F* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

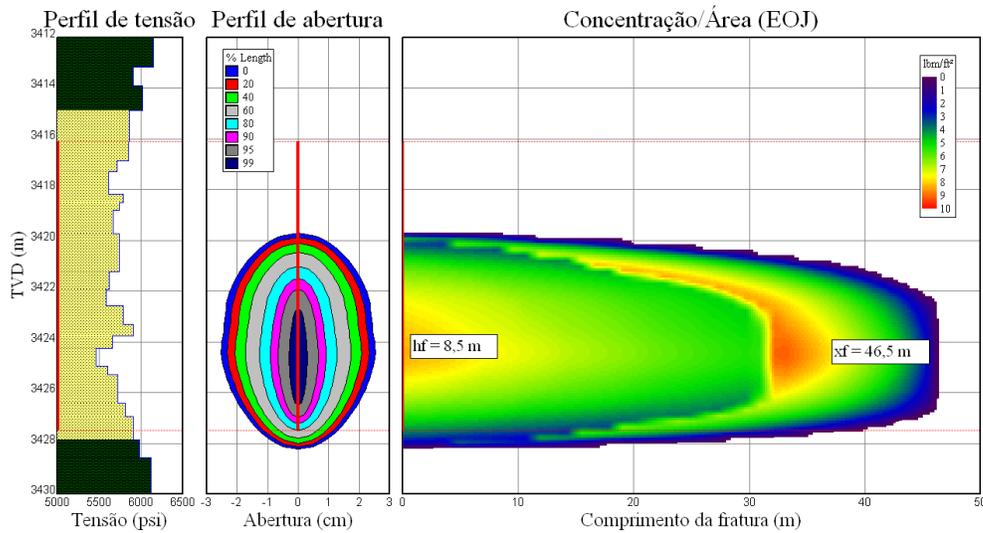


Figura 5.122– Simulação da fratura executada no *fracpack F* no *software Meyer* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software MFrac*, foi feita uma simulação no *software* comercial Stimplan considerando a condição de iniciação da fratura na menor tensão. A figura 5.123 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo Stimplan e a figura 5.124 mostra a geometria final da fratura estimada nesta mesma condição, que apresentou aproximadamente 76 m de comprimento e 20 m de altura. Como pode ser observado no gráfico da figura 5.123, o modelo na condição de iniciação da fratura na menor tensão não conseguiu representar bem as pressões registradas no campo durante a simulação utilizando o *software Stimplan*, desta forma este resultado não será considerado para a comparação com os resultados dos modelos desenvolvidos.

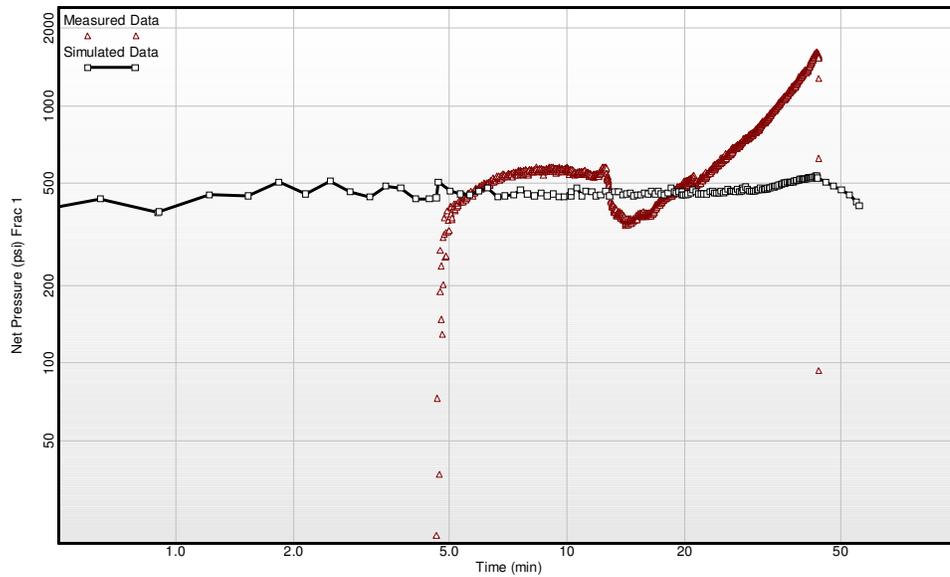


Figura 5.123 – Simulação do *fracpack F* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura na menor tensão. É possível notar que não houve um bom ajuste de pressão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

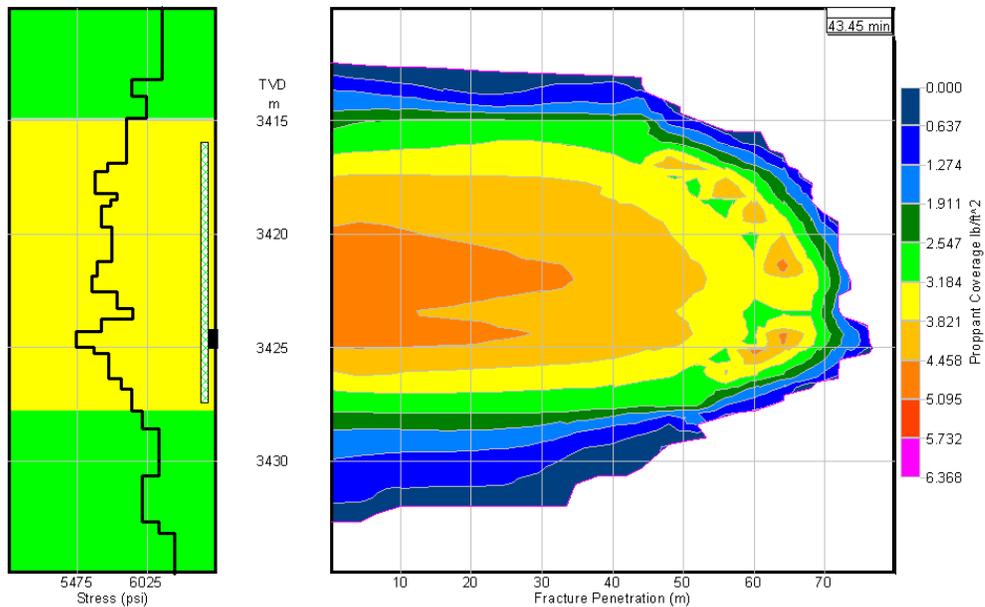


Figura 5.124 – Estimativa da fratura executada no *fracpack F* através da simulação utilizando o *software* Stimplan considerando a iniciação da fratura na menor tensão.

### 5.10.2. Resultados e escolha do melhor modelo

Utilizando os dados do declínio de pressão do minifrac foi possível definir o tempo de fechamento da fratura sendo este igual a 4,5 min. Desta forma foi obtida uma eficiência do minifrac em torno de 27% e conseqüentemente os

expoentes  $\alpha$  estimados para cada geometria foram: 0,58 para a geometria radial, 0,53 para a geometria KGD e 0,57 para a geometria PKN. Com estas informações e conhecendo-se o coeficiente de filtração é possível utilizar o modelo desenvolvido para analisar e interpretar a curva de pressão de fundo registrada durante a operação de *fracpack*. A tabela 5.12 e as figuras, 5.125 e 5.126, apresentam um resumo dos resultados obtidos com os modelos desenvolvidos e com os simuladores comerciais. Cabe ressaltar que nas geometrias PKN e KGD a altura da fratura foi assumida como igual espessura do reservatório.

Fracpack F - Resultados						
Modelo		R ou xf final	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	w médio final	eficiência final
		(m)	(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm)	(%)
Desenvolvido	Radial - Canh	18,8	12,4	14,46	7,33	21,8
	Radial - Sh	27,4	14,6	11,07	4,49	18,4
	KGD	40,3	13,9	19,69	9,28	20,1
	PKN	42,4	18,8	15,26	7,37	20,4
Simuladores Comerciais	Meyer - Canh	15,7	15,7	11,93	5,22	26,0
	Meyer - Sh	46,4	46,4	6,96	2,79	28,9
	Stimplan - Canh	35,0	35,0	13,06	4,09	25,0
	Stimplan - Sh	-	-	-	-	-

Tabela 5.12 – Resumo dos resultados obtidos a partir da interpretação dos registros do *fracpack F*.

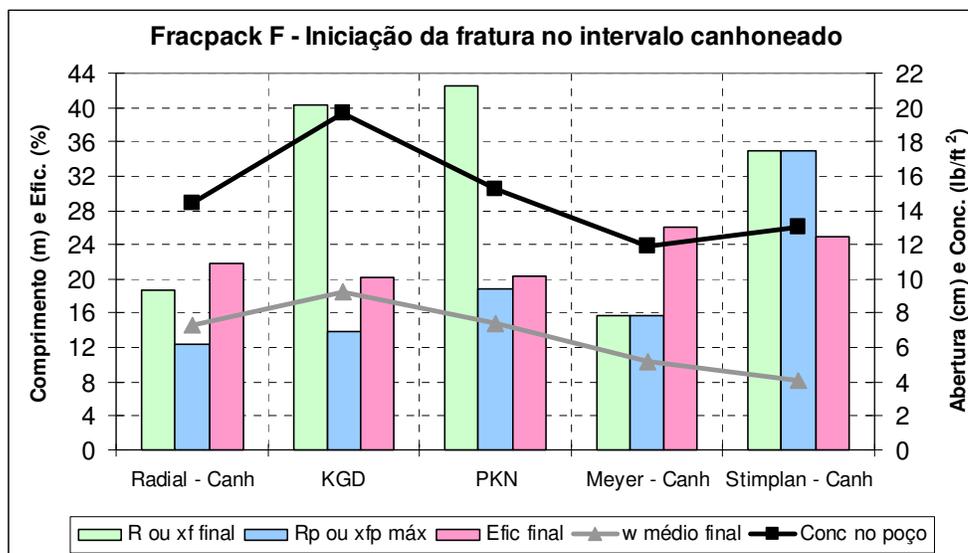


Figura 5.125 – Resultados obtidos para o *fracpack F* com os modelos desenvolvidos e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

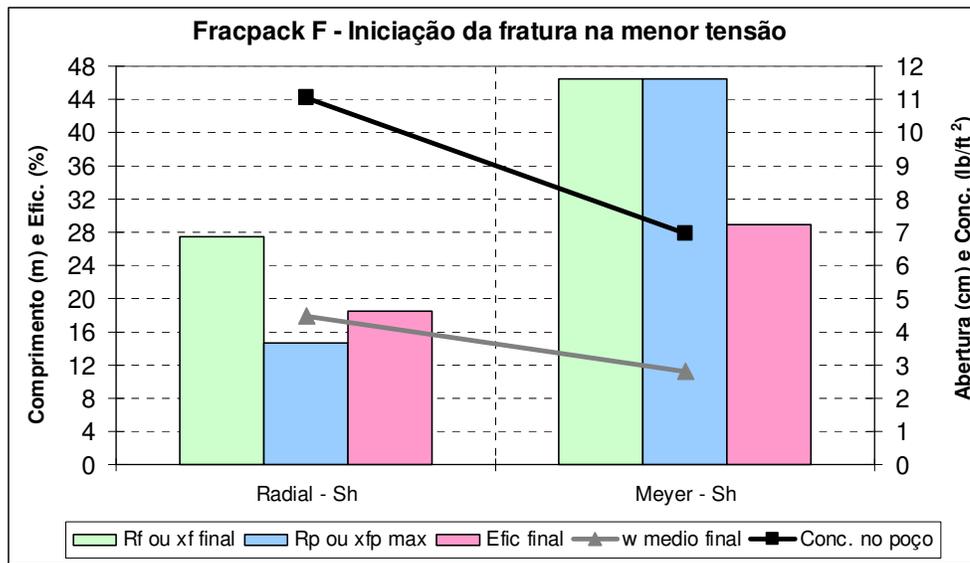


Figura 5.126 – Resultados obtidos para o *fracpack F* com o modelo desenvolvido e o simulador comercial MFrac na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Observando os gráficos das figuras 5.125 e 5.126, nota-se que o modelo desenvolvido na condição de iniciação da fratura na menor tensão não obteve bons resultados e que, na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, principalmente em função do raio ou comprimento final da fratura, os resultados previstos pelo modelo radial ficaram mais próximos dos resultados do simulador Meyer, enquanto que os resultados dos modelos desenvolvidos com as geometrias KGD e PKN se assemelharam mais às respostas do simulador Stimplan.

Para a definição do melhor modelo de previsão dos resultados obtidos nos simuladores comerciais foi realizada uma análise de erros utilizando a diferença quadrada entre os índices definidos previamente. A tabela 5.13 apresenta esta comparação, ressaltando-se que os resultados dos modelos: Radial-canhoneado, KGD e PKN foram comparados aos resultados dos simuladores na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e os resultados do modelo Radial-Sh foram comparados aos obtidos na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

<b>Fracpack F - Comparação entre os índices - Diferença quadrada</b>				
Modelo	Modelo desenvolvido x Simulador comercial	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	Índice geométrico
		(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm/m)
RADIAL Canh	Radial - Canh x Meyer	11,0	6,4	3,4E-03
	Radial - Canh x Stimplan	511,7	2,0	7,5E-02
RADIAL Sh	Radial - Sh x Meyer	1012,5	16,9	1,1E-02
	Radial - Sh x Stimplan	-	-	-
KGD	KGD x Meyer	3,2	60,2	1,0E-02
	KGD x Stimplan	444,4	44,0	1,3E-02
PKN	PKN x Meyer	9,8	11,1	2,5E-02
	PKN x Stimplan	261,5	4,8	3,2E-03
<b>Melhor previsão - MEYER:</b>		KGD	<b>Radial Canh</b>	<b>Radial Canh</b>
<b>Melhor previsão - Stimplan:</b>		<b>PKN</b>	Radial Canh	<b>PKN</b>

Tabela 5.13 – Comparação entre os índices dos modelos desenvolvidos com os obtidos nos simuladores comerciais para o *fracpack F*.

De acordo com a tabela 5.13, a melhor previsão dos resultados do *software* MFrac foi feita pelo modelo desenvolvido para a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e a melhor previsão dos resultados do *software* Stimplan foi feita pelo modelo desenvolvido para a geometria PKN.

A comparação apresentada na tabela 5.13 com relação ao simulador MFrac, também pode ser observada no gráfico da figura 5.127, onde o erro quadrático relativo ao índice geométrico foi multiplicado por um fator de 1000 em função da escala do gráfico. É possível notar que enquanto cada um dos outros modelos apresentaram o maior erro em um dos índices, o modelo radial com iniciação da fratura no intervalo canhoneado se destacou pelos menores erros quadráticos, principalmente nos índices de concentração no poço e geométrico. Os resultados do modelo radial com iniciação da fratura no intervalo canhoneado e do simulador comercial MFrac (Meyer) estão apresentados nas figuras 5.128 a 5.131.

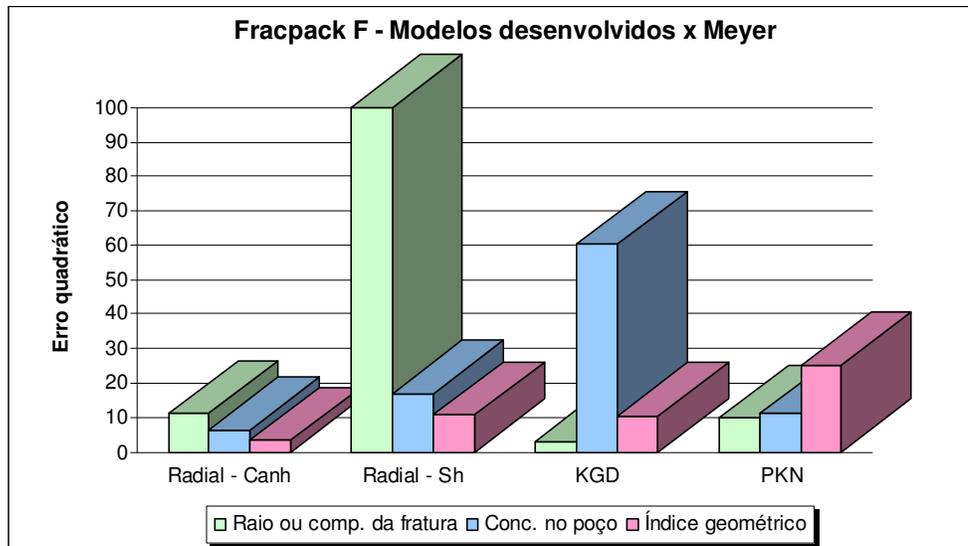


Figura 5.127 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador MFrac (Meyer) para o *fracpack F*.

Analisando o modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e comparando-o com os resultados obtidos pelo simulador Meyer é possível notar uma boa previsão da curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura, conforme apresentado na figura 5.128. Apesar da concentração do agente de sustentação no poço prevista pelo modelo ter apresentado uma diferença de um pouco mais que 2,0 lb/ft<sup>2</sup> em relação a previsão do simulador, se forem comparadas as concentrações máximas estimadas, essa diferença passa a ser de apenas 0,6 lb/ft<sup>2</sup>, um erro que pode ser considerado desprezível. O gráfico também mostra uma boa previsão do raio da fratura, apesar da estimativa apresentar aproximadamente 3,0 m a mais que a resposta do simulador. Neste intervalo, como a concentração é bastante baixa, pode representar a ponta da fratura.

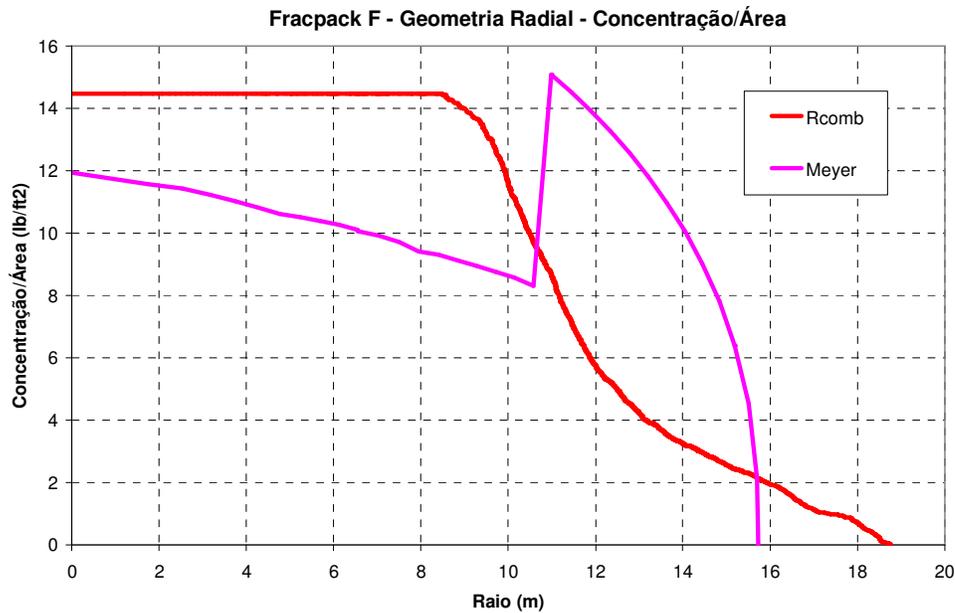


Figura 5.128 – Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura no final do bombeio do *fracpack F*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Com relação à previsão do raio da fratura ao longo do tempo, figura 5.129, é possível notar que o início do empacotamento estimado pelo modelo desenvolvido ocorre aproximadamente 3 min antes da resposta do simulador. Neste instante o raio hidráulico do modelo coincide com o raio da fratura previsto pelo simulador. Já considerando o raio de empacotamento, a linha de tendência utilizada indica um valor máximo que é aproximadamente 3 m inferior a resposta do simulador.

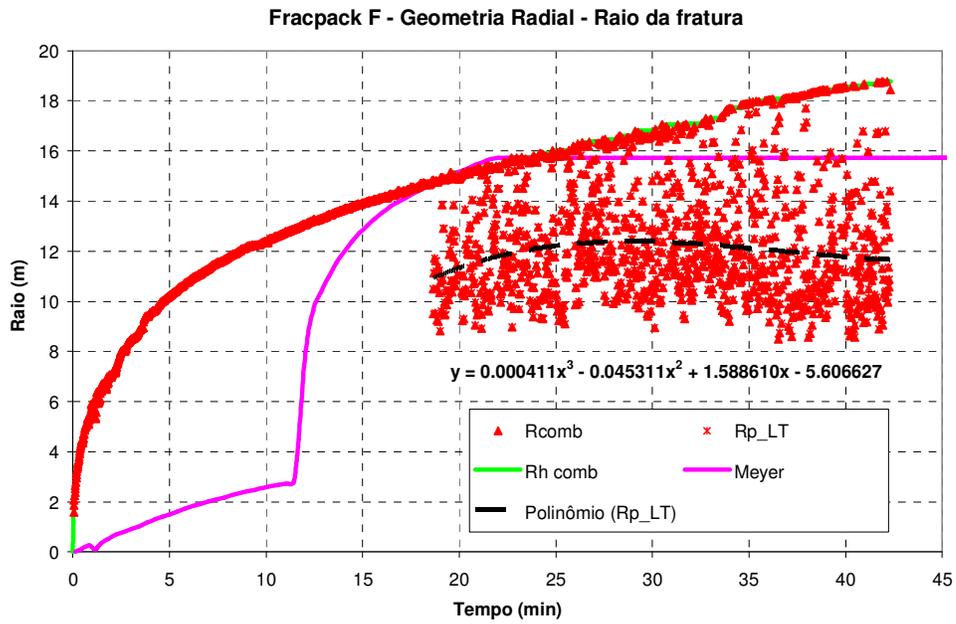


Figura 5.129 – Raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack F*, estimado pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

A previsão da abertura da fratura pelo modelo desenvolvido, figura 5.130, apresentou a maior parte dos pontos fora da envoltória estabelecida com os resultados do simulador. Comparando a resposta do modelo desenvolvido, utilizando a linha de tendência linear, com o resultado da abertura média da fratura, estimada pelo simulador, nota-se uma diferença de aproximadamente 2,1 cm ao final do bombeio.

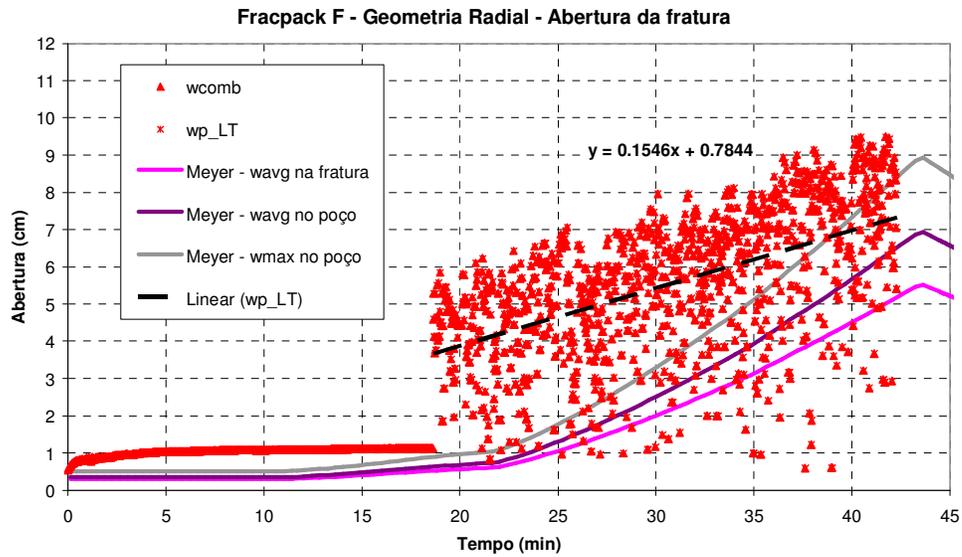


Figura 5.130 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack F*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Com relação à eficiência da fratura, figura 5.131, o modelo desenvolvido não fez uma boa previsão. A linha de tendência linear utilizada apresentou um leve declínio da eficiência no período de empacotamento da fratura enquanto o simulador comercial mostrou uma curva de eficiência ascendente.

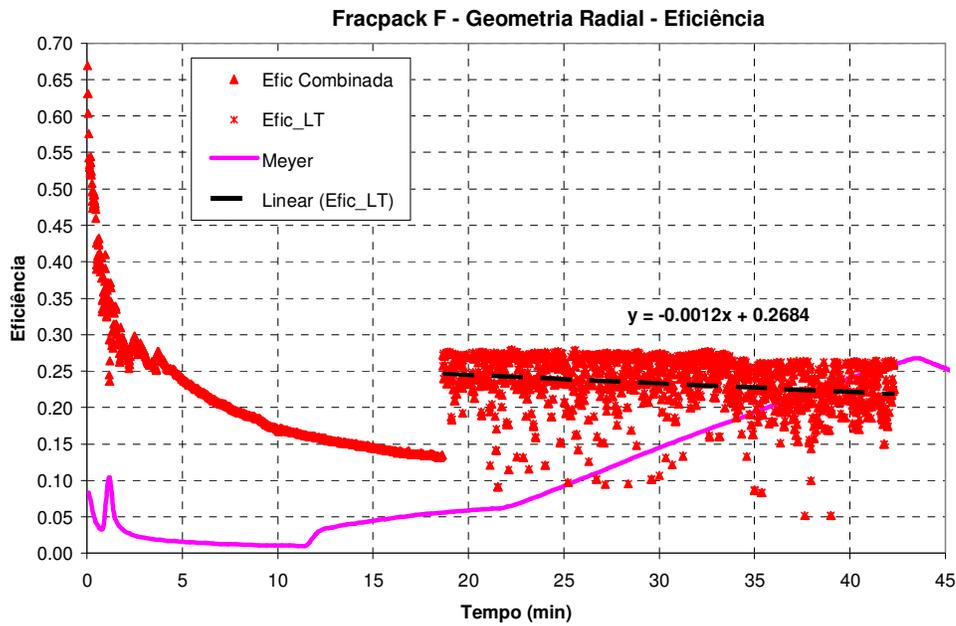


Figura 5.131 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack F*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Com relação ao simulador Stimplan, a tabela 5.13 mostrou que a melhor previsão dos resultados foi feita pelo modelo desenvolvido para a geometria PKN. Este mesmo resultado pode ser observado no gráfico da figura 5.132, onde o índice do raio da fratura foi dividido por um fator de 10 e o índice geométrico foi multiplicado por 1000 em função da escala do gráfico. De acordo com a figura, com exceção do índice de concentração no poço, que também apresentou um erro quadrático pequeno, o modelo desenvolvido com a geometria PKN foi aquele que proporcionou o menor erro quadrático nos índices analisados, sendo escolhido como o melhor modelo de previsão do Stimplan. Os resultados deste modelo e do simulador comercial estão apresentados nas figuras 5.133 a 5.136.

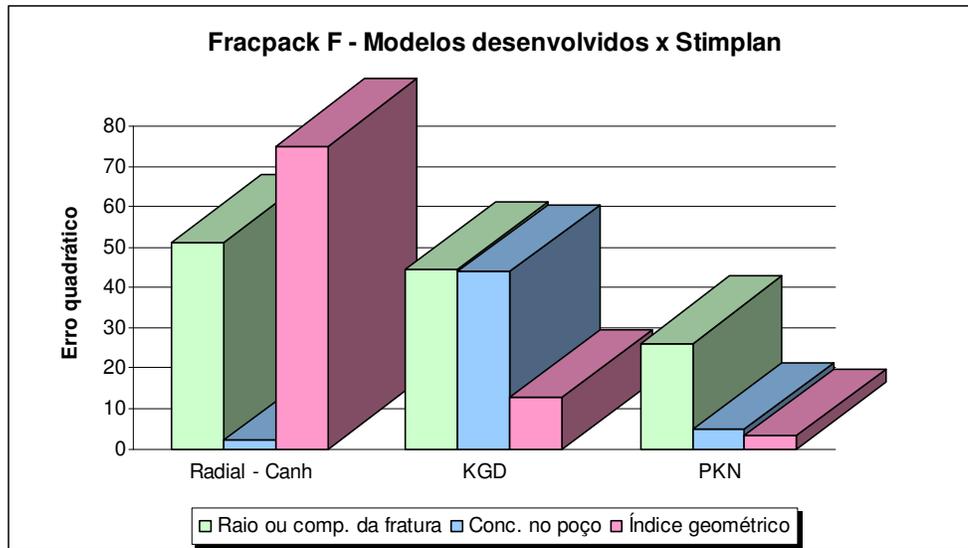


Figura 5.132 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador Stimplan para o *fracpack F*.

Analisando o modelo desenvolvido com a geometria PKN e comparando-o com os resultados obtidos pelo simulador Stimplan é possível notar uma boa previsão da curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do comprimento da fratura, conforme apresentado na figura 5.133. Apesar da concentração do agente de sustentação no poço prevista pelo modelo desenvolvido ter ficado aproximadamente 2,0 lb/ft<sup>2</sup> maior que a previsão do simulador, as curvas apresentaram formato e comprimento final bastante semelhantes.

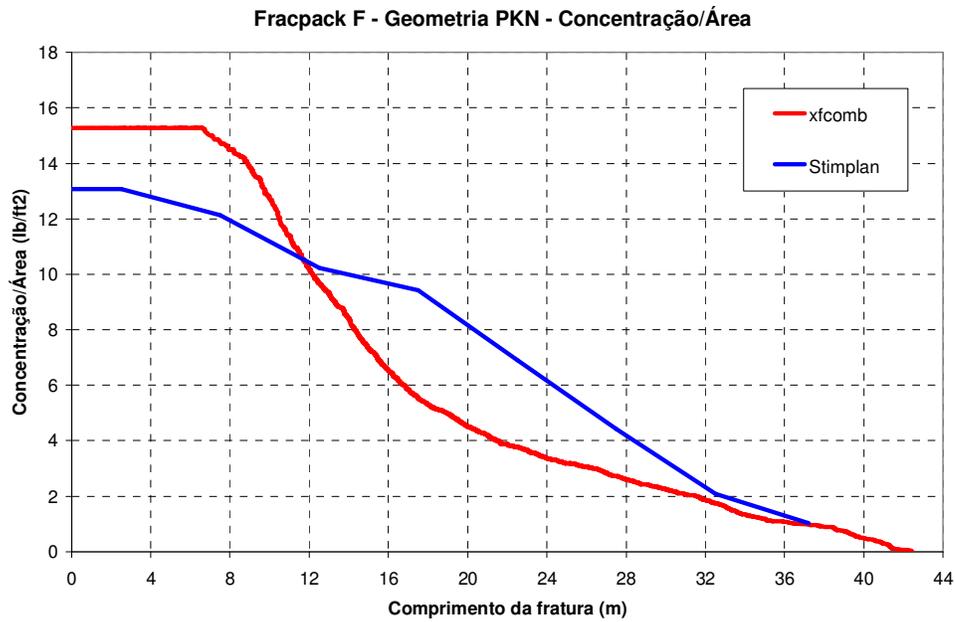


Figura 5.133 – Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do comprimento da fratura no final do bombeio do *fracpack F*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria PKN.

Na curva de propagação do comprimento da fratura, figura 5.134, é possível notar que na maior parte do tempo o modelo desenvolvido estimou um comprimento hidráulico um pouco inferior ao previsto pelo simulador e conseqüentemente a linha de tendência utilizada sobre a grande dispersão de pontos para a avaliação do raio de empacotamento da fratura também ficou inferior à previsão do simulador.

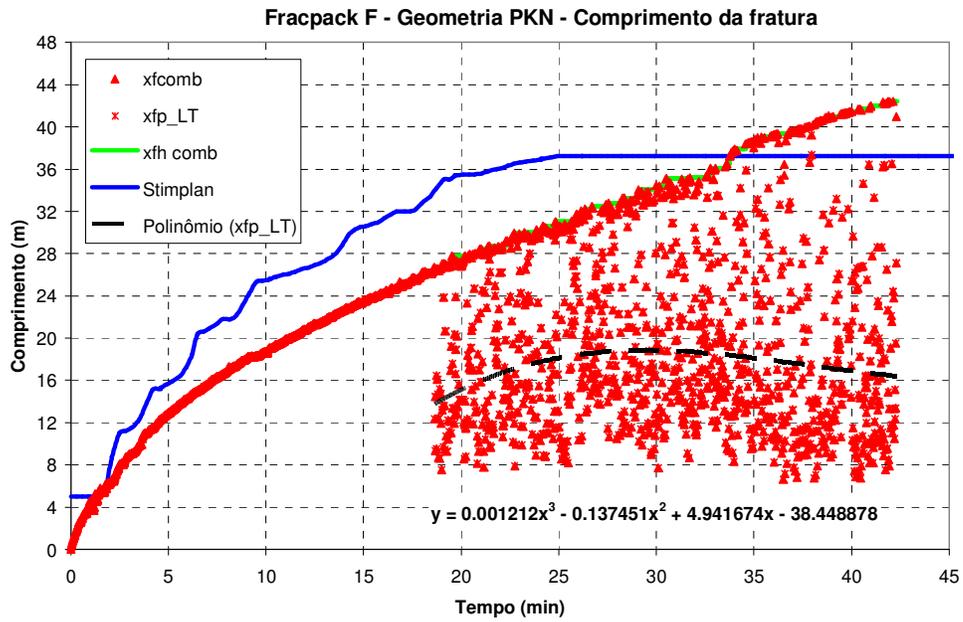


Figura 5.134 – Raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack F*, estimado pelo modelo desenvolvido com a geometria PKN.

Antes do início dos empacotamentos, o modelo desenvolvido fez uma boa previsão da abertura da fratura ao longo do tempo, como pode ser observado na figura 5.135. Já no período de aumento da abertura, além da grande dispersão dos resultados, a linha de tendência linear utilizada permaneceu acima da curva estimada pelo simulador, apresentando no final do bombeio uma diferença de aproximadamente 3,0 cm em relação à resposta do Stimplan.

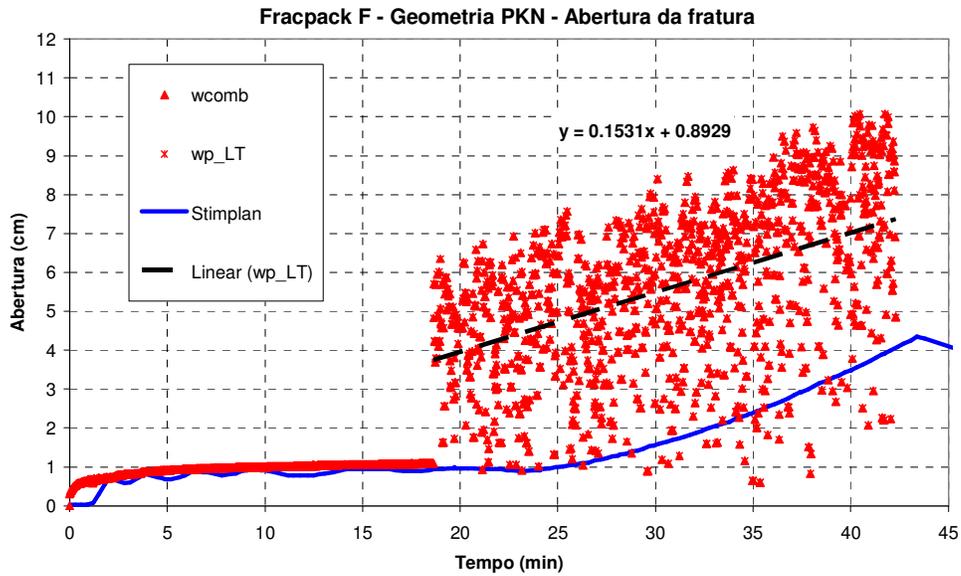


Figura 5.135 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack F*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria PKN.

Apesar da boa previsão da eficiência ao longo do tempo até o instante de aproximadamente 19 min, o modelo combinado desenvolvido com a geometria PKN indicou, através da linha de tendência linear utilizada, um leve declínio da eficiência nos períodos de empacotamento da fratura até o final do bombeio, como pode ser observado na figura 5.136. A previsão realizada diverge da resposta obtida com o simulador Stimplan, que indica um crescimento da eficiência nos períodos de empacotamento, atingindo um valor em torno de 0,25 ao final do bombeio quando a eficiência estimada pelo modelo desenvolvido foi de aproximadamente 0,20.

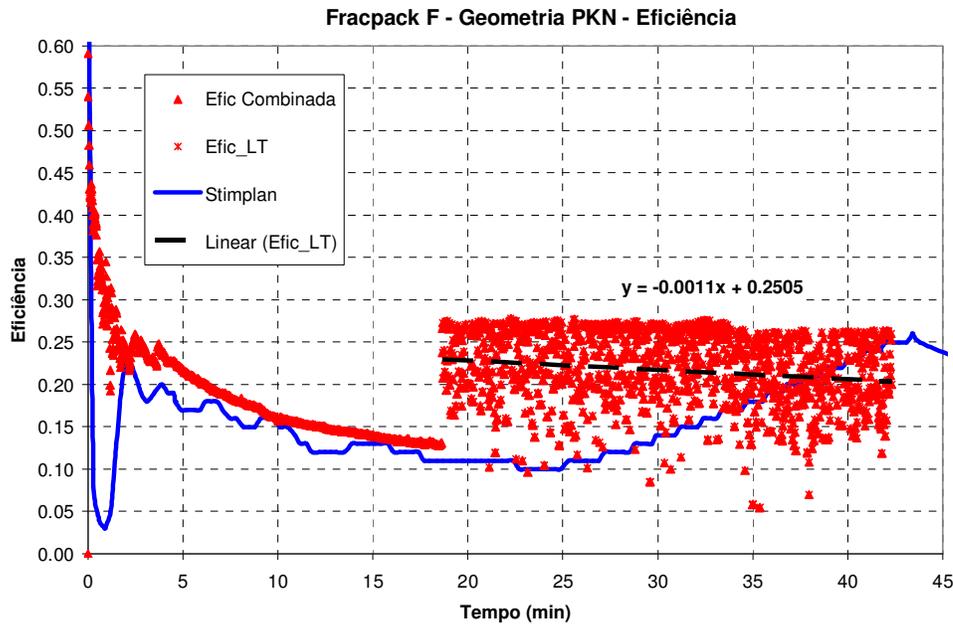


Figura 5.136 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack F*, estimada pelo modelo desenvolvido com a geometria PKN.

### 5.10.3. Evolução do modelo de Valkó & Oligney

Os gráficos nas figuras 5.137 a 5.140 apresentam os resultados dos ajustes efetuados no modelo original de Valkó & Oligney, e os compara ao modelo combinado desenvolvido com a geometria radial considerando a iniciação da fratura no intervalo canhoneado e também às respostas do simulador comercial MFrac (Meyer). Não foi feita comparação com o Stimplan já que o modelo radial não fez uma boa previsão dos resultados deste simulador.

A figura 5.137 apresenta a evolução do modelo de Valkó & Oligney na curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura. A seta azul indica a evolução obtida na curva referente ao raio de empacotamento, sendo seu ponto de partida a curva estimada com o modelo original e seu ponto de chegada a curva obtida com o modelo desenvolvido. Nota-se neste caso, que o modelo desenvolvido apresentou um resultado ainda melhor que o obtido com o modelo final de Valkó & Oligney, já que ficou mais próximo da resposta do simulador. As setas verdes indicam a evolução dos raios hidráulicos, que convergem na direção da resposta obtida com o modelo combinado, que utiliza o balanço de massa de Carter como modelo de propagação. Conforme já mencionado, esta melhoria no raio hidráulico

apresenta grande impacto nos resultados encontrados para a abertura e para a eficiência da fratura, como será visto nas figuras 5.139 e 5.140.

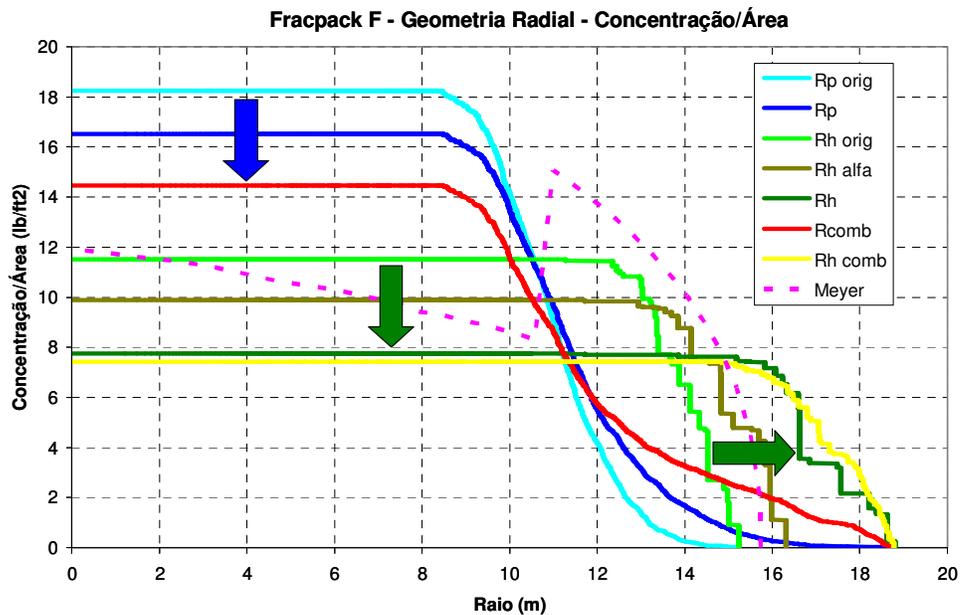


Figura 5.137 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura para o *fracpack F*.

Com relação à propagação do raio da fratura ao longo do tempo, de forma a simplificar o entendimento do gráfico, a figura 5.138 apresenta apenas os raios hidráulicos, lembrando que estes são um limite superior dos raios de empacotamento. É possível observar que o raio hidráulico original, e desta forma, os raios de empacotamento estimados originalmente, permanecem inferior a resposta do simulador durante os empacotamentos da fratura, que iniciam por volta do instante 22 min. Já os ajustes realizados no modelo de Valkó & Oligney levaram a um aumento do raio hidráulico no período dos empacotamentos da fratura, aproximando este modelo e o modelo combinado da resposta obtida pelo simulador, principalmente no tempo inicial dos empacotamentos.

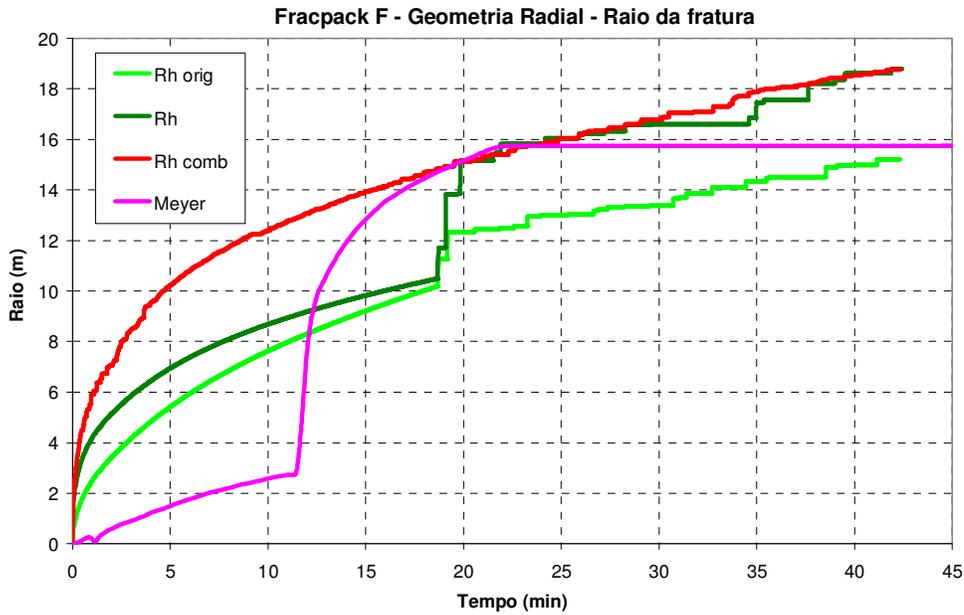


Figura 5.138 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão do raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack F*.

Apesar da curva de abertura do modelo final de Valkó & Oligney e do modelo combinado não terem ficado dentro da envoltória de respostas do simulador, figura 5.139, é possível notar que os ajustes realizados aproximaram o modelo de Valkó & Oligney das curvas do simulador, como pode ser visto comparando-se os pontos verde-claros, que representam o modelo original, e os pontos verde-escuros, referentes ao modelo final. Vale ressaltar ainda a resposta obtida quando a abertura da fratura é calculada com a área de empacotamento. Representada pelos pontos azuis, a abertura  $w_p$  apresenta pontos ainda maiores que os das outras aberturas.

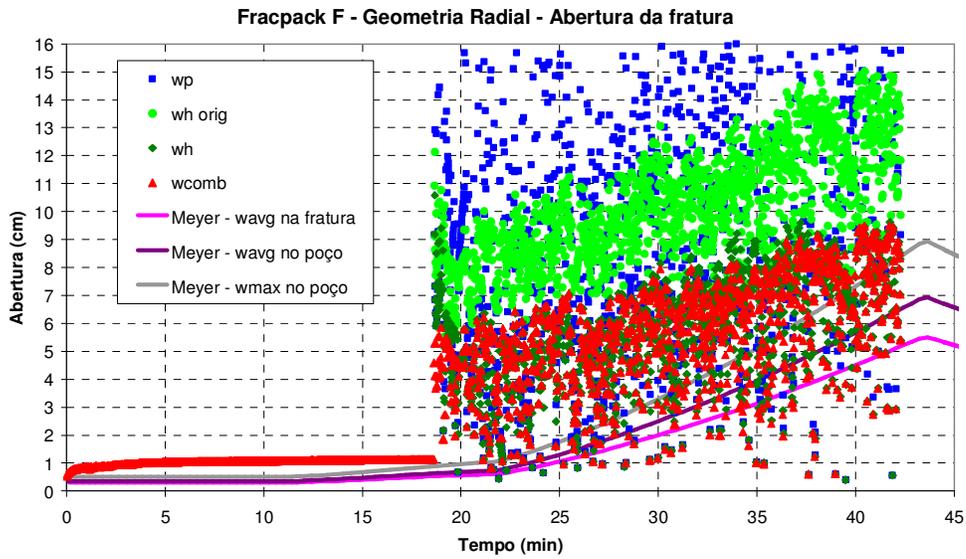


Figura 5.139 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack F*.

Representada por bolinhas na cor azul clara, a eficiência calculada com o modelo original de Valkó & Oligney permanece superior às eficiências estimadas pelo modelo final de Valkó & Oligney e pelo modelo combinado, como mostra a figura 5.140. Este resultado já era esperado, pois tem por base a abertura da fratura calculada com o modelo original de Valkó & Oligney, a qual ficou superior à resposta dos outros modelos.

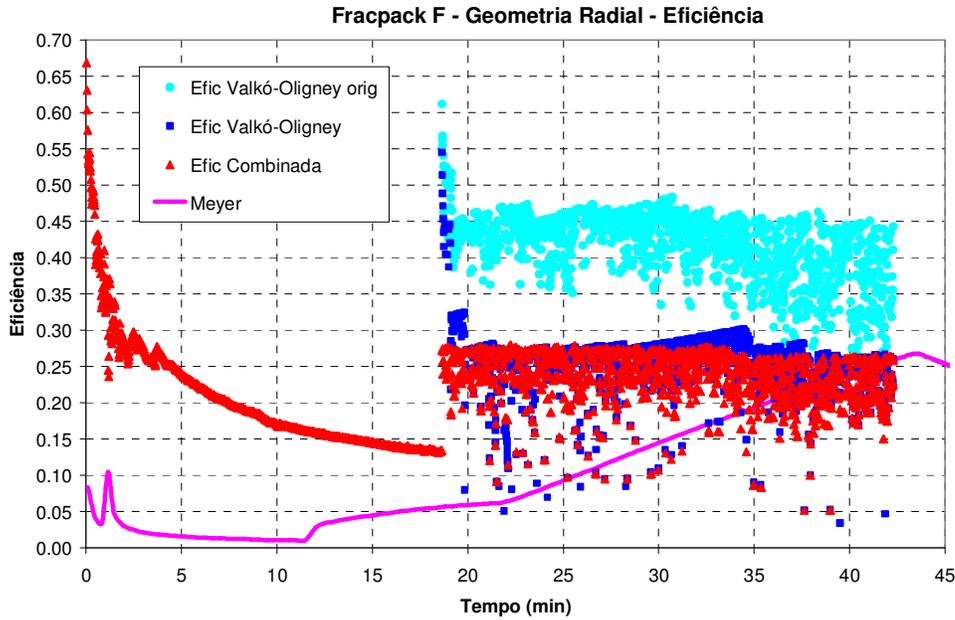


Figura 5.140 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da eficiência da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack F*.

**5.10.4. Considerando Rh no balanço de massa**

Conforme mencionado no tópico 4.2.1, no desenvolvimento do modelo, Valkó & Oligney [3] não utilizaram o raio hidráulico no equacionamento do balanço de massa para o cálculo do raio de empacotamento, e desta forma foi considerado que durante o TSO a filtração ocorreria através da área definida pelo raio de empacotamento e não através da área definida pelo raio hidráulico. Este tópico tem por objetivo apresentar um equacionamento que considera a filtração através da área hidráulica e mostrar o resultado obtido com a utilização deste equacionamento na interpretação dos registros do *fracpack F*.

Para incorporar o raio hidráulico ao equacionamento foi necessário o desenvolvimento de uma nova equação para o raio de empacotamento, na qual o raio hidráulico é utilizado para o cálculo da vazão de filtração. Esta equação deveria ser utilizada quando o raio de empacotamento fosse inferior ao raio hidráulico e desta forma, a área de filtração seria maior que a área empacotada. Partindo-se da eq. (3.4), reescrita a seguir, foi necessário redefinir a vazão de filtração.

$$\frac{dP_w}{dt} = \left( \frac{3\pi E'}{16R} \right) \left( \frac{2}{\pi R^2} \right) (q - q_L) \tag{3.4}$$

A vazão de filtração, definida pela eq. (3.5), seria estabelecida através da área hidráulica,  $A_h$ , definida pela eq. (4.11), e não mais através da área empacotada,  $A_p$ , para os casos em que o raio de empacotamento fosse inferior ao raio hidráulico, eq. (5.6):

$$q_{L,t} = \frac{2C_L A_h}{\sqrt{t}} f(\Delta t_D, \alpha) \quad (5.6)$$

O raio hidráulico também foi considerado na complacência, já que esta é definida a partir do volume da fratura, o qual é função da pressão líquida. A eq. (2.90) passaria a ser função do raio hidráulico da fratura, conforme definido pela eq. (5.7):

$$c_f^{Rad} = \frac{16R_h}{3\pi E'} \quad (5.7)$$

Utilizando a inclinação da curva de pressão,  $m(t)$ , e substituindo as eq. (5.6), da vazão de filtração, (4.11), que define a área hidráulica e a eq. (5.7) que estabelece a complacência em função do raio hidráulico, na eq. (3.4), é obtida a eq. (5.8):

$$m(t) = \left( \frac{3\pi E'}{16R_h} \right) \left( \frac{2}{\pi R^2} \right) \left( q - \frac{2C_L}{\sqrt{t}} \frac{\pi R_h^2}{2} f(\Delta t_D, \alpha) \right) \quad (5.8)$$

Rearranjando a eq. (5.8) e isolando o raio de empacotamento, tem-se a eq. (5.9):

$$R(t) = \left[ \left( \frac{3E'}{8mR_h} \right) \left( q - \frac{\pi R_h^2 C_L}{\sqrt{t}} f(\Delta t_D, \alpha) \right) \right]^{1/2} \quad (5.9)$$

Desta forma, conhecendo-se a função  $f(\Delta t_D, \alpha)$  e o raio hidráulico é possível definir o raio de empacotamento quando este for inferior ao raio hidráulico.

Com os registros do *fracpack F* e utilizando o modelo radial, o expoente  $\alpha$  foi estimado em 0,58 e conseqüentemente a função  $f(\Delta t_D, \alpha)$  foi aproximada por 1,646. Com estas informações e considerando o coeficiente de filtração obtido no ajuste de pressão na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, 0,019 ft/min<sup>1/2</sup>, a curva de pressão da operação do *fracpack F* pode ser interpretada com este novo equacionamento. Os resultados da concentração do agente de sustentação em função do raio da fratura e do crescimento do raio ao longo do tempo estão apresentados nas figuras 5.141 e 5.142.

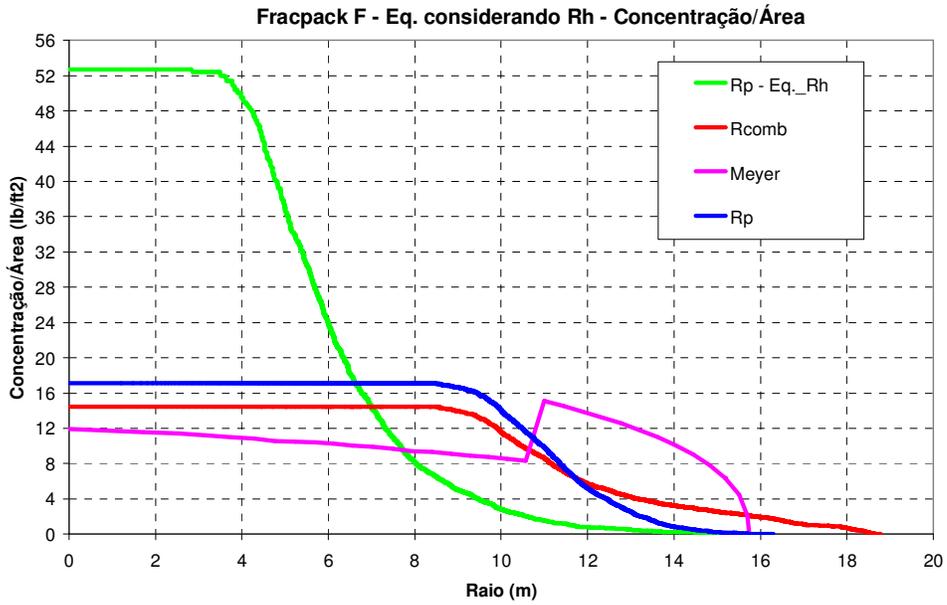


Figura 5.141 – A curva verde mostra a distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura considerando a filtração através da área hidráulica nos períodos de TSO.

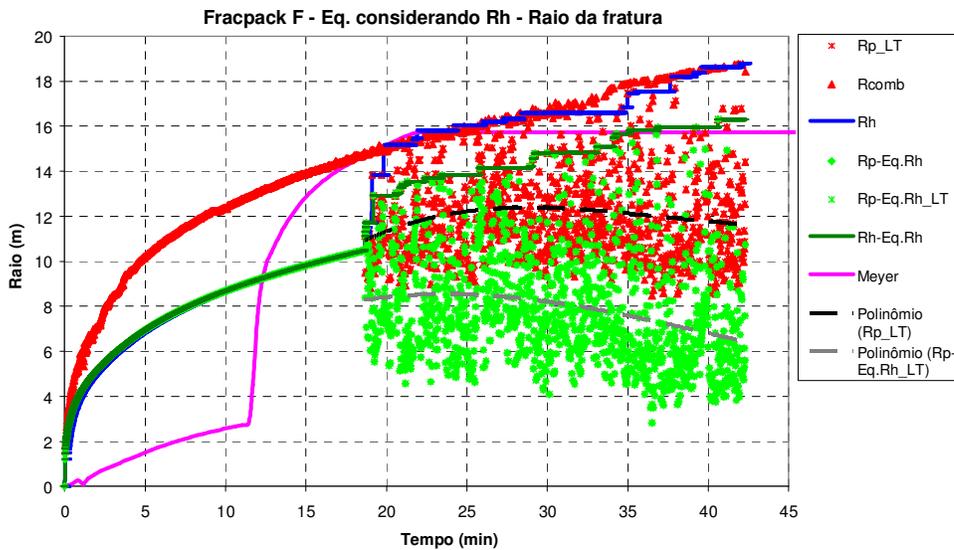


Figura 5.142 – Os pontos verdes representam o raio da fratura ao longo do tempo considerando a filtração através da área hidráulica nos períodos de TSO.

A figura 5.141 mostra que caso o modelo considerasse a filtração através da área hidráulica nos períodos de TSO e não através da área empacotada, a concentração no poço atingiria o valor de aproximadamente 52 lb/ft<sup>2</sup>, sendo este

um resultado distante da realidade. Esse aumento da concentração no poço é função da maior área exposta à filtração devido a utilização do raio hidráulico, acarretando no ganho de volume filtrado e, conseqüentemente, na redução do volume da fratura. Com um volume de fratura menor, os raios de empacotamento diminuem, levando a distribuição da mesma massa de agente de sustentação numa área de empacotamento reduzida. Essa diminuição dos raios de empacotamento é ilustrada na figura 5.142, comparando-se a linha de tendência linear preta com a linha de tendência linear cinza. Vale ressaltar que o modelo utilizado neste novo equacionamento do balanço de massa não considerou o ajuste do modelo de Valkó & Oligney em relação à resolução da equação do terceiro grau. Caso este ajuste tivesse sido incluído, a concentração no poço seria ainda maior, atingindo um valor de 330 lb/ft<sup>2</sup>, em função dos maiores raios hidráulicos calculados neste modelo, que estão representados pela curva azul na figura 5.142.

## **5.11.**

### ***Fracpack G***

Esta operação foi executada em lâmina d' água de 1834 m, em um arenito cujo topo encontra-se na profundidade de 3347 m, apresentando 34,5 m de espessura e 32 m de intervalo canhoneado. A permeabilidade estimada para a formação é de 580 mD, seu módulo de elasticidade é de 1,1x10<sup>6</sup> psi (7,35x10<sup>3</sup> MPa) e seu coeficiente de Poisson é 0,31. A temperatura na superfície foi estimada em 23°C enquanto a temperatura no reservatório é de 54°C. O fluido utilizado no tratamento possui uma carga polimérica de 35 lb/Mgal e, utilizando a média das temperaturas da superfície e do reservatório, foram escolhidos os parâmetros reológicos do fluido do tratamento a serem utilizados no modelo, sendo estes: n igual a 0,4485 e K igual a 0,1774 lbf.s<sup>n</sup>/ft<sup>2</sup>. O agente de sustentação bombeado foi cerâmica leve, sendo sua massa específica igual a 2,71 g/cm<sup>3</sup>.

#### **5.11.1.**

##### **Calibração do modelo**

**5.11.1.1. Iniciação da fratura no intervalo canhoneado**

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, no qual foi obtido o coeficiente de filtração igual a  $0,0088 \text{ ft/min}^{1/2}$ . A figura 5.143 mostra as curvas de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* comercial após a calibração do modelo para a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. Já a figura 5.144 apresenta a geometria final estimada para a fratura nesta mesma condição, com um comprimento de aproximadamente 20 m e altura de 45 m, além do perfil litológico e de tensões.

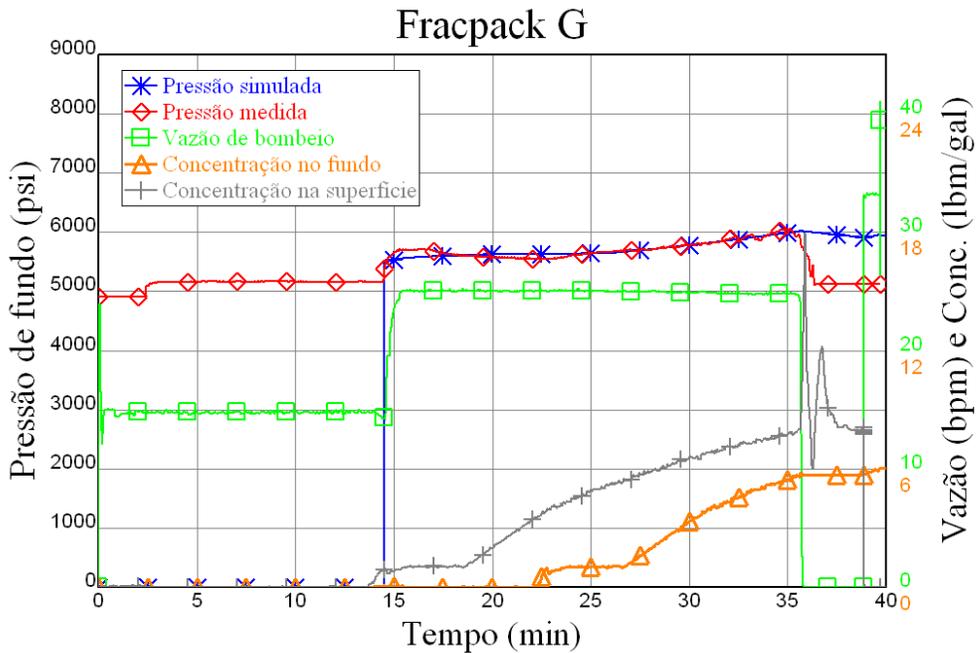


Figura 5.143 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack G* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

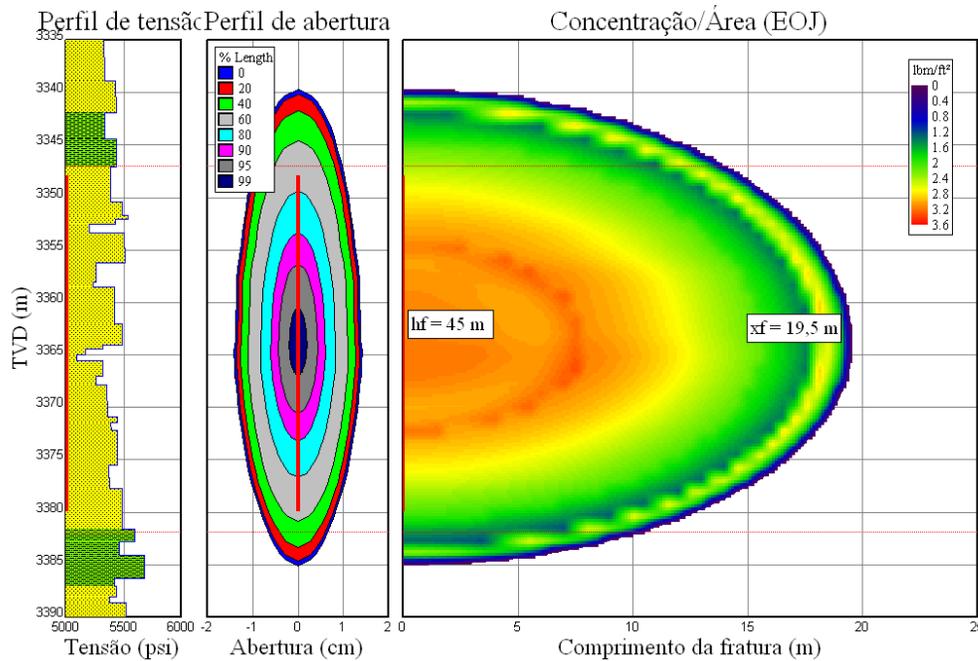


Figura 5.144 – Simulação da fratura executada no *fracpack G* no *software Meyer* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software MFrac*, foi feita uma simulação no *software* comercial Stimplan considerando a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. A figura 5.145 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo Stimplan e a figura 5.146 mostra a geometria final da fratura estimada pelo *software 3D* nesta mesma condição, que apresentou um comprimento de 28 m e altura de 49 m. Em função do bom resultado apresentado pelo gráfico de pressão, a simulação foi considerada válida e será utilizada para comparação com os resultados obtidos nos modelos desenvolvidos.

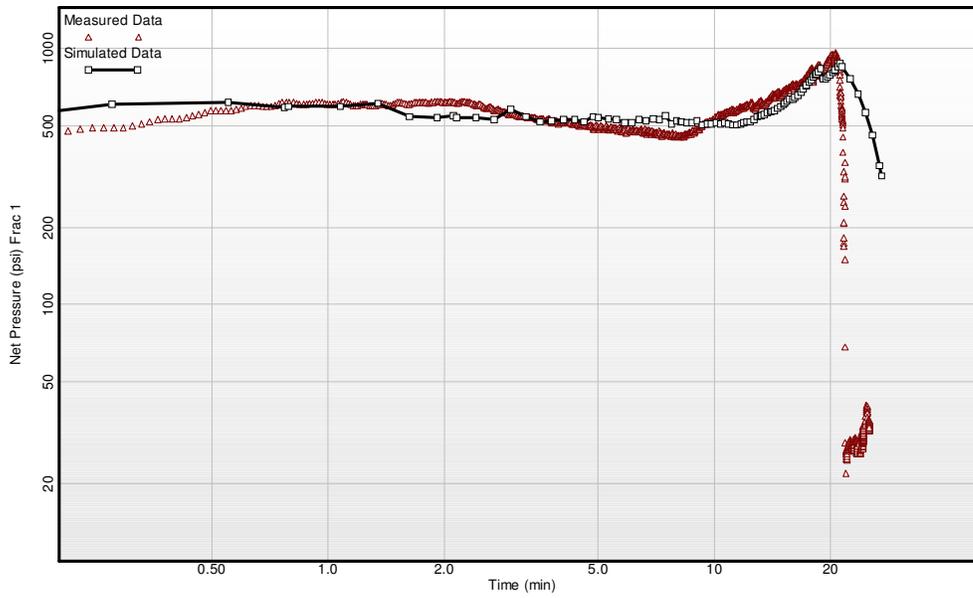


Figura 5.145 – Simulação do *fracpack G* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

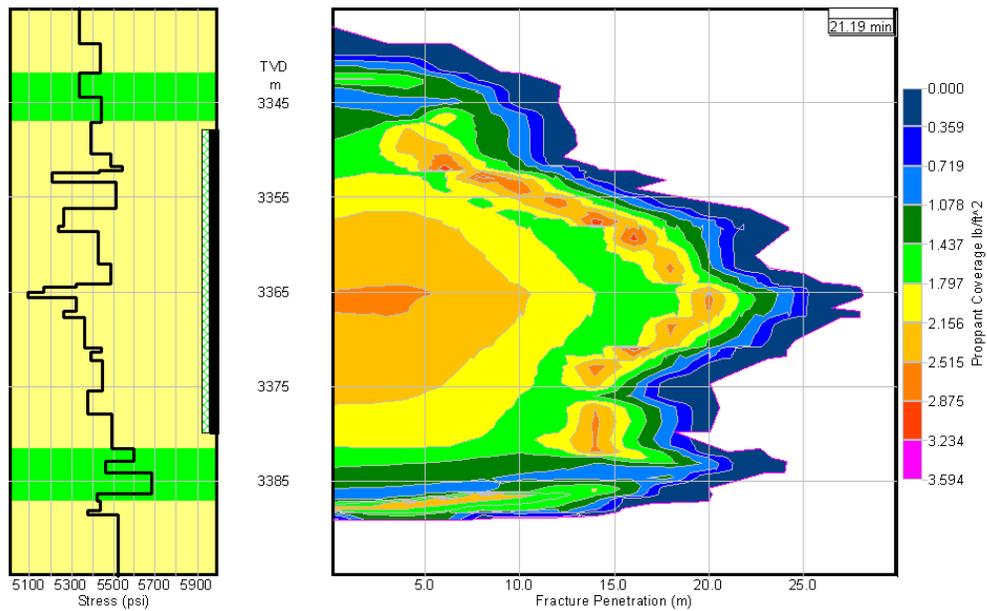


Figura 5.146 – Estimativa da fratura executada no *fracpack G* através da simulação utilizando o *software* Stimplan, considerando a iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

### 5.11.1.2. Iniciação da fratura na menor tensão

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial na condição de iniciação da fratura na menor tensão, no qual foi obtido o coeficiente de filtração igual a  $0,0064 \text{ ft}/\text{min}^{1/2}$ . A figura 5.147 mostra a curva de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* MFrac após a calibração do modelo para esta condição. Já a figura 5.148 apresenta a geometria final estimada para a fratura com um comprimento de aproximadamente 30 m e altura de 36,5 m, além do perfil litológico e de tensões.

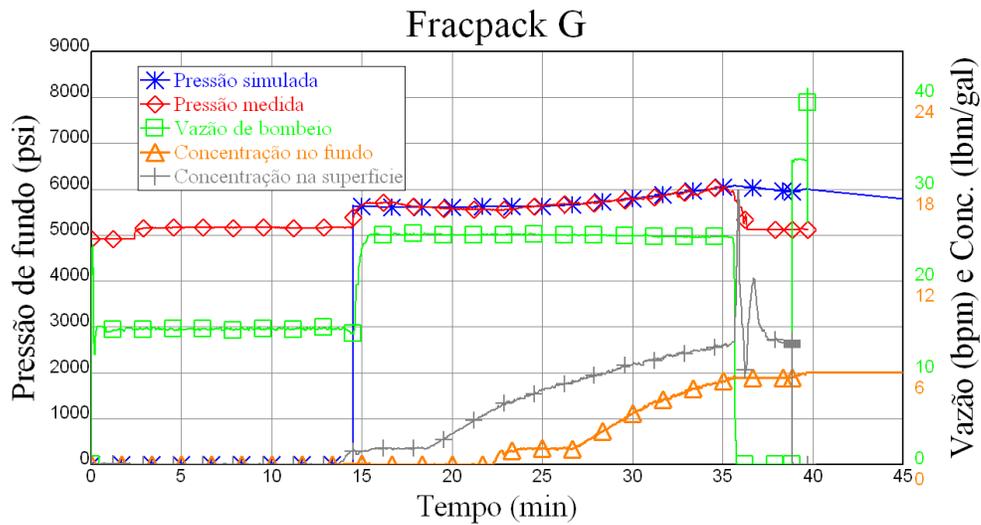


Figura 5.147– Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack G* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

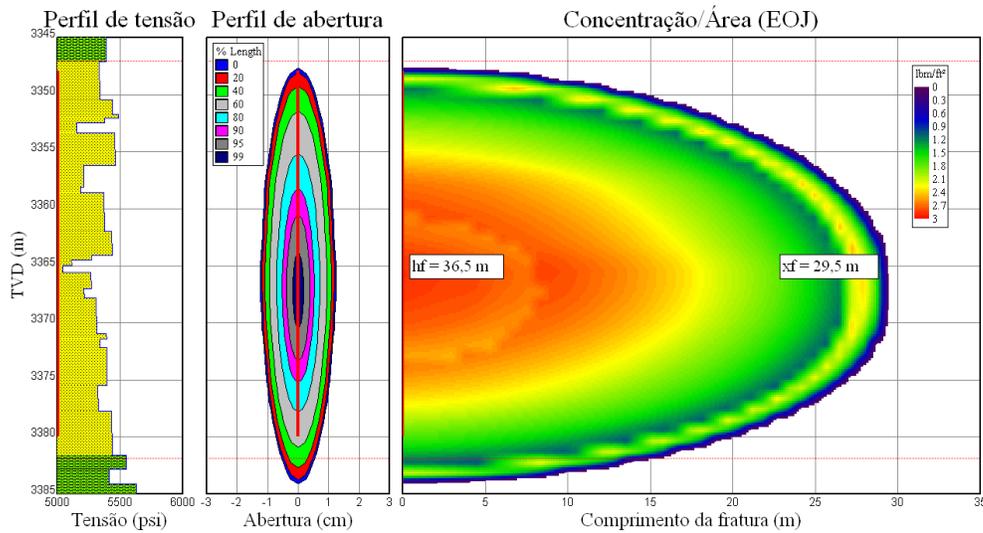


Figura 5.148– Simulação da fratura executada no *fracpack G* no *software* Meyer na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software* MFrac, foi feita uma simulação no *software* comercial Stimplan considerando a condição de iniciação da fratura na menor tensão. A figura 5.149 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo Stimplan e a figura 5.150 mostra a geometria final da fratura estimada nesta mesma condição, que apresentou um comprimento de aproximadamente 36 m e altura de 49 m. Como pode ser observado no gráfico da figura 5.149, o modelo na condição de iniciação da fratura na menor tensão não conseguiu representar tão bem as pressões registradas no campo utilizando o *software* Stimplan, no entanto, por ter apresentado algum incremento de pressão líquida, seus resultados foram considerados válidos para comparação com as respostas obtidas nos modelos desenvolvidos.

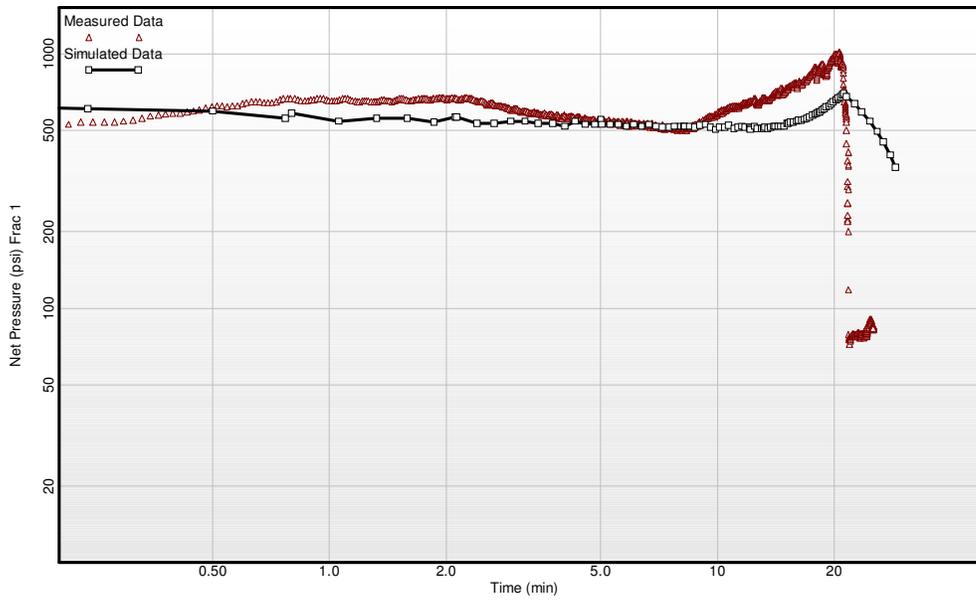


Figura 5.149 – Simulação do *fracpack G* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

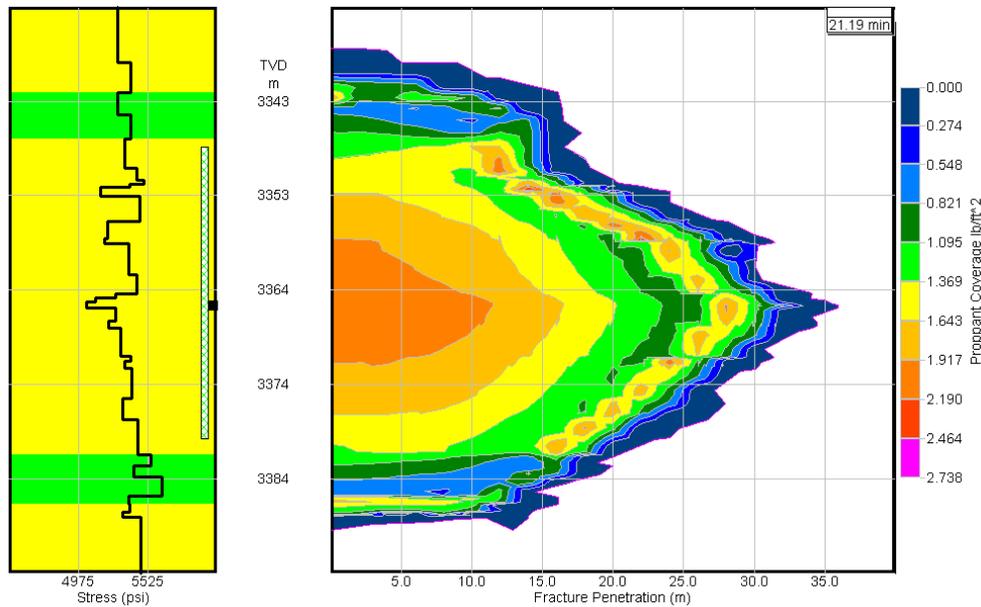


Figura 5.150 – Estimativa da fratura executada no *fracpack G* através da simulação utilizando o *software* Stimplan considerando a iniciação da fratura na menor tensão.

### 5.11.2. Resultados e escolha do melhor modelo

Utilizando os dados do declínio de pressão do minifrac foi possível definir o tempo de fechamento da fratura no declínio sendo este igual a 3,3 min. Desta forma foi obtida uma eficiência do minifrac em torno de 28% e

conseqüentemente os expoentes  $\alpha$  estimados para cada geometria foram: 0,58 para a geometria radial, 0,53 para a geometria KGD e 0,57 para a geometria PKN. Com estas informações e conhecendo-se o coeficiente de filtração é possível utilizar o modelo desenvolvido para analisar e interpretar a curva de pressão de fundo registrada durante a operação de *fracpack*. A tabela 5.14 e as figuras, 5.151 e 5.152, apresentam um resumo dos resultados obtidos com os modelos desenvolvidos e com os simuladores comerciais. Cabe ressaltar que nas geometrias PKN e KGD a altura da fratura foi assumida como igual espessura do reservatório.

Fracpack G - Resultados						
Modelo		R ou xf final	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	w médio final	eficiência final
		(m)	(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm)	(%)
Desenvolvido	Radial - Canh	24,3	18,0	3,16	2,63	26,7
	Radial - Sh	27,6	19,5	2,79	2,31	26,1
	KGD	26,7	13,9	1,21	2,83	25,4
	PKN	26,9	12,5	1,80	3,19	20,6
Simuladores Comerciais	Meyer - Canh	19,6	19,6	2,30	1,95	33,0
	Meyer - Sh	29,5	29,5	1,78	1,65	34,3
	Stimplan - Canh	28,2	28,2	2,11	1,09	25,0
	Stimplan - Sh	34,0	34,0	1,78	1,02	28,0

Tabela 5.14 – Resumo dos resultados obtidos a partir da interpretação dos registros do *fracpack F*.

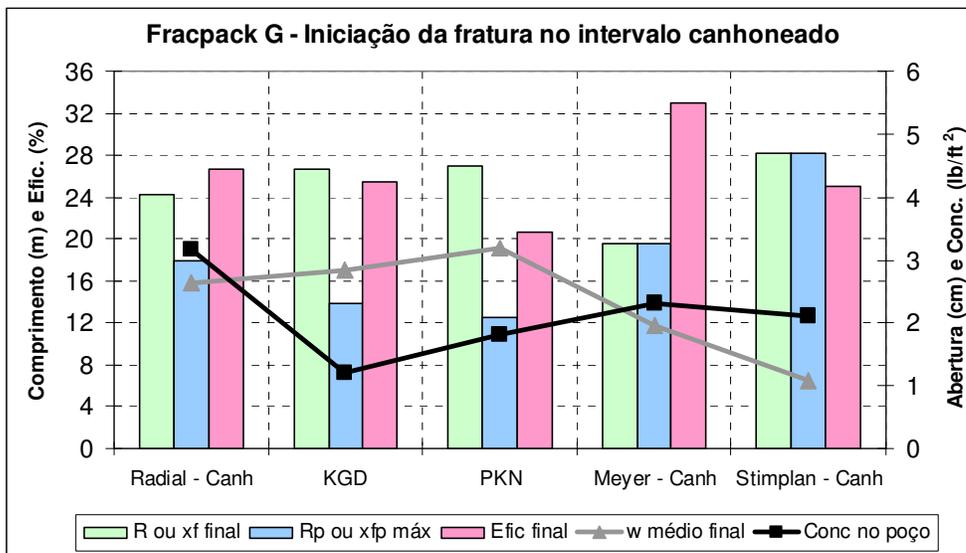


Figura 5.151 – Resultados obtidos para o *fracpack F* com os modelos desenvolvidos e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

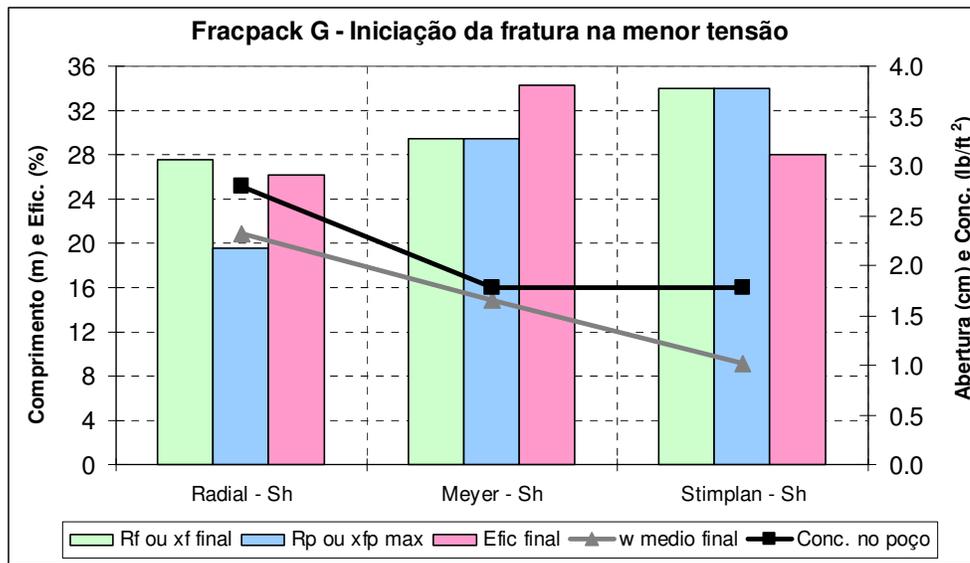


Figura 5.152 – Resultados obtidos para o *fracpack F* com o modelo desenvolvido e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Para a definição do melhor modelo de previsão dos resultados obtidos nos simuladores comerciais foi realizada uma análise de erros utilizando a diferença quadrada entre os índices definidos previamente. A tabela 5.15 apresenta esta comparação, ressaltando-se que os resultados dos modelos: Radial-canhoneado, KGD e PKN foram comparados aos resultados dos simuladores na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e os resultados do modelo Radial-Sh foram comparados aos obtidos na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

<b>Fracpack G - Comparação entre os índices - Diferença quadrada</b>				
Modelo	Modelo desenvolvido x Simulador comercial	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	Índice geométrico
		(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm/m)
RADIAL Canh	Radial - Canh x Meyer	2,7	0,7	7,9E-05
	Radial - Canh x Stimplan	105,1	1,1	4,9E-03
RADIAL Sh	Radial - Sh x Meyer	99,8	1,0	7,7E-04
	Radial - Sh x Stimplan	210,0	1,0	2,9E-03
KGD	KGD x Meyer	32,3	1,2	4,3E-05
	KGD x Stimplan	203,9	0,8	4,5E-03
PKN	PKN x Meyer	50,3	0,3	3,7E-04
	PKN x Stimplan	246,2	0,1	6,4E-03
<b>Melhor previsão - MEYER:</b>		<b>Radial Canh</b>	PKN	KGD
<b>Melhor previsão - Stimplan:</b>		<b>Radial Canh</b>	PKN	Radial Sh

Tabela 5.15 – Comparação entre os índices dos modelos desenvolvidos com os obtidos nos simuladores comerciais para o *fracpack G*.

De acordo com a tabela 5.15, não houve um modelo que fez a melhor previsão das respostas dos simuladores. Segundo os critérios estabelecidos, caso cada índice indicasse um modelo diferente, seria escolhido aquele indicado pelo raio da fratura, que nesse caso foi o modelo desenvolvido com a geometria radial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. Observando a figura 5.153, que compara os índices dos modelos para cada geometria com os resultados do simulador Meyer, nota-se que, considerando os erros quadráticos em conjunto, o modelo desenvolvido com a geometria radial com iniciação da fratura no intervalo canhoneado se destaca positivamente em relação aos outros modelos. Já analisando a figura 5.154, que compara os índices dos modelos para cada geometria com os resultados do simulador Stimplan, o destaque da geometria radial com iniciação da fratura no intervalo canhoneado não é tão grande, sendo maior no índice do raio da fratura. Vale ressaltar que em ambos os gráficos o erro quadrático relativo à concentração no poço foi multiplicado por 10 e o erro quadrático relativo ao índice geométrico por  $10^5$  em função da escala do gráfico. Os resultados das estimativas feitas pelo melhor modelo desenvolvido e pelos simuladores comerciais estão apresentados nas figuras 5.155 a 5.158.

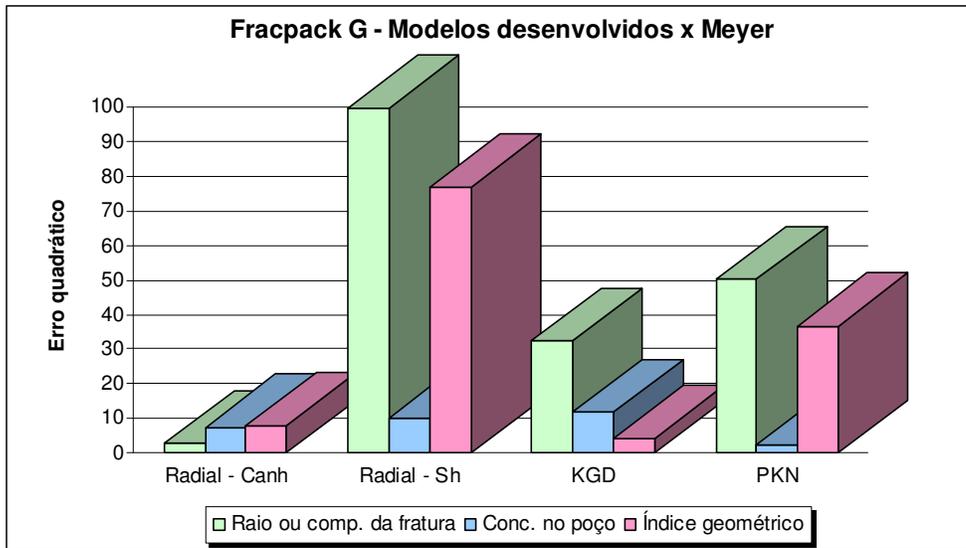


Figura 5.153 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador MFrac (Meyer) para o *fracpack G*.

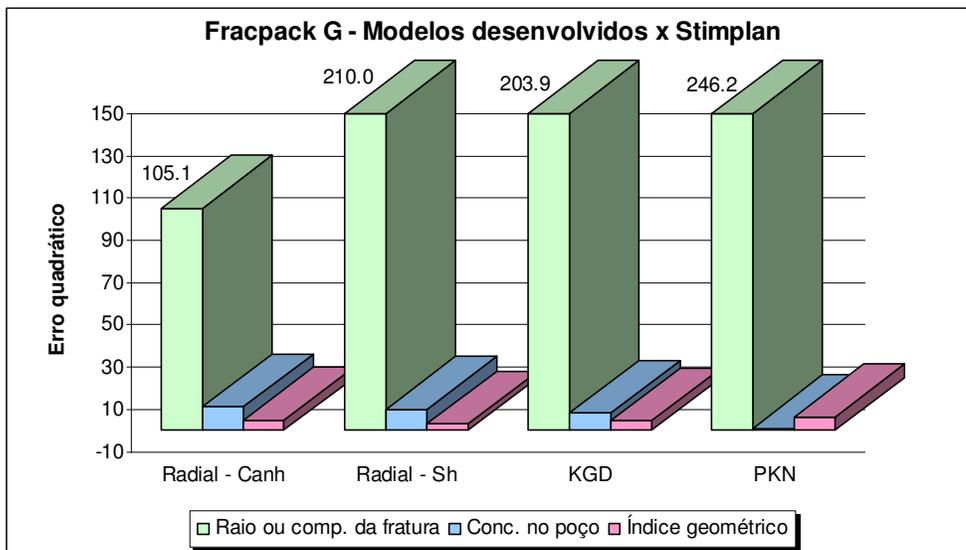


Figura 5.154 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador Stimplan para o *fracpack G*.

Analisando o gráfico de concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura, figura 5.155, nota-se uma diferença na concentração no poço de aproximadamente  $1,0 \text{ lb/ft}^2$  entre o resultado do modelo desenvolvido e as respostas dos simuladores, no entanto, pode-se observar que todas as curvas iniciam seu declínio num raio semelhante, em torno de 10 m. Já com relação ao raio final, o modelo desenvolvido estimou um valor que ficou entre os raios previstos pelos simuladores Meyer e Stimplan.

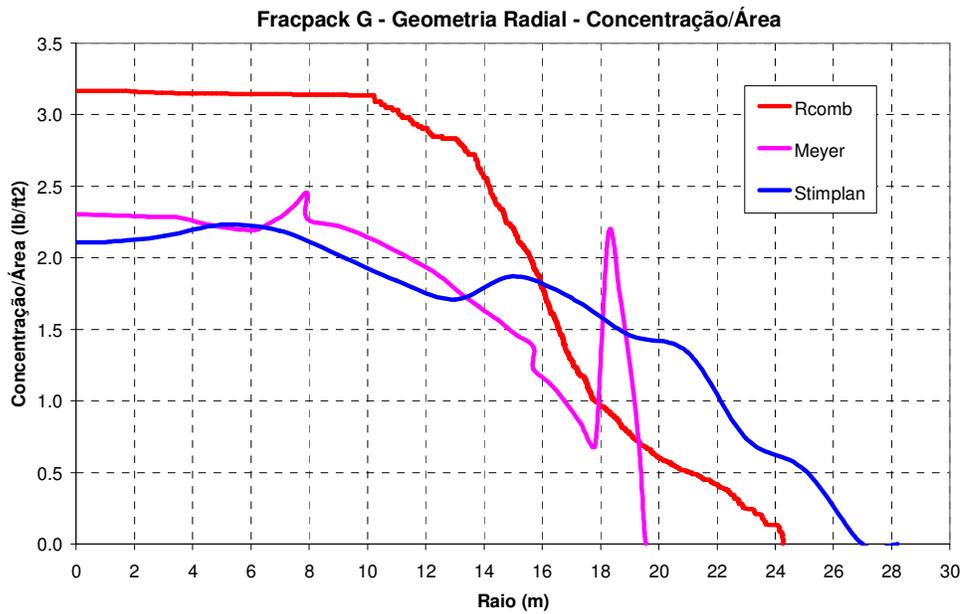


Figura 5.155 – Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura ao final do bombeio do *fracpack G*.

Observando a figura 5.156, que apresenta o gráfico de propagação do raio da fratura ao longo do tempo, nota-se que a curva estimada pelo modelo desenvolvido ficou entre as respostas dos simuladores, estando mais próxima do resultado apresentado pelo Meyer. Apesar do início do empacotamento ocorrer 3,5 min antes no modelo desenvolvido, o raio de empacotamento avaliado pela linha de tendência polinomial apresentou um bom resultado na comparação com o simulador Meyer, ficando, porém, bem distante da resposta obtida com o simulador Stimplan.

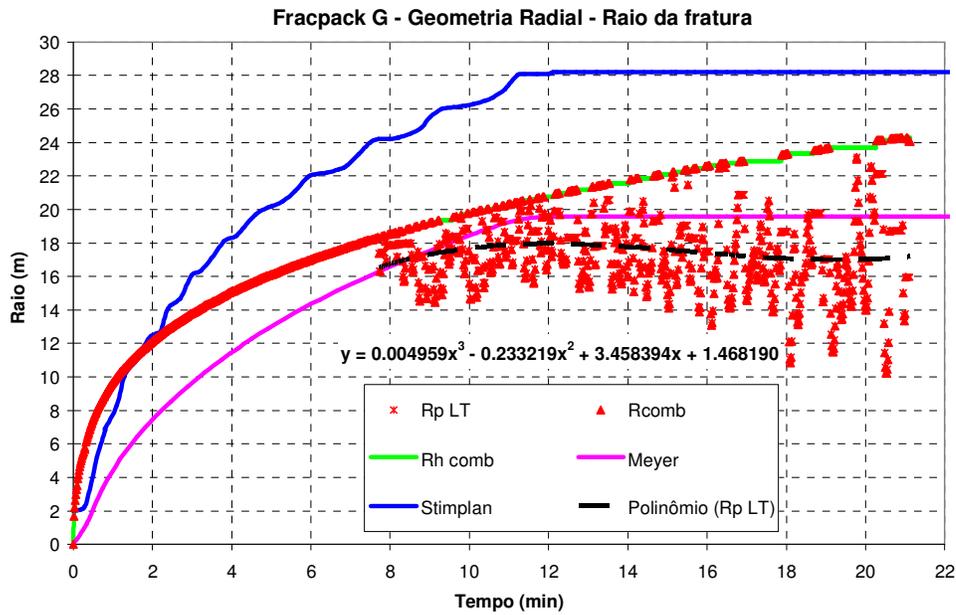


Figura 5.156 – Raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack G*.

A figura 5.157 apresenta a previsão do comportamento da abertura da fratura ao longo do tempo. Até o instante de 8 min, antes do início dos empacotamentos, o modelo desenvolvido fez uma boa previsão da abertura da fratura. Com o período dos empacotamentos iniciando um pouco antes no modelo desenvolvido, é possível observar que a abertura começa a aumentar antes das aberturas estimadas pelos simuladores. Como parte dos resultados ficou dentro da envoltória de respostas do simulador Meyer e parte ficou um pouco superior, a linha de tendência linear utilizada indicou uma abertura próxima da máxima prevista pelo Meyer.

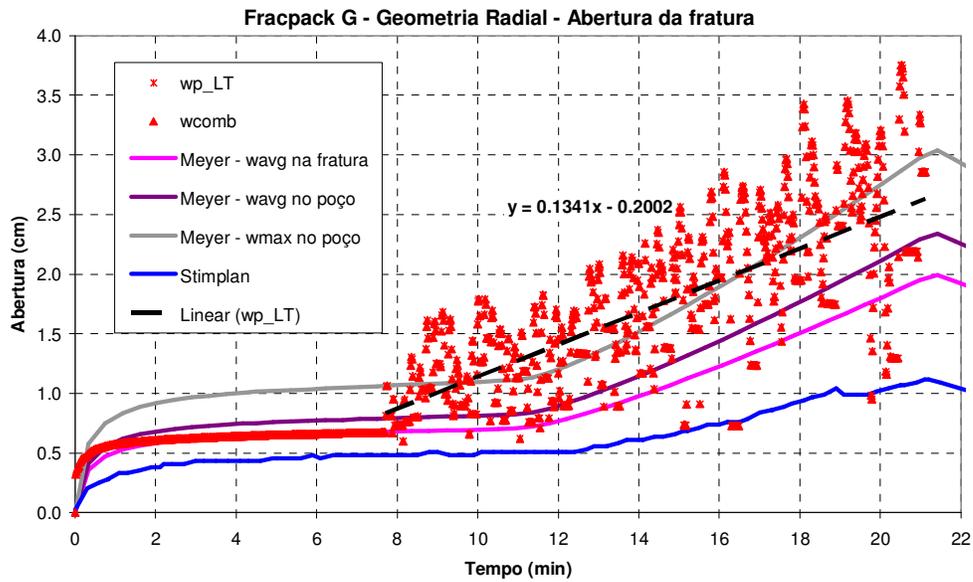


Figura 5.157 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack G*.

Na estimativa da eficiência, figura 5.158, nota-se novamente que o modelo desenvolvido fez uma boa previsão até aproximadamente 8 min, apresentando uma curva bem semelhante à resposta do simulador Meyer. Com o início dos empacotamentos o modelo desenvolvido, através da linha de tendência linear, apresentou uma eficiência quase constante ao longo do tempo, enquanto que as curvas dos simuladores começam um pouco abaixo da resposta do modelo, e apresentam um pequeno incremento ao longo do tempo, permanecendo ao final do bombeio um pouco superior à resposta do modelo desenvolvido, no caso do Meyer, e bem próxima ao modelo desenvolvido, no caso do Stimplan.

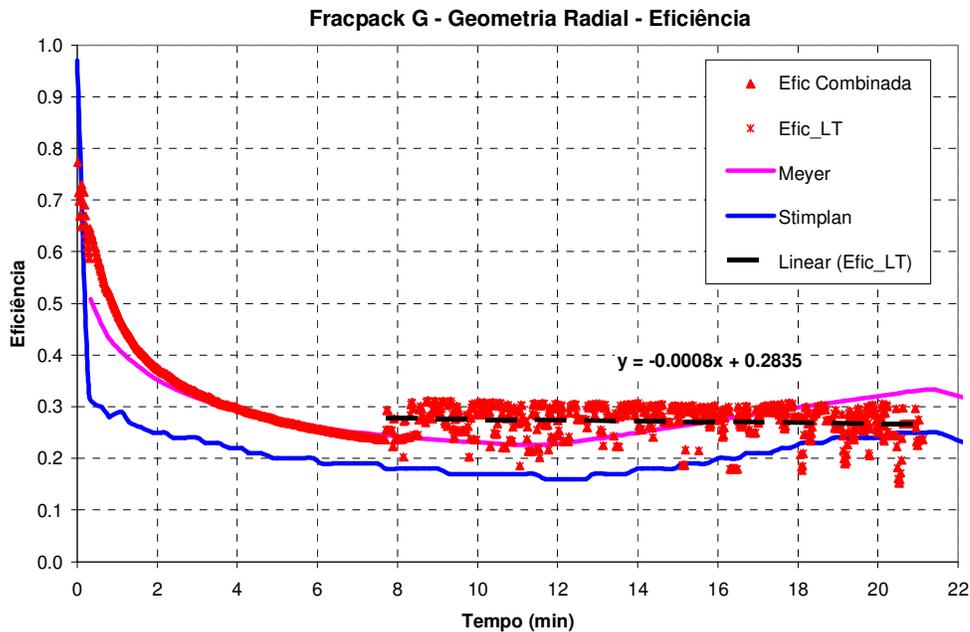


Figura 5.158 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack G*.

### 5.11.3. Evolução do modelo de Valkó & Oligney

Os gráficos nas figuras 5.159 a 5.162 apresentam os resultados dos ajustes efetuados no modelo original de Valkó & Oligney, e os compara ao modelo combinado desenvolvido com a geometria radial considerando a iniciação da fratura no intervalo canhoneado e também às respostas dos simuladores comerciais.

A figura 5.159 apresenta a evolução do modelo de Valkó & Oligney na curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura. A seta azul indica a evolução obtida na curva referente ao raio de empacotamento, sendo seu ponto de partida a curva estimada com o modelo original e seu ponto de chegada a curva obtida com o modelo desenvolvido, mostrando a aproximação do modelo às respostas dos simuladores. As setas verdes indicam a evolução dos raios hidráulicos, que convergem na direção da resposta obtida com o modelo combinado, que utiliza o balanço de massa de Carter como modelo de propagação. Conforme já mencionado, esta melhoria no raio hidráulico apresenta grande impacto nos resultados encontrados para a abertura e para a eficiência da fratura, como será visto nas figuras 5.161 e 5.162.

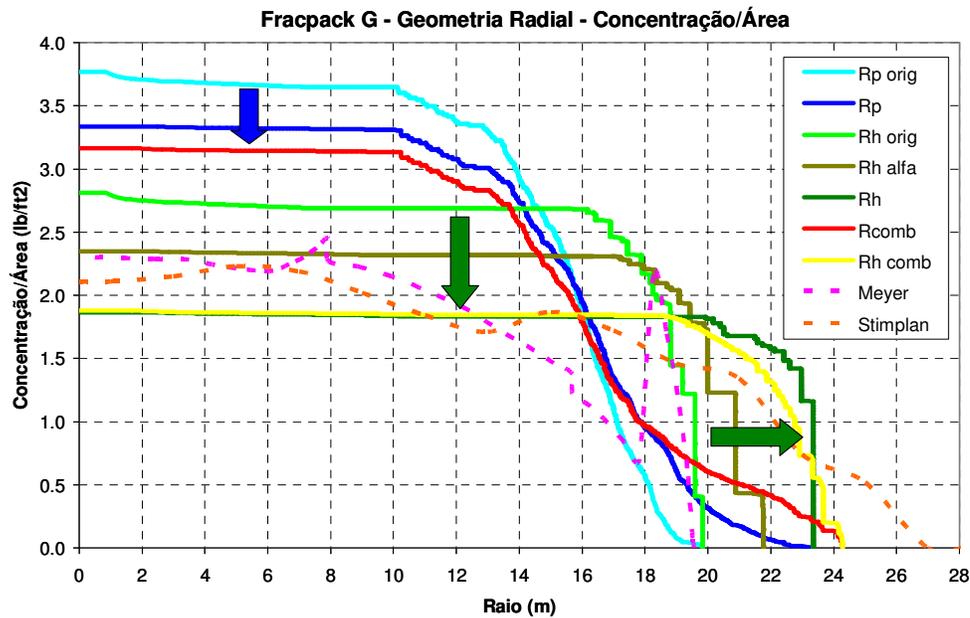


Figura 5.159 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura para o *fracpack G*.

Com relação à propagação do raio da fratura ao longo do tempo, a figura 5.160 apresenta apenas os raios hidráulicos dos modelos de Valkó & Oligney, original e final, e do modelo combinado, lembrando que estes são o limite superior dos raios de empacotamento. Os ajustes realizados no modelo de Valkó & Oligney mostram um aumento no raio hidráulico, aproximando um pouco mais a curva do modelo aos resultados obtidos com o Stimplan. Já com relação ao simulador Meyer, a curva do modelo original de Valkó & Oligney apresenta uma boa semelhança com as respostas obtidas neste simulador, no entanto, o aumento do raio hidráulico após os ajustes permitiu que os raios de empacotamento ficassem mais próximos da curva do simulador do que os obtidos no modelo original.

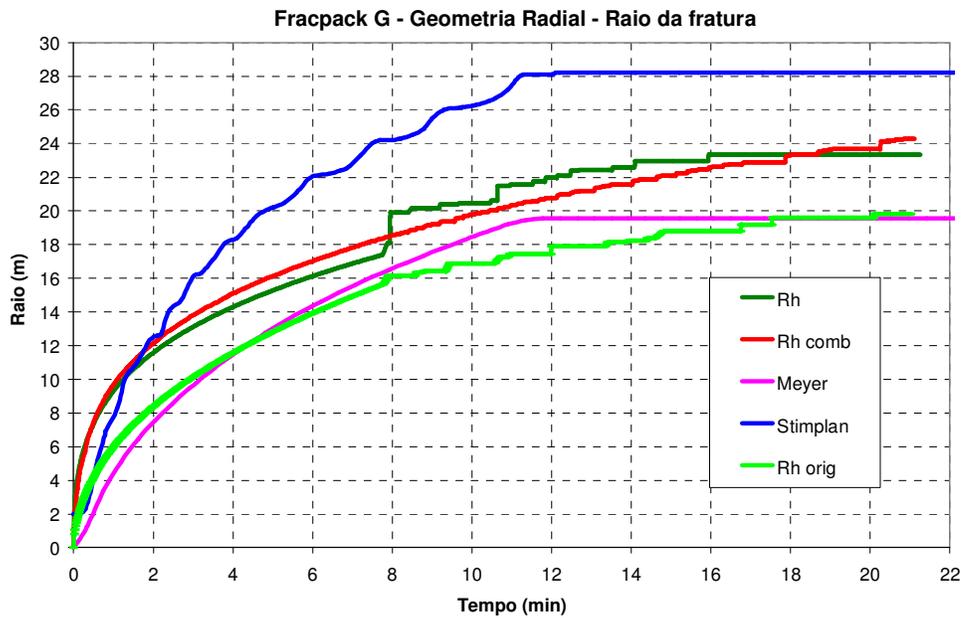


Figura 5.160 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão do raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack G*.

Conforme apresentado nos gráficos de evolução do modelo de Valkó & Oligney referentes à abertura da fratura, a figura 5.161 mostra que no modelo original os resultados de abertura obtidos, representados por bolinhas na cor verde-clara, são bem superiores às aberturas calculadas com o modelo final e também às curvas de abertura dos simuladores, confirmando o efeito positivo dos ajustes realizados no modelo. Representada por quadrados azuis, a figura mostra também a abertura calculada com o modelo final de Valkó & Oligney utilizando, no entanto, a área empacotada da fratura. Nota-se que esta abertura apresenta valores ainda maiores que os calculados pelo modelo original que utiliza a área hidráulica da fratura, confirmando mais uma vez a indicação desta área para o cálculo deste parâmetro.

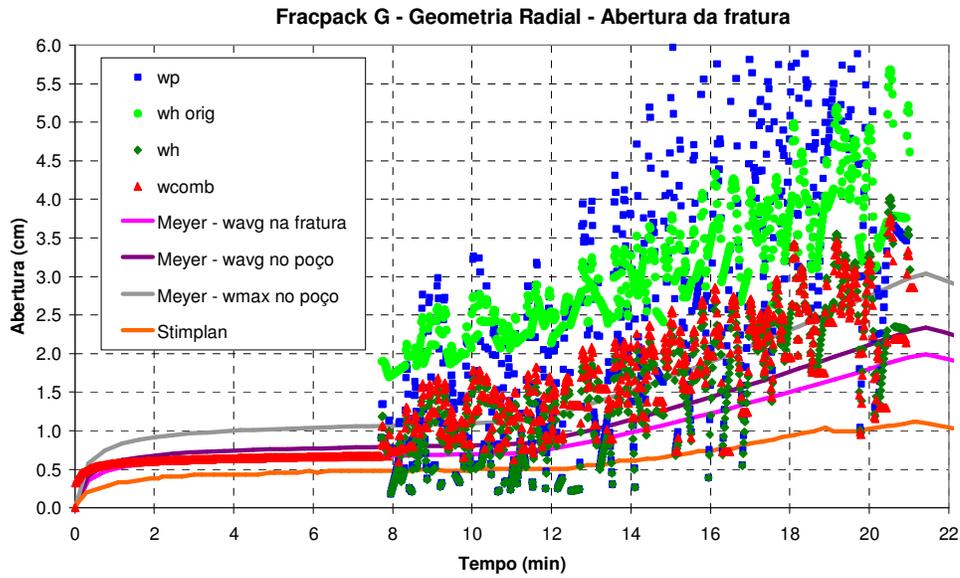


Figura 5.161 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack G*.

Conforme apresentado nos gráficos de evolução do modelo de Valkó & Oligney referentes à eficiência da fratura, a figura 5.162 mostra que no modelo original de Valkó & Oligney os valores de eficiência, representados por bolinhas na cor azul clara, são bem superiores às eficiências calculadas com o modelo final de Valkó & Oligney e com o modelo combinado desenvolvido, sendo também superior às curvas de eficiência dos simuladores, confirmando o efeito positivo dos ajustes realizados no modelo.

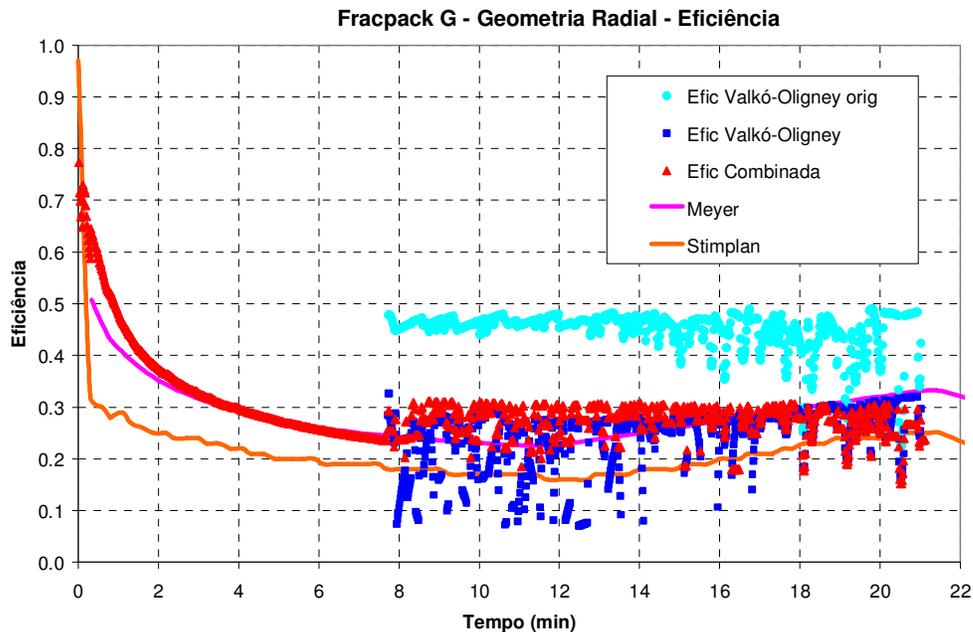


Figura 5.162 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da eficiência da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack G*.

## 5.12.

### ***Fracpack H***

Esta operação foi executada em lâmina d' água de 1340 m, em um arenito cujo topo encontra-se na profundidade de 3200 m, apresentando 17,2 m de espessura e 12 m de intervalo canhoneado. A permeabilidade estimada para a formação é de 750 mD, seu módulo de elasticidade é de  $1,9 \times 10^6$  psi ( $1,31 \times 10^4$  MPa) e seu coeficiente de Poisson é 0,16. A temperatura na superfície foi estimada em 23°C enquanto a temperatura no reservatório é de 74°C. O fluido utilizado no tratamento possui uma carga polimérica de 40 lb/Mgal e, utilizando a média das temperaturas da superfície e do reservatório, foram escolhidos os parâmetros reológicos do fluido do tratamento a serem utilizados no modelo, sendo estes:  $n$  igual a 0,8156 e  $K$  igual a  $0,0782 \text{ lbf.s}^n/\text{ft}^2$ . O agente de sustentação bombeado foi cerâmica leve, sendo sua massa específica igual a  $2,71 \text{ g/cm}^3$ .

### 5.12.1.

#### **Calibração do modelo**

### 5.12.1.1. Iniciação da fratura no intervalo canhoneado

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador comercial na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, no qual foi obtido o coeficiente de filtração igual a  $0,02 \text{ ft}/\text{min}^{1/2}$ . A figura 5.163 mostra as curvas de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* comercial após a calibração do modelo para a condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. Já a figura 5.164 apresenta a geometria final estimada para a fratura nesta mesma condição, com um comprimento de 22,5 m e altura de 24 m, além do perfil litológico e de tensões.

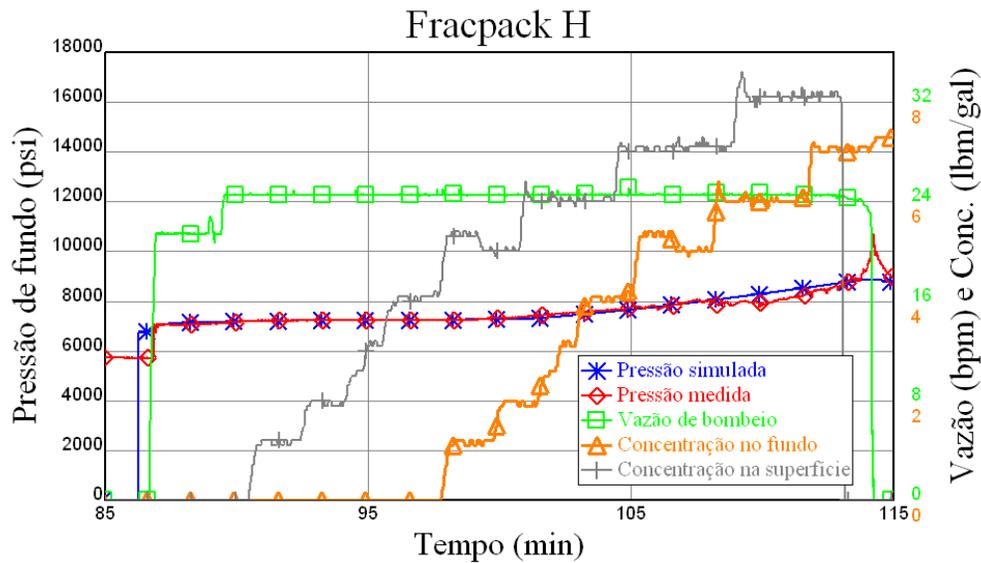


Figura 5.163 – Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack H* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

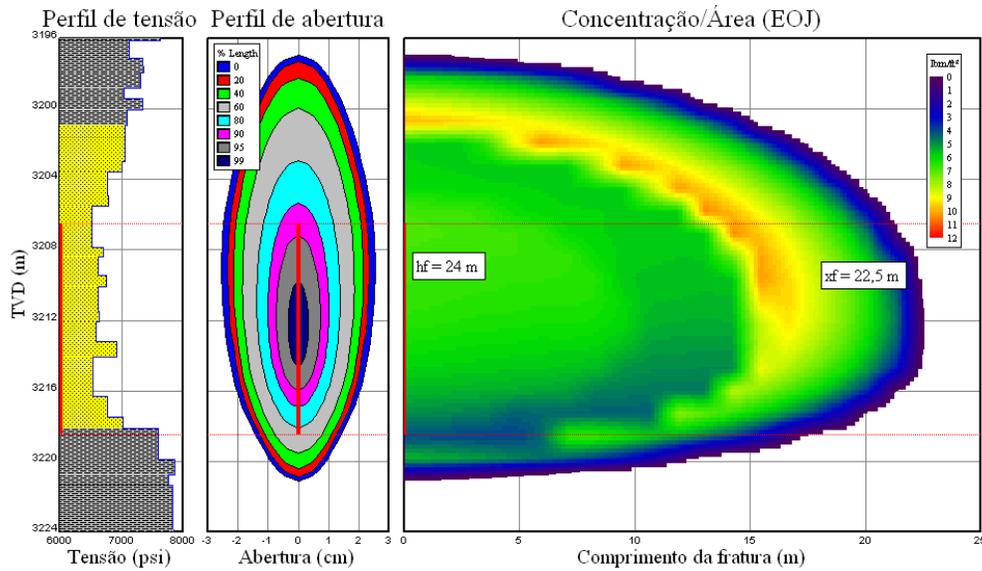


Figura 5.164 – Simulação da fratura executada no *fracpack H* no *software Meyer* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software MFrac*, foi feita uma simulação no *software Stimplan* na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado. A figura 5.165 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo *Stimplan* e a figura 5.166 mostra a geometria final da fratura estimada pelo *software 3D* nesta mesma condição, que apresentou um comprimento de aproximadamente 28 m e altura de 91 m. Apesar de a curva simulada ter apresentado uma pressão líquida um pouco menor que a medida, a simulação foi considerada válida e será utilizada para comparação com os resultados obtidos nos modelos desenvolvidos.

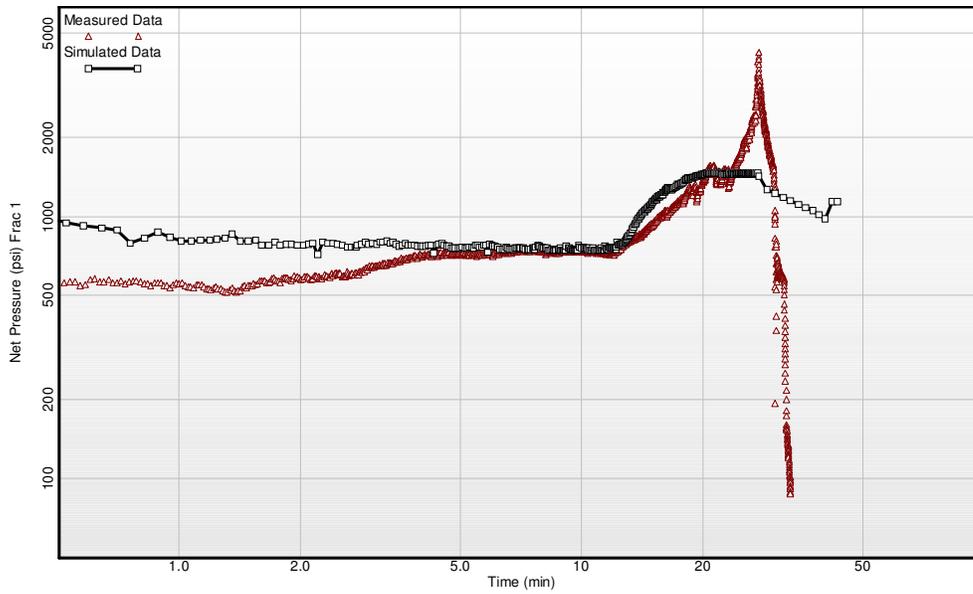


Figura 5.165 – Simulação do *fracpack H* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

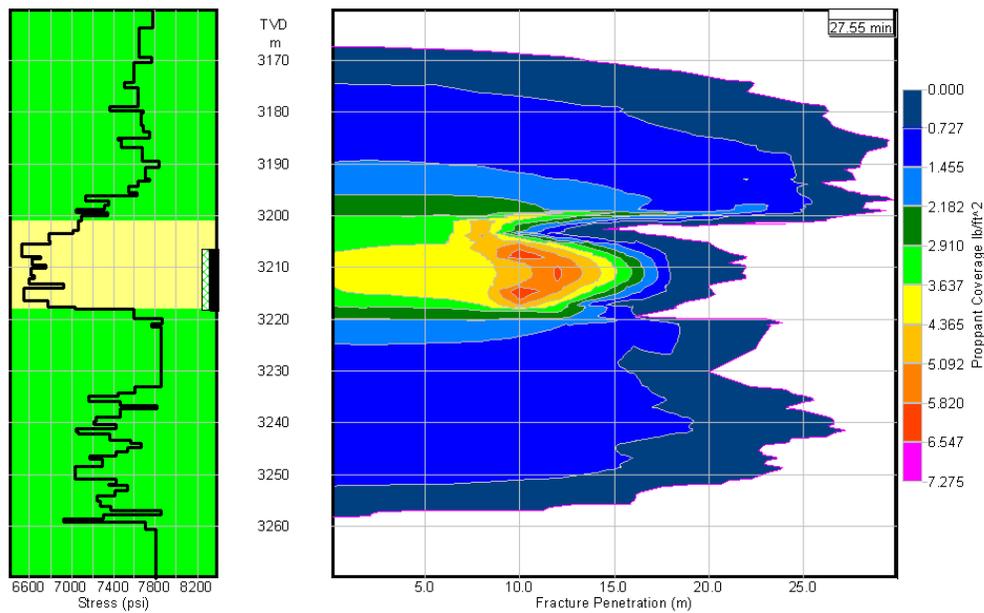


Figura 5.166 – Estimativa da fratura executada no *fracpack H* através da simulação utilizando o *software* Stimplan considerando a iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

### 5.12.1.2. Iniciação da fratura na menor tensão

Com os dados do tratamento foi realizado o ajuste de pressão no simulador MFrac na condição de iniciação da fratura na menor tensão, no qual foi obtido o coeficiente de filtração igual a  $0,018 \text{ ft/min}^{1/2}$ . A figura 5.167 mostra a curva de pressão de fundo, vazão e concentração do agente de sustentação registradas em campo e também a curva de pressão de fundo simulada no *software* MFrac após a calibração do modelo para esta condição. Já a figura 5.168 apresenta a geometria final estimada para a fratura com um comprimento de aproximadamente 25 m e altura de 23 m, além do perfil litológico e de tensões.

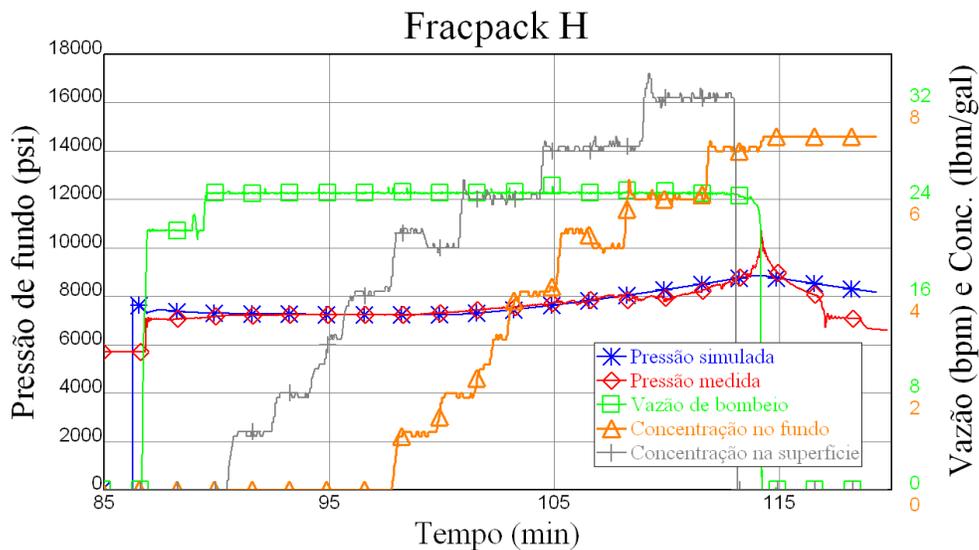


Figura 5.167– Registros de campo e ajuste de pressão do *fracpack H* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

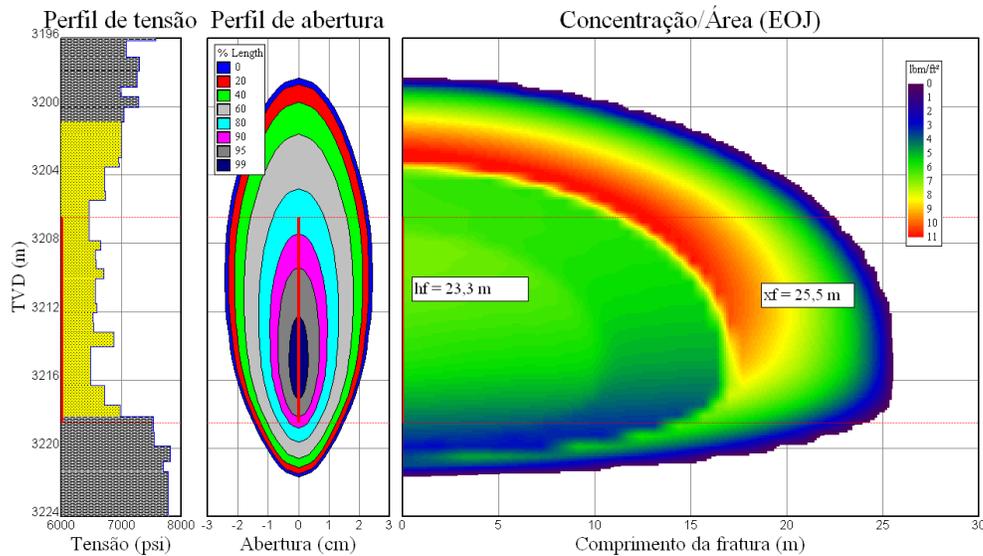


Figura 5.168– Simulação da fratura executada no *fracpack H* no *software Meyer* na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Utilizando os dados obtidos no ajuste de pressão com o *software MFrac*, foi feita uma simulação no *software Stimplan* considerando a condição de iniciação da fratura na menor tensão. A figura 5.169 apresenta a pressão líquida medida no campo e a pressão líquida simulada pelo *Stimplan* e a figura 5.170 mostra a geometria final da fratura estimada nesta mesma condição, que apresentou um comprimento de aproximadamente 28 m e altura de 86 m. Como pode ser observado no gráfico da figura 5.169, assim como na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado, a pressão simulada pelo modelo utilizando o simulador *Stimplan* foi um pouco menor que a pressão registrada na operação, mesmo assim seus resultados foram considerados válidos e serão utilizados na comparação com as respostas obtidas nos modelos desenvolvidos.

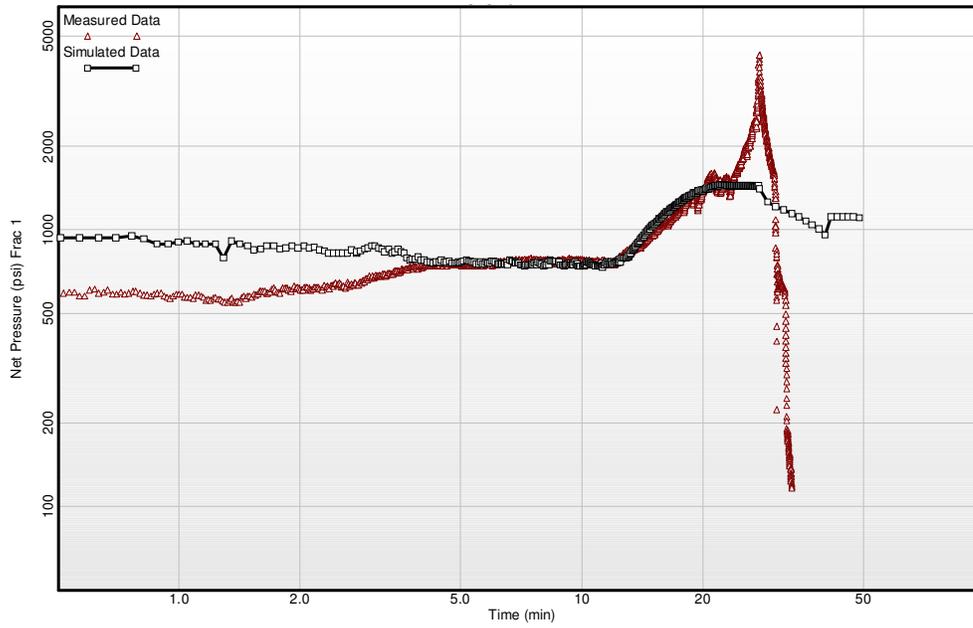


Figura 5.169 – Simulação do *fracpack H* no *software* Stimplan na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812201/CA

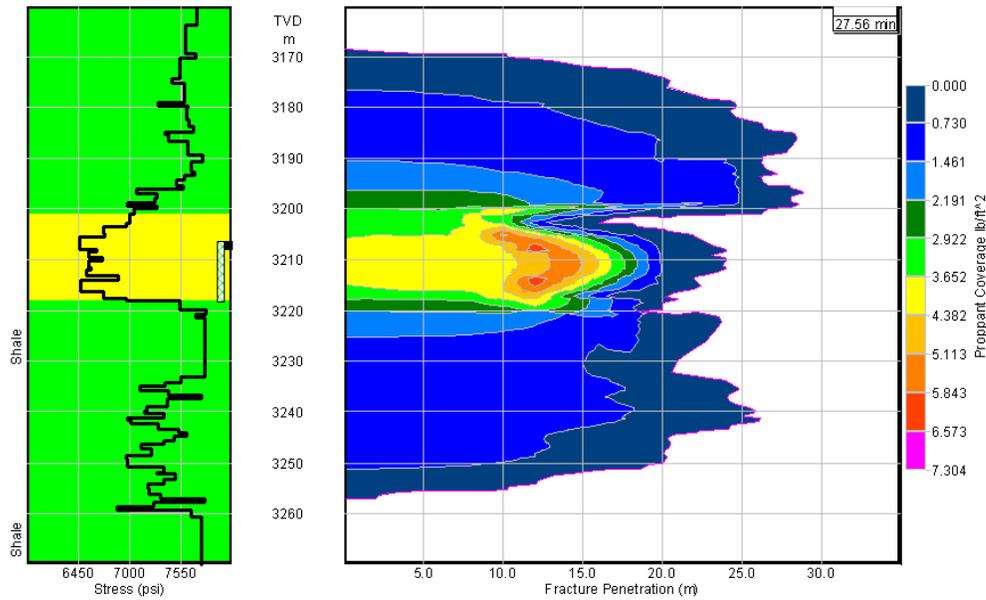


Figura 5.170 – Estimativa da fratura executada no *fracpack H* através da simulação utilizando o *software* Stimplan considerando a iniciação da fratura na menor tensão.

### 5.12.2. Resultados e escolha do melhor modelo

Utilizando os dados do declínio de pressão do minifrac foi possível definir o tempo de fechamento da fratura no declínio sendo este igual a 2,6 min. Desta forma foi obtida uma eficiência do minifrac em torno de 20% e conseqüentemente os expoentes  $\alpha$  estimados para cada geometria foram: 0,57 para a geometria radial, 0,53 para a geometria KGD e 0,56 para a geometria PKN. Com estas informações e conhecendo-se o coeficiente de filtração é possível utilizar o modelo desenvolvido para analisar e interpretar a curva de pressão de fundo registrada durante a operação de *fracpack*. A tabela 5.16 e as figuras, 5.171 e 5.172, apresentam um resumo dos resultados obtidos com os modelos desenvolvidos e com os simuladores comerciais. Cabe ressaltar que nas geometrias PKN e KGD a altura da fratura foi assumida como igual espessura do reservatório.

Fracpack H - Resultados						
Modelo		R ou xf final	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	w médio final	eficiência final
		(m)	(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm)	(%)
Desenvolvido	Radial - Canh	17,8	14,4	9,5	5,52	24,3
	Radial - Sh	18,7	15,0	9,0	5,34	24,7
	KGD	28,4	16,8	11,5	6,79	23,1
	PKN	28,8	18,5	10,7	6,10	22,6
Simuladores Comerciais	Meyer - Canh	22,5	22,5	6,3	3,20	26,8
	Meyer - Sh	25,5	25,5	6,0	2,90	26,7
	Stimplan - Canh	28,0	28,0	3,6	1,02	34,0
	Stimplan - Sh	28,0	28,0	3,7	1,04	34,0

Tabela 5.16 – Resumo dos resultados obtidos a partir da interpretação dos registros do *fracpack H*.

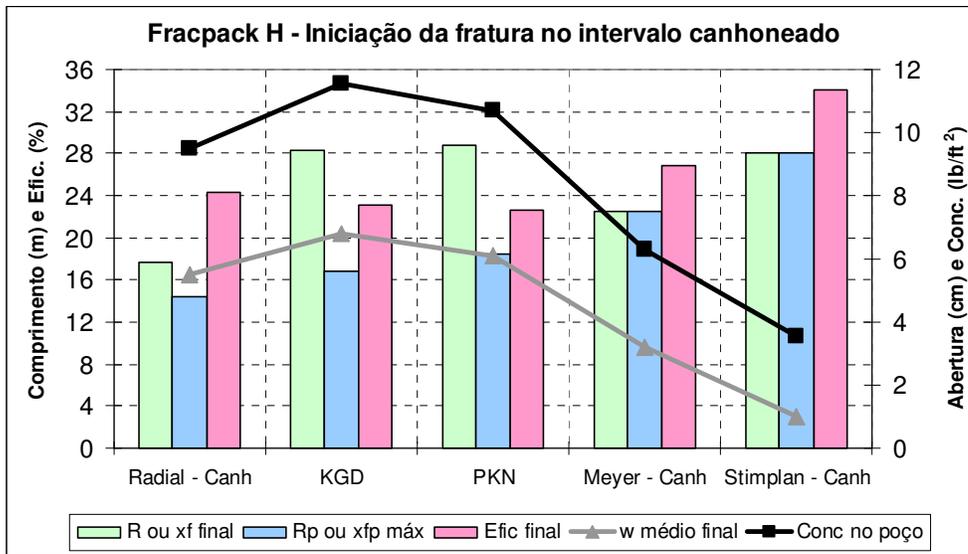


Figura 5.171 – Resultados obtidos para o *fracpack H* com os modelos desenvolvidos e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado.

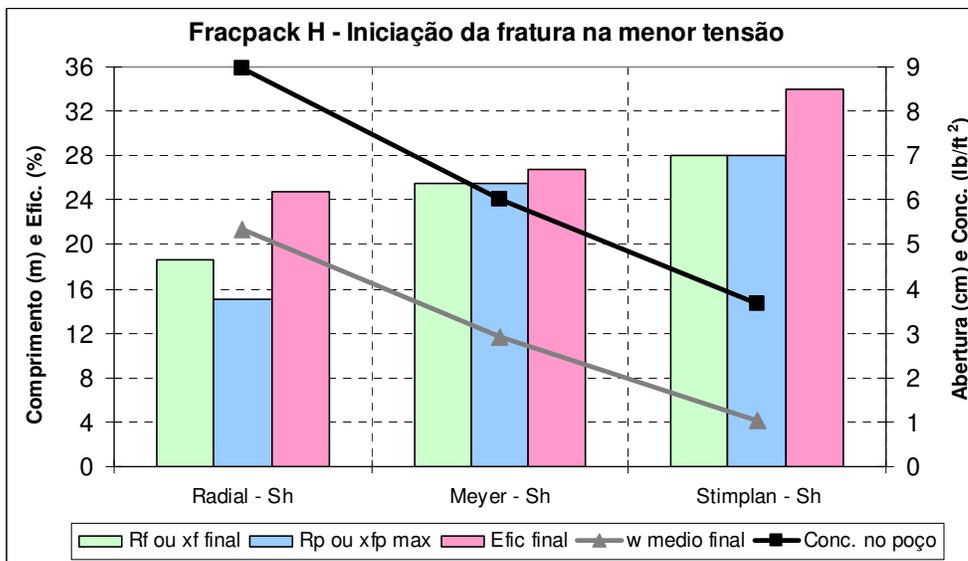


Figura 5.172 – Resultados obtidos para o *fracpack H* com o modelo desenvolvido e os simuladores comerciais na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

Para a definição do melhor modelo de previsão dos resultados obtidos nos simuladores comerciais foi realizada uma análise de erros utilizando a diferença quadrada entre os índices definidos previamente. A tabela 5.17 apresenta esta comparação, ressaltando-se que os resultados dos modelos: Radial-canhoneado, KGD e PKN foram comparados aos resultados dos simuladores na condição de iniciação da fratura no intervalo canhoneado e os resultados do

modelo Radial-Sh foram comparados aos obtidos na condição de iniciação da fratura na menor tensão.

<b>Fracpack H - Comparação entre os índices - Diferença quadrada</b>				
Modelo	Modelo desenvolvido x Simulador comercial	Rp ou xfp máximo	Conc. no poço	Índice geométrico
		(m)	(lb/ft <sup>2</sup> )	(cm/m)
RADIAL Canh	Radial - Canh x Meyer	65,1	10,1	2,8E-02
	Radial - Canh x Stimplan	184,1	35,4	7,5E-02
RADIAL Sh	Radial - Sh x Meyer	109,6	8,6	3,0E-02
	Radial - Sh x Stimplan	168,2	28,1	6,2E-02
KGD	KGD x Meyer	32,9	27,1	9,3E-03
	KGD x Stimplan	126,3	63,7	4,1E-02
PKN	PKN x Meyer	16,0	19,0	4,8E-03
	PKN x Stimplan	90,3	50,8	3,1E-02
<b>Melhor previsão - MEYER:</b>		<b>PKN</b>	Radial Sh	<b>PKN</b>
<b>Melhor previsão - Stimplan:</b>		<b>PKN</b>	Radial Sh	<b>PKN</b>

Tabela 5.17 – Comparação entre os índices dos modelos desenvolvidos com os obtidos nos simuladores comerciais para o *fracpack H*.

De acordo com a tabela 5.17, a melhor previsão dos resultados tanto para o *software* MFrac (Meyer) quanto para o *software* Stimplan foi feita pelo modelo desenvolvido com a geometria PKN. Esta avaliação também é apresentada nas figuras, 5.173 e 5.174, onde o erro quadrático relativo ao índice geométrico foi multiplicado por um fator de 1000 em função da escala do gráfico. As figuras mostram que o modelo desenvolvido com a geometria PKN se destacou principalmente em função do índice relativo ao raio da fratura. Os resultados das estimativas feitas pelo melhor modelo desenvolvido e pelos simuladores comerciais estão apresentados nas figuras 5.175 a 5.178.

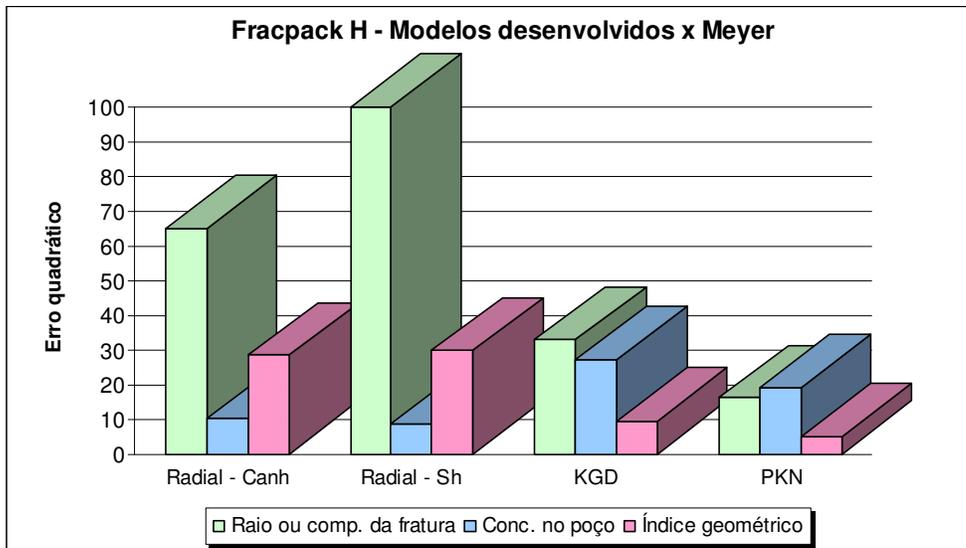


Figura 5.173 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador MFrac (Meyer) para o *fracpack H*.

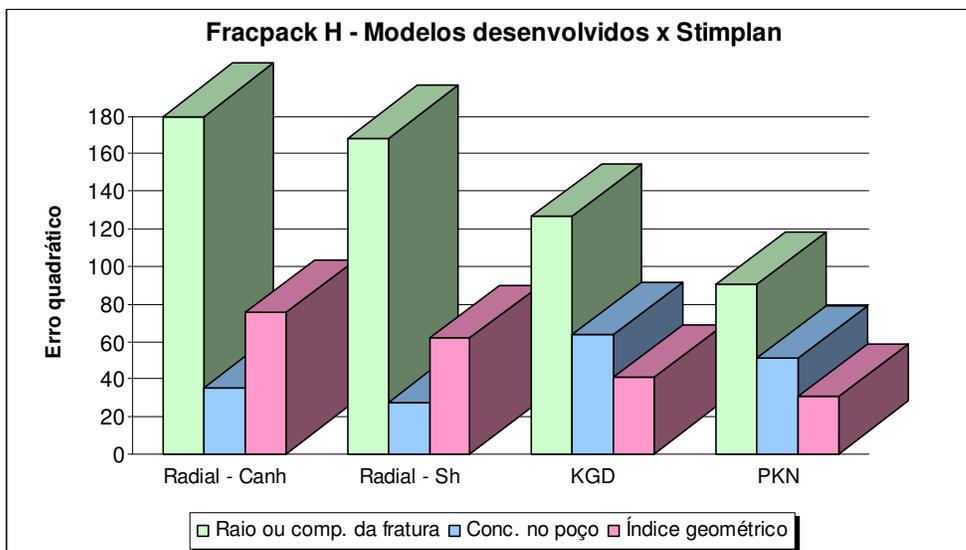


Figura 5.174 – Gráfico de barras com as diferenças quadradas entre os índices dos modelos desenvolvidos e os resultados do simulador Stimplan para o *fracpack H*.

Analisando o gráfico de concentração do agente de sustentação ao longo do comprimento da fratura, figura 5.175, nota-se que a geometria PKN estimou uma concentração no poço bem diferente das concentrações obtidas nos simuladores. Comparando este resultado com os outros modelos por meio das figuras 5.173 e 5.174, percebe-se que a geometria PKN não obteve uma boa resposta para este índice. No entanto, se forem consideradas as máximas concentrações, a resposta do modelo desenvolvido apresenta uma diferença de

apenas 0,70 lb/ft<sup>2</sup> em relação à resposta do simulador Meyer. Com relação à curva prevista pelo simulador Stimplan, nota-se uma distribuição de concentração bastante inferior a do simulador Meyer, podendo esta diferença ser atribuída ao rompimento das barreiras e conseqüente crescimento da fratura em altura, como foi observado nas figuras 5.166 e 5.170.

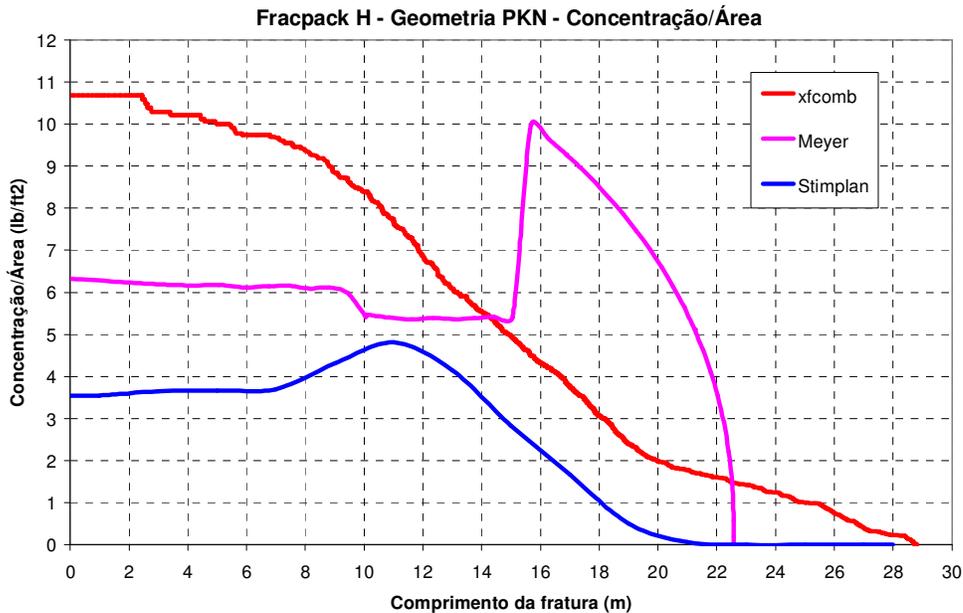


Figura 5.175 – Distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do comprimento da fratura ao final do bombeio do *fracpack H*.

Observando a figura 5.176, que apresenta o gráfico de propagação do comprimento da fratura ao longo do tempo, nota-se uma boa concordância da curva do comprimento hidráulico estimada pelo modelo desenvolvido com as respostas dos simuladores. Com relação ao comprimento de empacotamento, a linha de tendência polinomial utilizada apresenta um comportamento bastante interessante, principalmente quando comparada ao simulador Stimplan. No primeiro patamar apresentado pelos simuladores, em torno do comprimento de 22 m, é possível observar que o empacotamento do modelo desenvolvido se inicia no mesmo instante em que a propagação da fratura é bloqueada no simulador Stimplan e 3 min antes do bloqueio no simulador Meyer, apresentando ainda um comprimento de empacotamento próximo ao comprimento de fratura estimado pelos simuladores. Com o bloqueio da fratura nos dois simuladores, a linha de tendência sobre os pontos do modelo desenvolvido mostra uma redução no comprimento de empacotamento, empacotando a fratura em direção ao poço.

Do instante 18 min até 22 min, a fratura no simulador Stimplan volta a se propagar e, no modelo desenvolvido, esse período é acompanhado por uma linha de tendência constante. Após o instante 22 min, um novo bloqueio da fratura é previsto pelo simulador Stimplan no comprimento de 28 m e a linha de tendência no modelo desenvolvido inicia novamente o empacotamento da fratura na direção do poço.

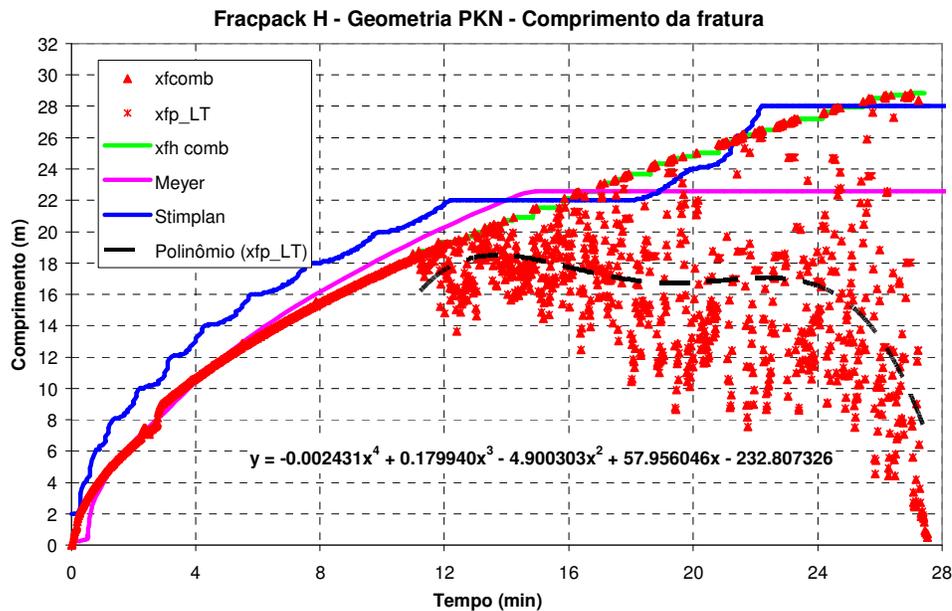


Figura 5.176 – Comprimento da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack H*.

A figura 5.177 apresenta a previsão do comportamento da abertura da fratura ao longo do tempo. Até o instante de 12 min, antes do início dos empacotamentos, o modelo desenvolvido fez uma boa previsão da abertura da fratura ao longo do tempo. A partir deste instante, quando a abertura da fratura começa a aumentar, a linha de tendência linear utilizada para representar os pontos registrados permanece superior às respostas obtidas com os simuladores comerciais, obtendo no final do bombeio uma abertura maior que a prevista pelo simulador Meyer em aproximadamente 3,0 cm, chegando ainda a uma diferença de 5,0 cm em relação ao simulador Stimplan. Esta grande diferença em relação ao *software* 3D pode ser atribuída ao rompimento das barreiras durante a propagação da fratura, sendo estimada uma abertura menor em função do crescimento da fratura em altura.

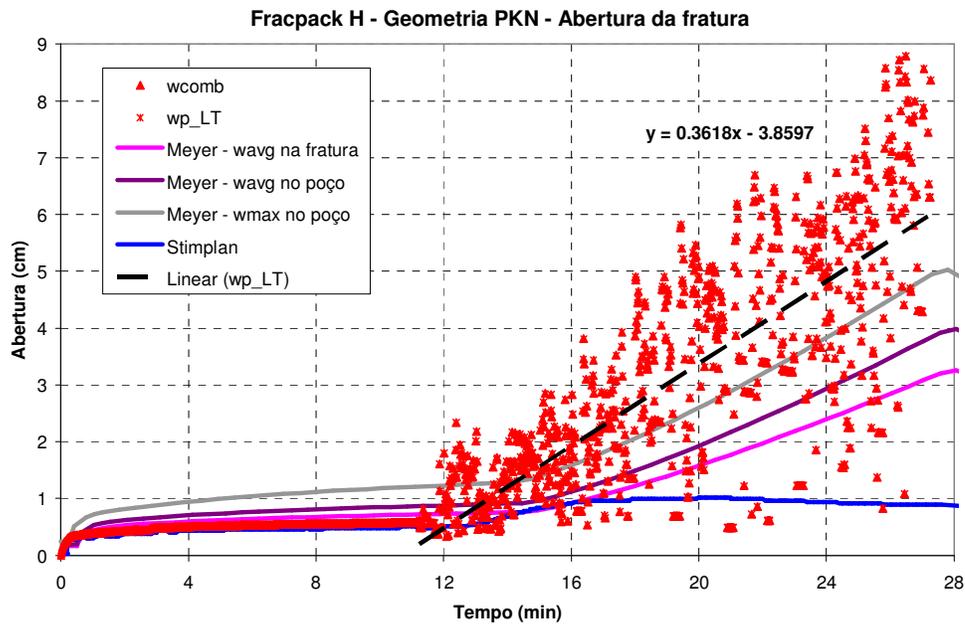


Figura 5.177 – Abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack H*.

Apesar da estimativa da eficiência pelo modelo desenvolvido, mostrada na figura 5.178, ter apresentado um valor no final do bombeio inferior aos valores previstos pelos simuladores, pode-se dizer que o modelo desenvolvido fez uma boa previsão, mostrando grande semelhança com os simuladores no período anterior aos empacotamentos e apresentando, mesmo que com menor intensidade, um crescimento da eficiência durante os empacotamentos assim como foi previsto pelos simuladores.

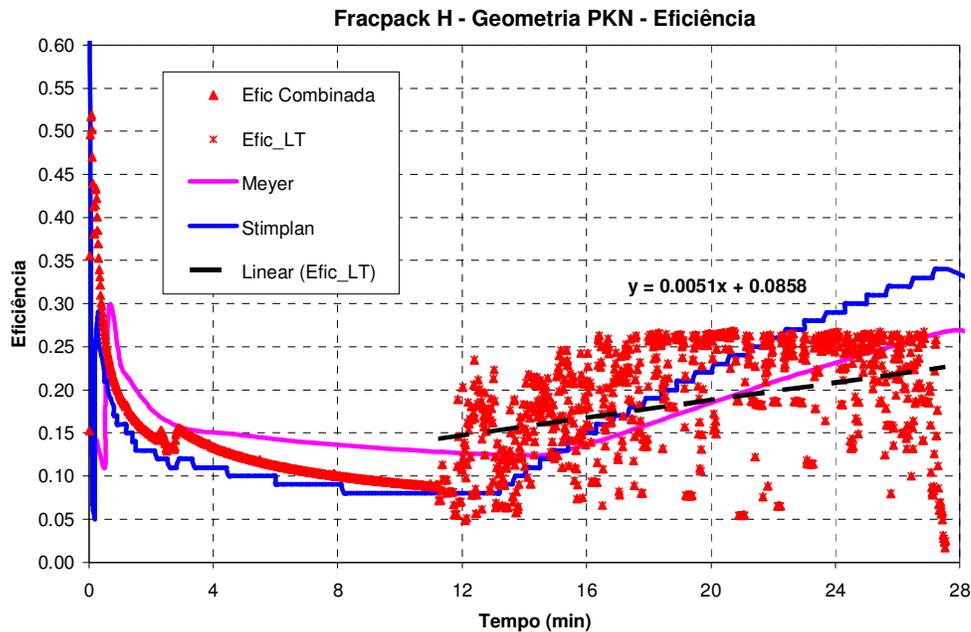


Figura 5.178 – Eficiência ao longo do tempo durante o *fracpack H*.

### 5.12.3. Evolução do modelo de Valkó & Oligney

Os gráficos nas figuras 5.179 a 5.182 apresentam os resultados dos ajustes efetuados no modelo original de Valkó & Oligney, e os compara ao modelo combinado desenvolvido e às respostas dos simuladores comerciais. Lembrando que o modelo original foi desenvolvido para a geometria radial de fratura, serão apresentados os resultados referentes a esta geometria que, no entanto, não foi considerada a melhor previsão das respostas dos simuladores para o *fracpack H*. De qualquer forma, será possível notar que as modificações elaboradas no modelo original aproximaram seus resultados dos obtidos pelos simuladores comerciais.

A figura 5.179 apresenta a evolução do modelo de Valkó & Oligney na curva de distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura. A seta azul indica a evolução obtida na curva referente ao raio de empacotamento, sendo seu ponto de partida a curva estimada com o modelo original e seu ponto de chegada a curva referente ao modelo final de Valkó & Oligney, o qual considera todas as sugestões propostas por este trabalho, se aproximando das respostas dos simuladores. As setas verdes indicam a evolução dos raios hidráulicos, que convergem na direção da resposta obtida com o modelo combinado, que utiliza o balanço de massa de Carter como

modelo de propagação. São apresentadas: a curva referente ao raio hidráulico estimado pelo modelo original, a curva referente ao raio hidráulico que contempla o expoente alfa calculado a partir do declínio de pressão do minifrac e a curva referente ao raio hidráulico final, que inclui também a alteração relativa à resolução da equação do terceiro grau. Conforme já mencionado, esta melhoria no raio hidráulico apresenta grande impacto nos resultados encontrados para a abertura e para a eficiência da fratura, como será visto nas figuras 5.181 e 5.182.

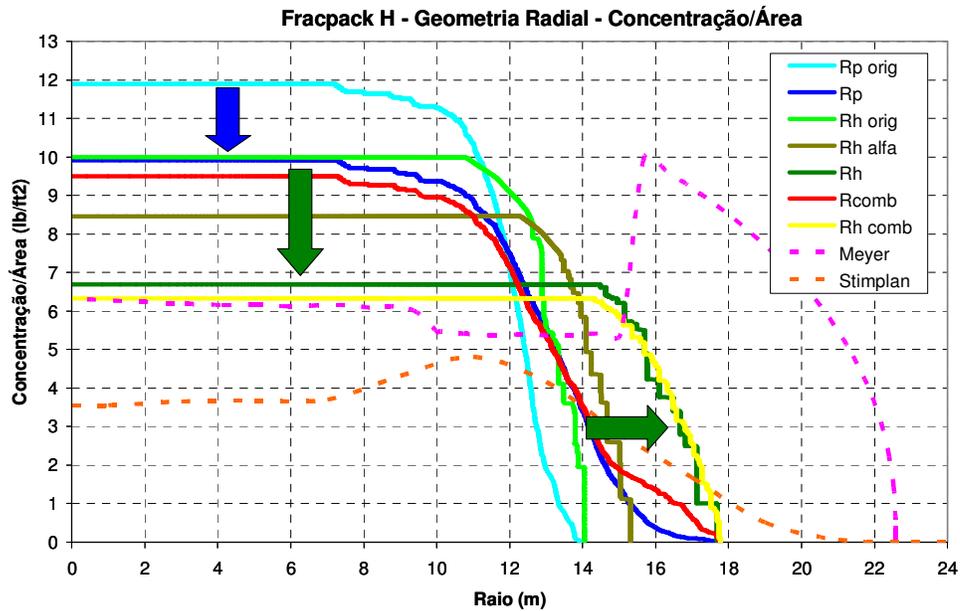


Figura 5.179 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da distribuição da concentração do agente de sustentação ao longo do raio da fratura para o *fracpack H*.

Com relação à propagação do raio da fratura ao longo do tempo, figura 5.180, observa-se o aumento do raio hidráulico em direção as respostas obtidas nos simuladores. Além disso, nota-se um início tardio dos empacotamentos no modelo original de Valkó & Oligney, sendo este corrigido no modelo final, já que coincide com a resposta do simulador Stimplan. Vale ressaltar que a resposta do modelo desenvolvido, mesmo após os ajustes, ainda ficou distante dos resultados obtidos com os simuladores, mostrando que a geometria radial não foi responsável pela melhor previsão.

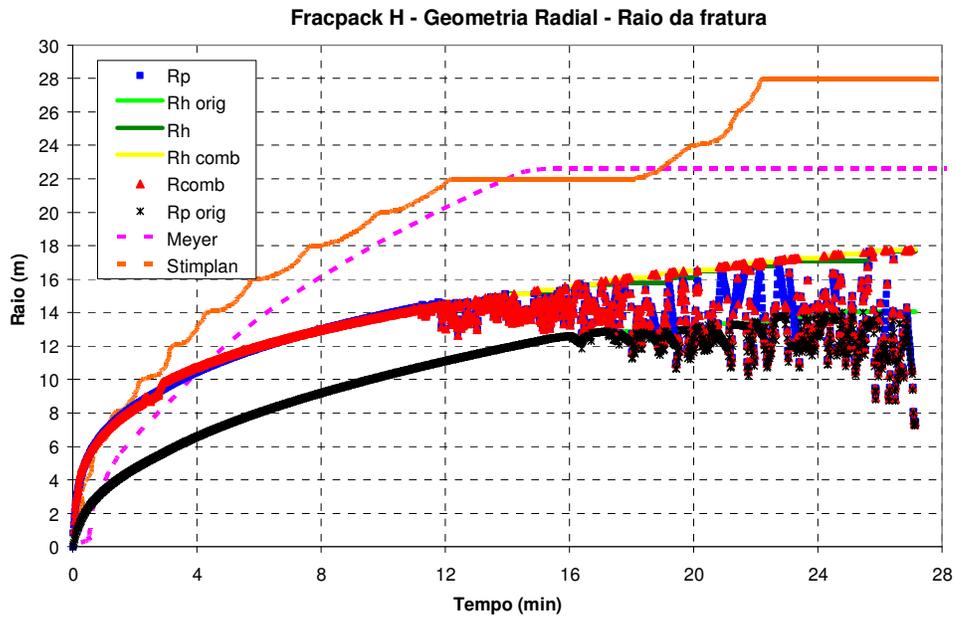


Figura 5.180 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão do raio da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack H*.

Apesar da curva de abertura ao longo do tempo do modelo final de Valkó & Oligney e do modelo combinado não terem ficado dentro da envoltória de respostas dos simuladores, figura 5.181, é possível notar que os ajustes realizados aproximaram o modelo de Valkó & Oligney desta envoltória. Esta aproximação pode ser vista comparando-se os pontos verde-claros, referentes ao modelo original, com os pontos verde-escuros, que representam o modelo final de Valkó & Oligney, com a envoltória de respostas dos simuladores.

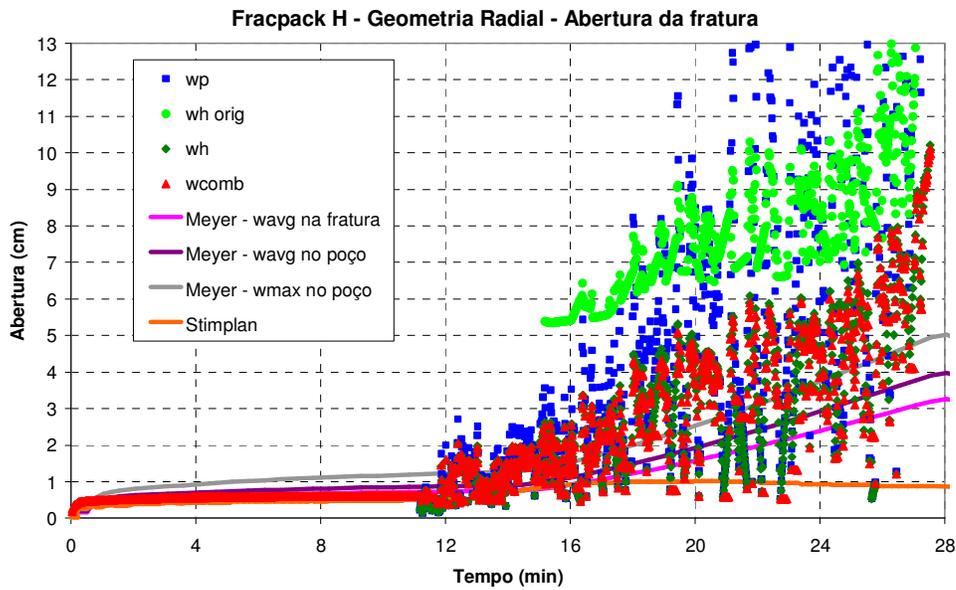


Figura 5.181 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da abertura da fratura ao longo do tempo durante o *fracpack H*.

Conforme apresentado nos gráficos de evolução do modelo de Valkó & Oligney referentes à eficiência da fratura, a figura 5.182 mostra que no modelo original de Valkó & Oligney os valores de eficiência, representados por bolinhas na cor azul clara, são bem superiores às eficiências calculadas com o modelo final de Valkó & Oligney e com o modelo combinado desenvolvido, sendo também superior às curvas de eficiência dos simuladores, confirmando o efeito positivo dos ajustes realizados no modelo.

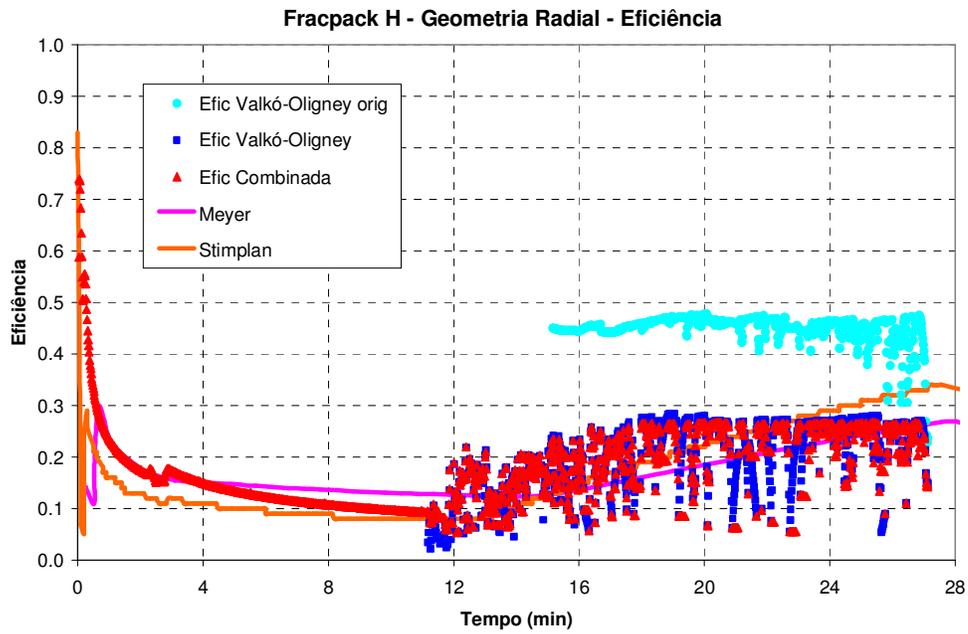


Figura 5.182 – Evolução do modelo de Valkó & Oligney na previsão da eficiência da fratura ao longo do tempo durante o fracpack H