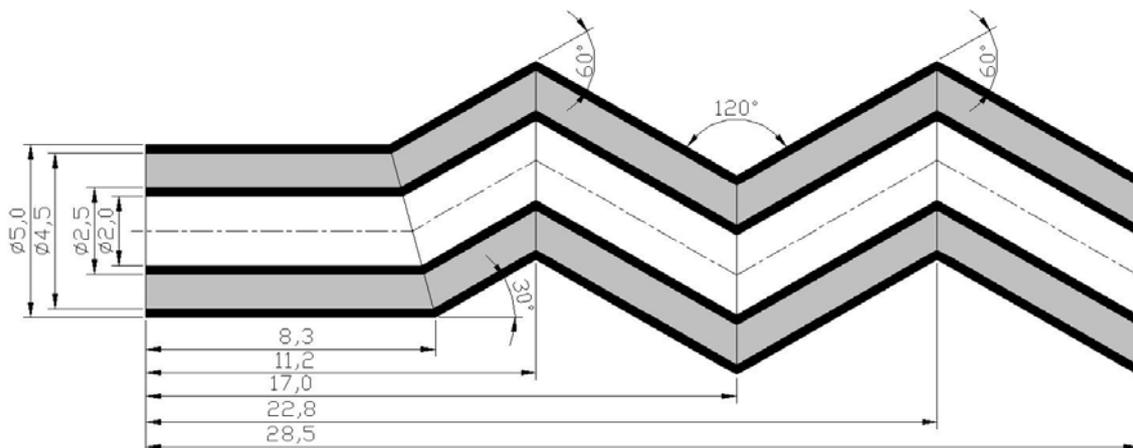


## 6 Resultados

Neste capítulo foram analisados os resultados das simulações tridimensionais, utilizando-se parâmetros adimensionais, para verificar os efeitos reológicos na eficiência do processo de deslocamento. Em uma fase posterior estes dados serão comparados com resultados experimentais a serem obtidos no Laboratório de Termociências da PUC-Rio.

Foi utilizada a mesma malha tridimensional dos testes para validação do tamanho da malha e do passo de tempo. Entretanto, foi utilizado um fator de escala para adimensionalizar o modelo, de forma que o comprimento característico tivesse dimensão igual a um ( $L_C = 1,0$ ), conforme Figura 6.1:



**Figura 6.1 – Modelo em ziguezague (área do escoamento em cinza)**

Foi analisado o escoamento de um fluido newtoniano deslocando um fluido não newtoniano, e vice-versa.

O escoamento foi analisado em três níveis de velocidade adimensional:

- $u^* = 0,1$
- $u^* = 1,0$
- $u^* = 10,0$

Foram considerados efeitos inerciais desprezíveis. Ou seja, a densidade dos fluidos foi determinada, considerando o número de Reynolds igual a 0,001 (eq. 6-1).

$$Re \equiv \frac{\rho v_c L_c}{\eta_c} \tag{6-1}$$

Substituindo os parâmetros adimensionais ( $L_c = 1,0$ ;  $\eta_c = 1,0$  e  $v_c = 10,0$ ) na eq. 6-1, obtém-se  $\rho = 0,0001$ . Este valor foi utilizado para ambos os fluidos.

O fluido newtoniano foi avaliado em três níveis de viscosidade (Tabela 6.1).

**Tabela 6.1 – Dados reológicos dos fluidos newtonianos**

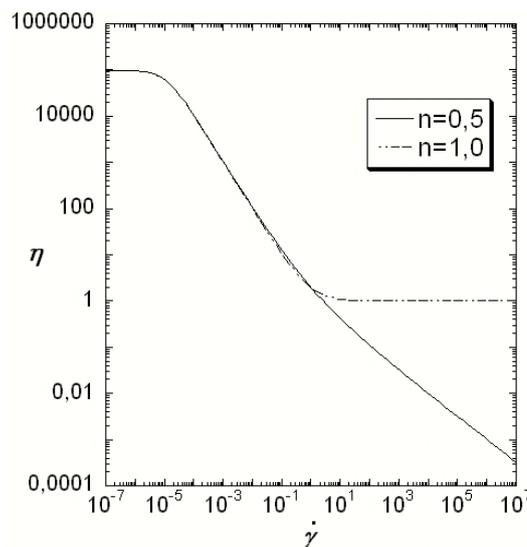
Fluido	$\eta$
N ( $\eta=0.1$ )	0,1
N ( $\eta=1.0$ )	1,0
N ( $\eta=10.0$ )	10,0

Os fluidos não newtonianos possuem as propriedades adimensionais conforme Tabela 6.2.

**Tabela 6.2 – Dados reológicos dos fluidos não newtonianos**

Fluido	$n$	$\tau_0$	$k$	$\eta_0$
NN (n 1.0)	1,0	1,0	1,0	100000
NN (n 0.5)	0,5	1,0	1,0	100000

Na Figura 6.2 estão representadas as características reológicas dos dois fluidos não newtonianos analisados.



**Figura 6.2 – Gráfico da viscosidade dos fluidos não newtonianos**

A partir destes parâmetros, foram determinados 36 casos de simulação.

- A avaliação quantitativa do deslocamento foi determinada a partir de gráficos de eficiência do deslocamento (volume percentual da fase deslocadora em função do tempo), analogamente ao processo descrito na seção 5.5.
- Além disso, a avaliação qualitativa do deslocamento foi realizada verificando-se o perfil da interface entre as fases 1 e 2, através de um modelo tridimensional, em *wireframe*, para três passos de tempo distintos.

### 6.1.

#### Fluido Não Newtoniano Deslocando Fluido Newtoniano

A Tabela 6.3 mostra os casos analisados para este tipo de deslocamento, bem como as eficiências obtidas após  $t^* = 1,0$ .

**Tabela 6.3 – Casos simulados - não newtoniano deslocando newtoniano**

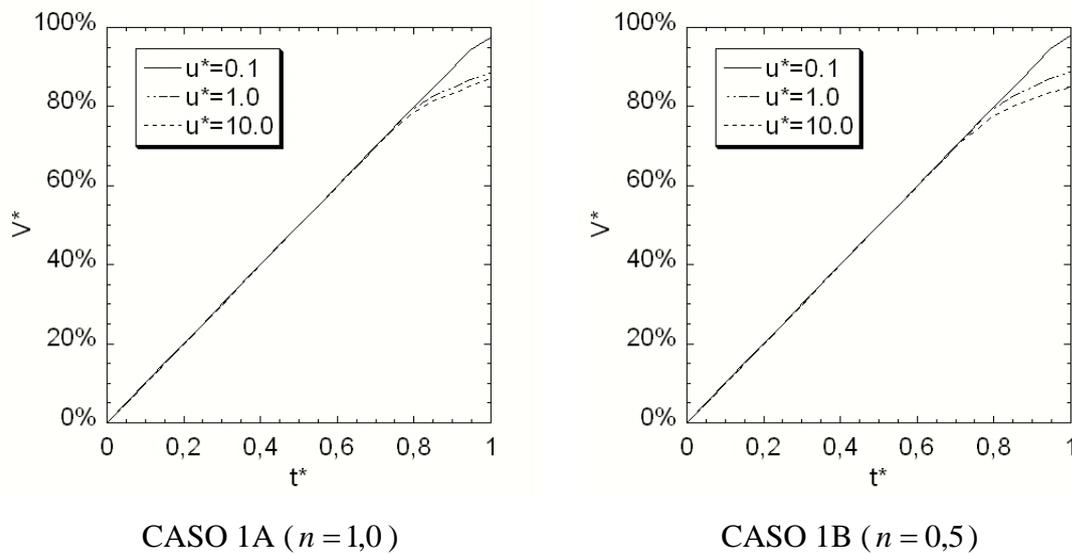
CASO	FLUIDO DESLOCADOR → DESLOCADO	VELOCIDADE	EFICIÊNCIA
CASO 1-1A	NN (n=1.0) → N ( $\eta=0.1$ )	0,1	98%
CASO 1-2A	NN (n=1.0) → N ( $\eta=0.1$ )	1,0	89%
CASO 1-3A	NN (n=1.0) → N ( $\eta=0.1$ )	10,0	87%
CASO 1-1B	NN (n=0.5) → N ( $\eta=0.1$ )	0,1	98%
CASO 1-2B	NN (n=0.5) → N ( $\eta=0.1$ )	1,0	89%
CASO 1-3B	NN (n=0.5) → N ( $\eta=0.1$ )	10,0	85%
CASO 2-1A	NN (n=1.0) → N ( $\eta=1.0$ )	0,1	87%
CASO 2-2A	NN (n=1.0) → N ( $\eta=1.0$ )	1,0	84%
CASO 2-3A	NN (n=1.0) → N ( $\eta=1.0$ )	10,0	83%
CASO 2-1B	NN (n=0.5) → N ( $\eta=1.0$ )	0,1	87%
CASO 2-2B	NN (n=0.5) → N ( $\eta=1.0$ )	1,0	83%
CASO 2-3B	NN (n=0.5) → N ( $\eta=1.0$ )	10,0	73%
CASO 3-1A	NN (n=1.0) → N ( $\eta=10$ )	0,1	79%
CASO 3-2A	NN (n=1.0) → N ( $\eta=10$ )	1,0	71%
CASO 3-3A	NN (n=1.0) → N ( $\eta=10$ )	10,0	70%
CASO 3-1B	NN (n=0.5) → N ( $\eta=10$ )	0,1	80%
CASO 3-2B	NN (n=0.5) → N ( $\eta=10$ )	1,0	64%
CASO 3-3B	NN (n=0.5) → N ( $\eta=10$ )	10,0	53%

## 6.1.1.

**Caso 1 – Fluido Não Newtoniano → Fluido Newtoniano ( $\eta=0,1$ )**

O fluido deslocador (não newtoniano) simula a pasta de cimento (ou o *gravel pack*) enquanto o deslocado (newtoniano) simula o colchão lavador, com baixa viscosidade ( $\eta=0,1$ ).

Este processo apresenta a melhor eficiência no deslocamento NN → N, conforme observado na Tabela 6.3. Verifica-se que a eficiência diminui com o aumento da velocidade.



**Figura 6.3 – CASO 1: Fluido não newtoniano → Fluido newtoniano ( $\eta=0,1$ )**

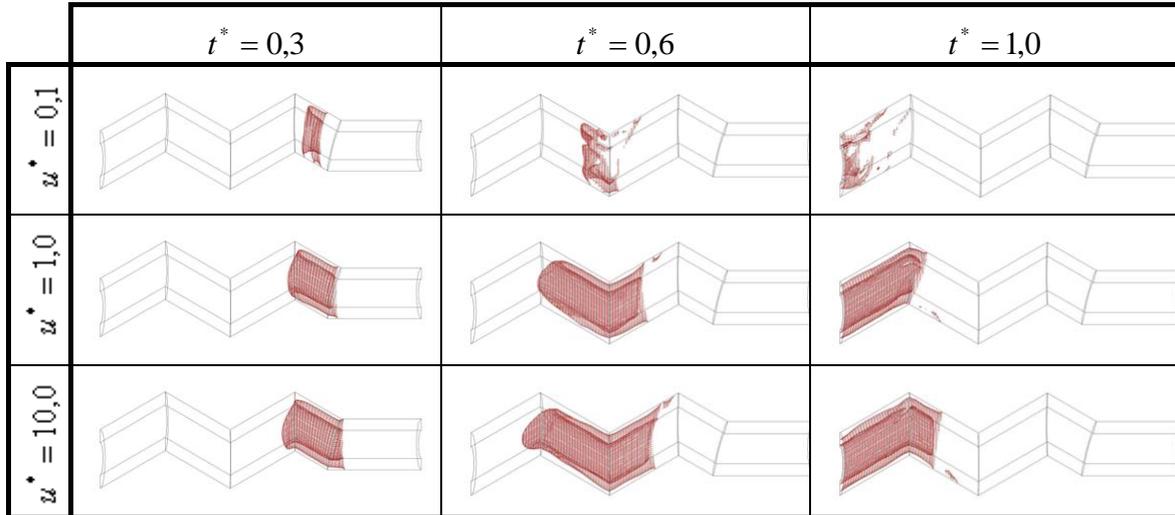
A Figura 6.4 (CASO 1A) e a Figura 6.5 (CASO 1B) mostram os resultados para as velocidades  $u^* = 0,1$ ,  $u^* = 1,0$  e  $u^* = 10,0$ .

Analisando os resultados para a velocidade  $u^* = 0,1$ , observa-se a eficiência ( $V^*$  em  $t^* = 1,0$ ) possui valores próximos (98% - CASO 1A e 1B). Verifica-se que o processo de deslocamento possui alta eficiência para ambos os casos, possivelmente devido à diferença entre as viscosidades dos fluidos. A viscosidade média dos fluidos deslocadores<sup>1</sup> é  $\bar{\eta} = 5,0$  e  $\bar{\eta} = 6,0$ , respectivamente e a do fluido deslocado é  $\eta=0,1$ .

Analisando os casos para a velocidade  $u^* = 1,0$ , observa-se que as eficiências são novamente próximas (89% - CASO 1A e 1B). Verifica-se que o processo de deslocamento ainda possui uma alta eficiência, apesar de diminuir a diferença entre as

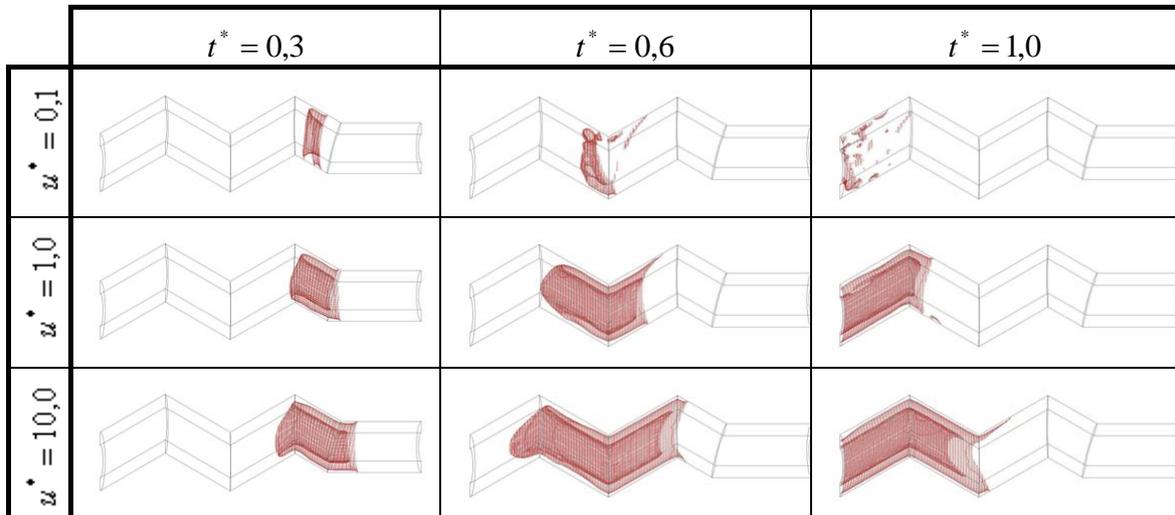
<sup>1</sup> Esta viscosidade representa a viscosidade média volumétrica do fluido, obtida do FLUENT.

viscosidades dos fluidos. A viscosidade média dos fluidos deslocadores é  $\bar{\eta} = 1,4$  e  $\bar{\eta} = 1,0$ , respectivamente, e a do fluido deslocado é  $\eta=0,1$ .



**Figura 6.4 – CASO 1A: Não newtoniano ( $n=1,0$ )  $\rightarrow$  Newtoniano ( $\eta=0,1$ )**

Analisando os casos para a velocidade  $u^* = 10,0$ , observa-se que a eficiência do CASO 1A (87%) é ligeiramente superior a CASO 1B (85%). Verifica-se que o processo de deslocamento ainda possui uma alta eficiência, apesar de diminuir a diferença entre as viscosidades dos fluidos. A viscosidade média dos fluidos deslocadores é  $\bar{\eta} = 1,0$  e  $\bar{\eta} = 0,25$ , respectivamente, e a do fluido deslocado é  $\eta=0,1$ .



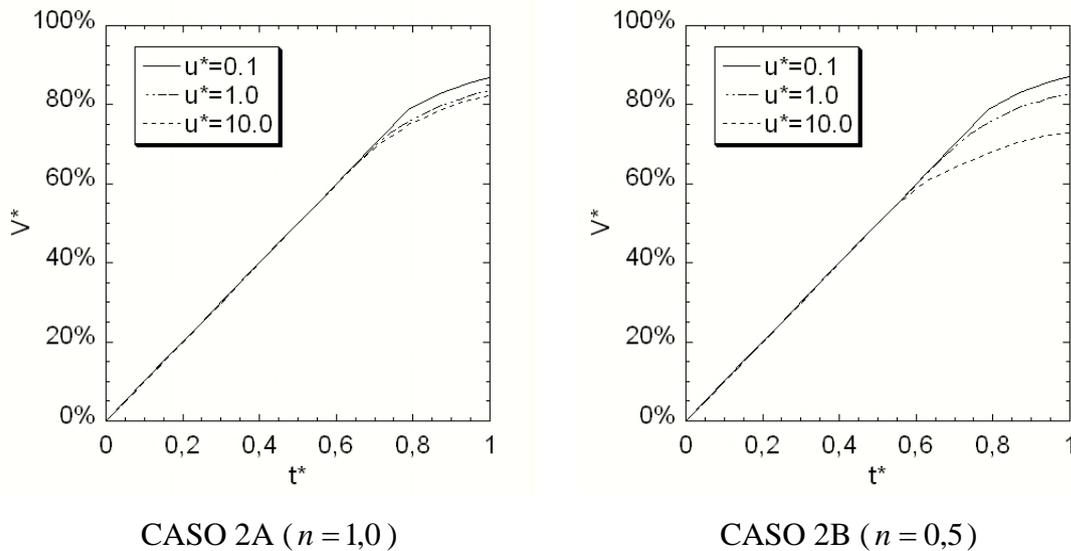
**Figura 6.5 – CASO 1B: Não newtoniano ( $n=0,5$ )  $\rightarrow$  Newtoniano ( $\eta=0,1$ )**

## 6.1.2.

**Caso 2 – Fluido Não Newtoniano → Fluido Newtoniano ( $\eta=1,0$ )**

O fluido deslocador (não newtoniano) simula a pasta de cimento (ou o *gravel pack*) enquanto o deslocado (newtoniano) simula o colchão lavador, com viscosidade  $\eta=1,0$ .

Este processo apresenta uma eficiência intermediária no deslocamento NN → N, conforme observado na Tabela 6.3.



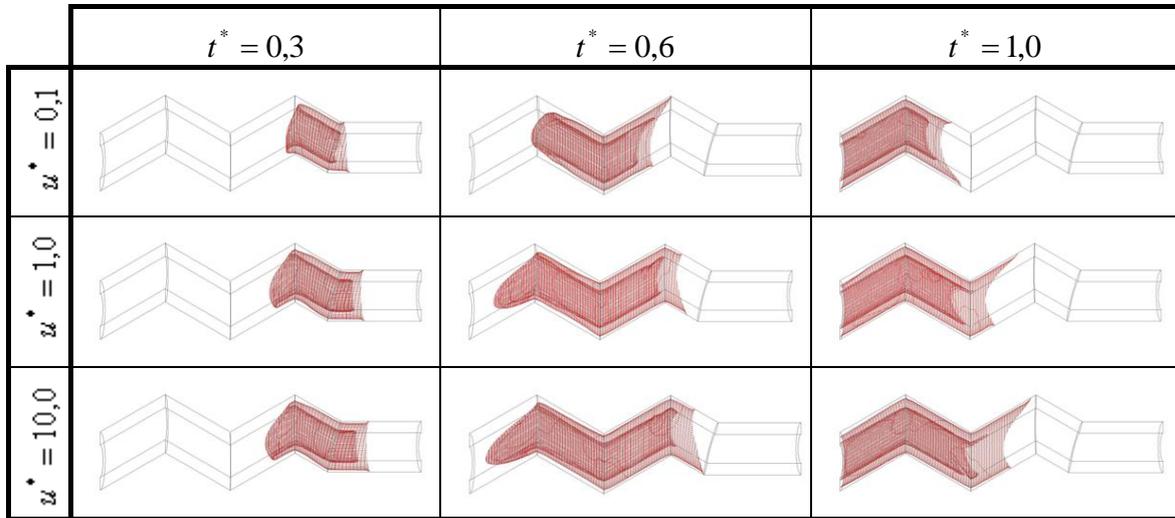
**Figura 6.6 – CASO 2: Fluido não newtoniano → Fluido newtoniano ( $\eta=1,0$ )**

A Figura 6.7 (CASO 2A) e a Figura 6.8 (CASO 2B) mostram os resultados para as velocidades  $u^* = 0,1$ ,  $u^* = 1,0$  e  $u^* = 10,0$ .

Analisando os casos para a velocidade  $u^* = 0,1$ , observa-se que as eficiências são próximas (87% - CASO 2A e 2B). Verifica-se que o processo de deslocamento possui uma alta eficiência, provavelmente devido à diferença entre as viscosidades dos fluidos. A viscosidade média dos fluidos deslocadores é  $\bar{\eta} = 5,0$  e  $\bar{\eta} = 6,0$ , respectivamente, e a do fluido deslocado é  $\eta=1,0$ .

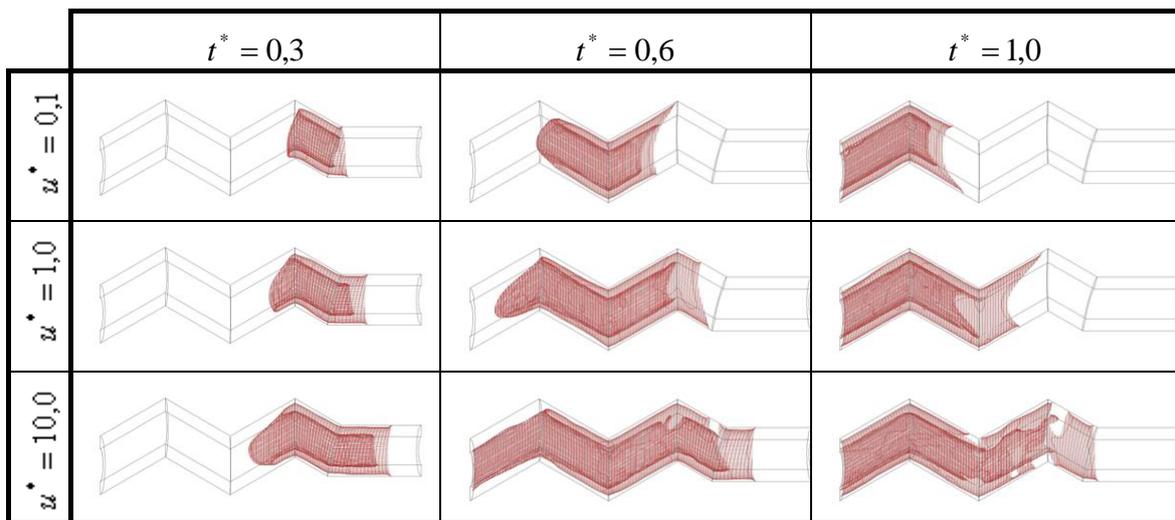
Analisando os casos para a velocidade  $u^* = 1,0$  (CASO 2A e CASO 2B) e  $u^* = 10,0$  (CASO 2A), observa-se que as eficiências são novamente próximas (84%, 83% e 83%, respectivamente). Verifica-se que o processo de deslocamento possui uma alta eficiência, provavelmente devido à diferença entre as viscosidades dos fluidos. A

viscosidade média dos fluidos deslocadores é  $\bar{\eta} = 1,4$ ,  $\bar{\eta} = 1,0$  e  $\bar{\eta} = 1,0$ , respectivamente, e a do fluido deslocado é  $\eta = 1,0$ .



**Figura 6.7 – CASO 2A: Não newtoniano (n=1,0) → Newtoniano ( $\eta=1,0$ )**

Analisando os casos para a velocidade  $u^* = 10,0$  (CASO 2B), observa-se que a eficiência é significativamente inferior às demais (73%). Verifica-se um acentuado processo de *fingering*, onde o fluido deslocador rompe o domínio computacional em  $t^* = 0,5$ . A viscosidade média do fluido deslocador é  $\bar{\eta} = 0,2$  e a do fluido deslocado é  $\eta = 1,0$ .



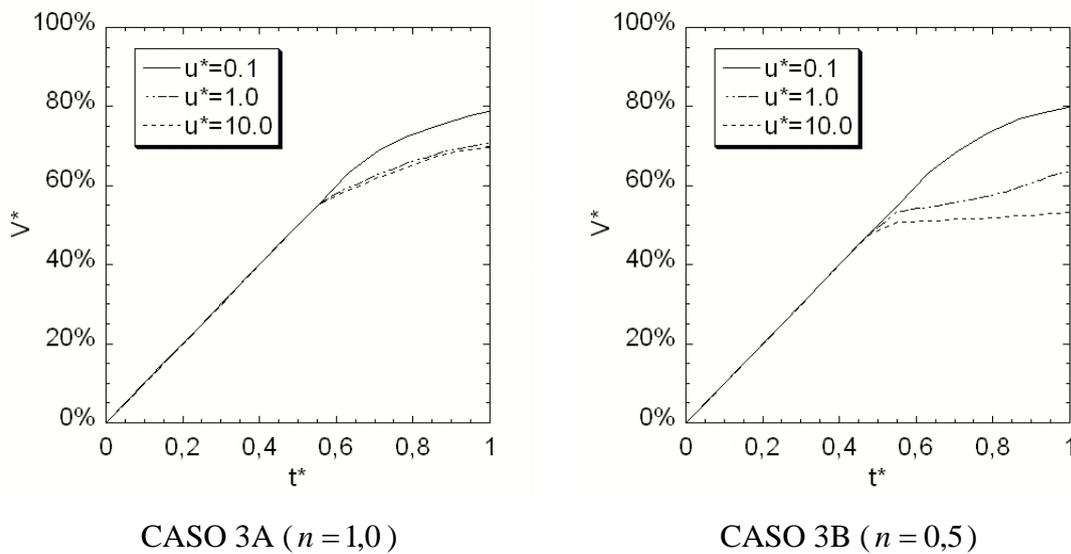
**Figura 6.8 – CASO 2B: Não newtoniano (n=0,5) → Newtoniano ( $\eta=1,0$ )**

## 6.1.3.

**Caso 3 – Fluido Não Newtoniano → Fluido Newtoniano ( $\eta=10,0$ )**

O fluido deslocador (não newtoniano) simula a pasta de cimento (ou o *gravel pack*) enquanto o deslocado (newtoniano) simula o colchão lavador, com viscosidade  $\eta=10,0$ .

Este processo apresenta a pior eficiência de deslocamento NN → N, conforme observado na Figura 6.9. Verifica-se que a eficiência diminui com o aumento da velocidade.

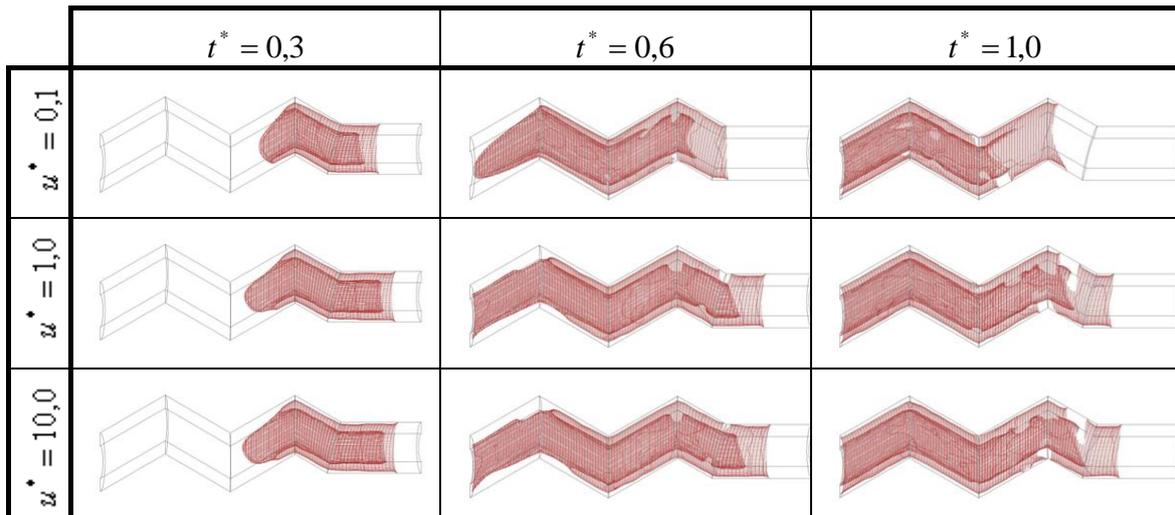


**Figura 6.9 – CASO 3: Fluido não newtoniano → Fluido newtoniano ( $\eta = 10,0$ )**

A Figura 6.10 (CASO 3A) e a Figura 6.11 (CASO 3B) mostram os resultados para as velocidades  $u^* = 0,1$ ,  $u^* = 1,0$  e  $u^* = 10,0$ .

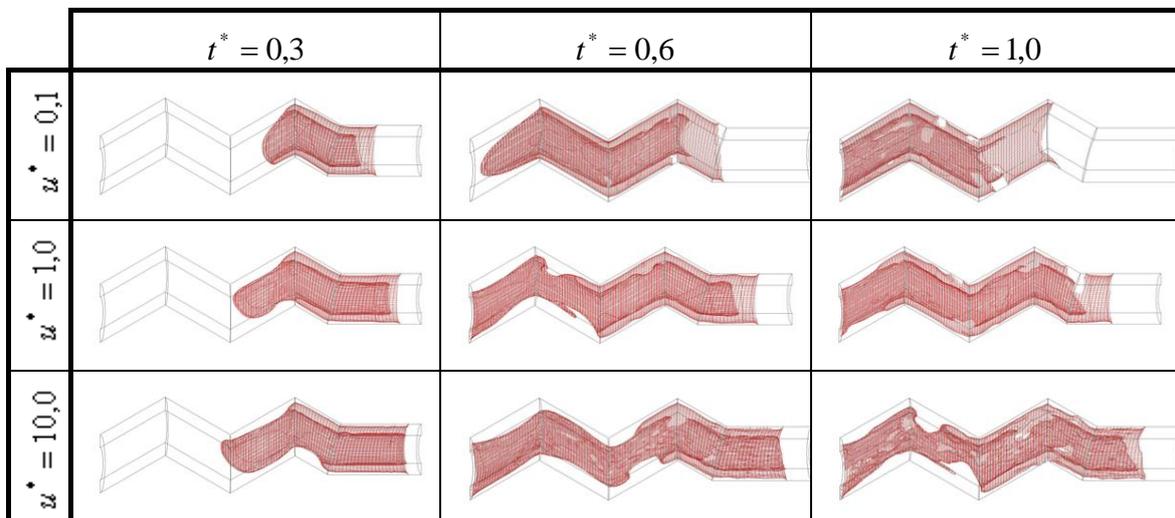
Analisando os casos para a velocidade  $u^* = 0,1$ , verifica-se que as eficiências são novamente próximas (79% - CASO 3A; 80% - CASO 3B). A viscosidade média dos fluidos deslocadores é  $\bar{\eta} = 4,6$  e  $\bar{\eta} = 5,6$ , respectivamente, e a do fluido deslocado é  $\eta=10,0$ .

Analisando os casos para as velocidades  $u^* = 1,0$  e  $u^* = 10,0$  (CASO 3A), observa-se que as eficiências são novamente próximas (71% e 70%, respectivamente). Verifica-se acentuado processo de *fingering*. A viscosidade média dos fluidos deslocadores é  $\bar{\eta} = 1,3$  e  $\bar{\eta} = 1,0$ , respectivamente, e a do fluido deslocado é  $\eta=10,0$ .



**Figura 6.10 – CASO 3A: Não newtoniano ( $n=1,0$ ) → Newtoniano ( $\eta=10,0$ )**

Analisando os casos para as velocidades  $u^* = 1,0$  e  $u^* = 10,0$  (CASO 3B), observa-se que as eficiências decrescem significativamente com o aumento da velocidade (64% e 53%, respectivamente). Verifica-se acentuado processo de *fingering*, devido ao índice de consistência  $n = 0,5$  promover um perfil da interface mais pontiagudo. O fluido deslocador rompe o domínio computacional em  $t^* = 0,5$  (Figura 6.11). A viscosidade média dos fluidos deslocadores é  $\bar{\eta} = 0,7$  e  $\bar{\eta} = 0,15$ , respectivamente, e a do fluido deslocado é  $\eta = 10,0$ .



**Figura 6.11 – CASO 3B: Não newtoniano ( $n=0,5$ ) → Newtoniano ( $\eta=10,0$ )**

## 6.2.

**Fluido Newtoniano Deslocando Fluido Não Newtoniano**

A Tabela 6.4 mostra os casos analisados para este tipo de deslocamento, bem como as eficiências obtidas após  $t^* = 1,0$ .

**Tabela 6.4 – Casos simulados - newtoniano deslocando não newtoniano**

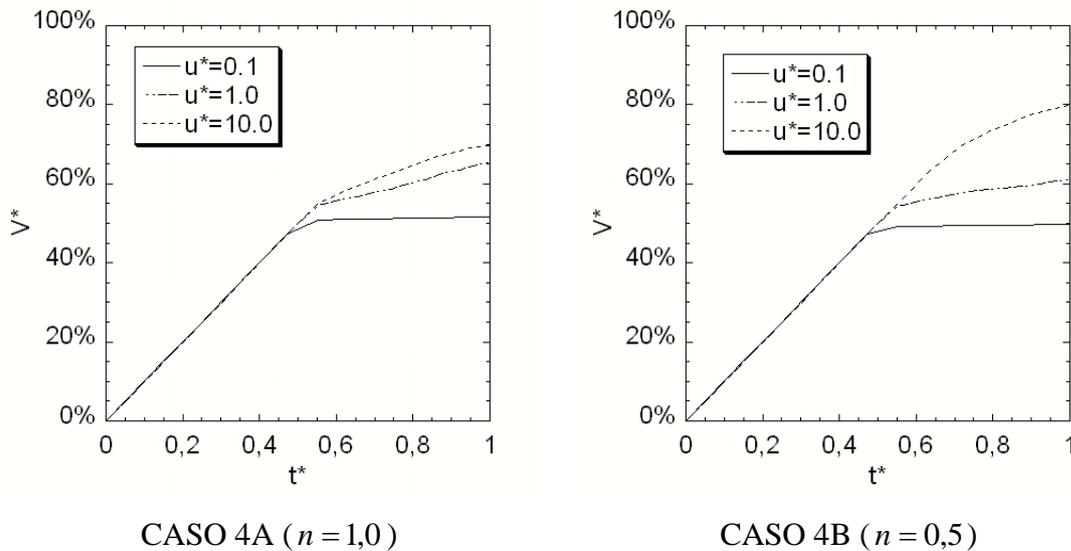
CASO	FLUIDO DESLOCADOR → DESLOCADO	VELOCIDADE	EFICIÊNCIA
CASO 4-1A	N ( $\eta=0.1$ ) → NN (n=1.0)	0,1	52%
CASO 4-2A	N ( $\eta=0.1$ ) → NN (n=1.0)	1,0	66%
CASO 4-3A	N ( $\eta=0.1$ ) → NN (n=1.0)	10,0	69%
CASO 4-1B	N ( $\eta=0.1$ ) → NN (n=0.5)	0,1	50%
CASO 4-2B	N ( $\eta=0.1$ ) → NN (n=0.5)	1,0	61%
CASO 4-3B	N ( $\eta=0.1$ ) → NN (n=0.5)	10,0	80%
CASO 5-1A	N ( $\eta=1.0$ ) → NN (n=1.0)	0,1	71%
CASO 5-2A	N ( $\eta=1.0$ ) → NN (n=1.0)	1,0	82%
CASO 5-3A	N ( $\eta=1.0$ ) → NN (n=1.0)	10,0	83%
CASO 5-1B	N ( $\eta=1.0$ ) → NN (n=0.5)	0,1	67%
CASO 5-2B	N ( $\eta=1.0$ ) → NN (n=0.5)	1,0	85%
CASO 5-3B	N ( $\eta=1.0$ ) → NN (n=0.5)	10,0	88%
CASO 6-1A	N ( $\eta=10$ ) → NN (n=1.0)	0,1	88%
CASO 6-2A	N ( $\eta=10$ ) → NN (n=1.0)	1,0	88%
CASO 6-3A	N ( $\eta=10$ ) → NN (n=1.0)	10,0	88%
CASO 6-1B	N ( $\eta=10$ ) → NN (n=0.5)	0,1	87%
CASO 6-2B	N ( $\eta=10$ ) → NN (n=0.5)	1,0	91%
CASO 6-3B	N ( $\eta=10$ ) → NN (n=0.5)	10,0	97%

## 6.2.1.

**Caso 4 – Fluido Newtoniano ( $\eta=0,1$ )  $\rightarrow$  Fluido Não Newtoniano**

O fluido deslocador (newtoniano) simula o colchão lavador enquanto o deslocado (não newtoniano) simula a lama de perfuração, com baixa viscosidade ( $\eta=0,1$ ).

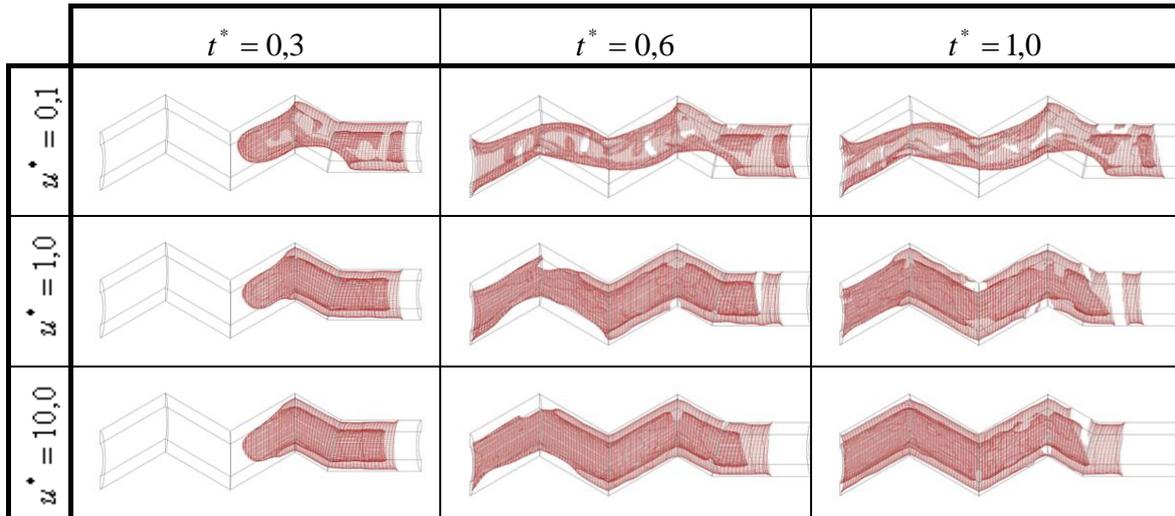
Este processo apresenta a pior eficiência de deslocamento  $N \rightarrow NN$ , conforme observado na Tabela 6.4. Verifica-se que a eficiência aumenta com o aumento da velocidade.



**Figura 6.12 – CASO 4: Fluido newtoniano  $\rightarrow$  Fluido não newtoniano ( $\eta=0,1$ )**

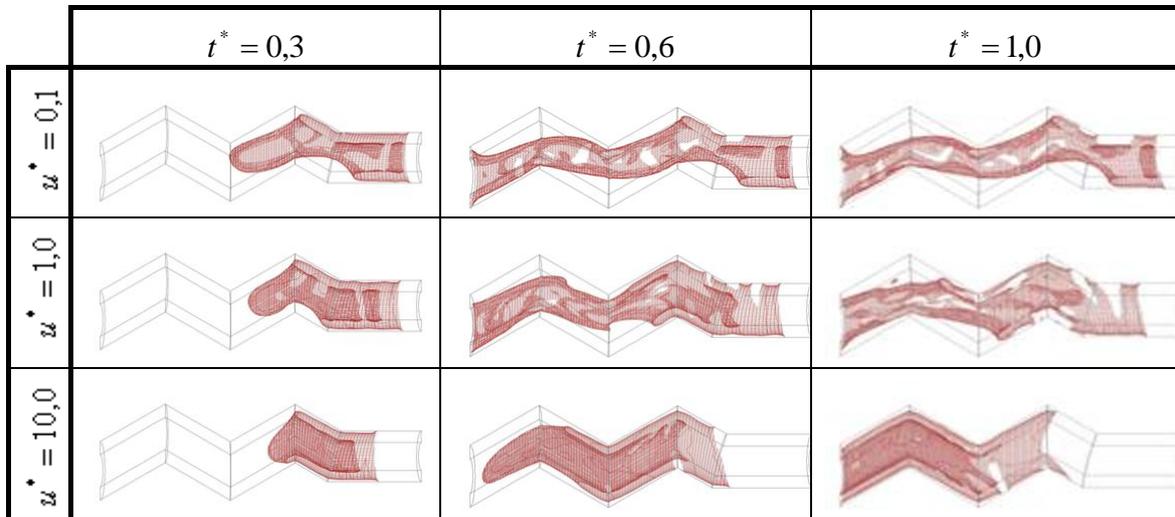
A Figura 6.13 (CASO 4A) e a Figura 6.14 (CASO 4B) mostram os resultados para as velocidades  $u^* = 0,1$ ,  $u^* = 1,0$  e  $u^* = 10,0$ .

Analisando os casos para a velocidade  $u^* = 0,1$ , as eficiências são próximas (52% - CASO 4A; 50% - CASO 4B). A viscosidade do fluido deslocador é  $\eta=0,1$  e as viscosidades médias dos fluidos deslocados são  $\bar{\eta} = 3,2$  e  $\bar{\eta} = 3,7$ , respectivamente. Verifica-se um acentuado processo de *fingering* (Figura 6.13 e Figura 6.14). Essas eficiências são as mais baixas de todos os deslocamentos estudados, conforme observado na Tabela 6.4.



**Figura 6.13 – CASO 4A: Newtoniano ( $\eta=0,1$ )  $\rightarrow$  Não newtoniano ( $n=1,0$ )**

Analisando os casos para a velocidade  $u^* = 1,0$  e  $u^* = 10,0$  (CASO 4A) e  $u^* = 1,0$  (CASO 4B), as eficiências são próximas (66%, 69% e 61%, respectivamente). A viscosidade do fluido deslocador é  $\eta=0,1$  e as viscosidades médias dos fluidos deslocados são  $\bar{\eta} = 1,2$ ,  $\bar{\eta} = 1,0$  e  $\bar{\eta} = 0,8$ , respectivamente. Verifica-se novamente um acentuado processo de *fingering* (Figura 6.13 e Figura 6.14).



**Figura 6.14 – CASO 4B: Newtoniano ( $\eta=0,1$ )  $\rightarrow$  Newtoniano ( $n=0,5$ )**

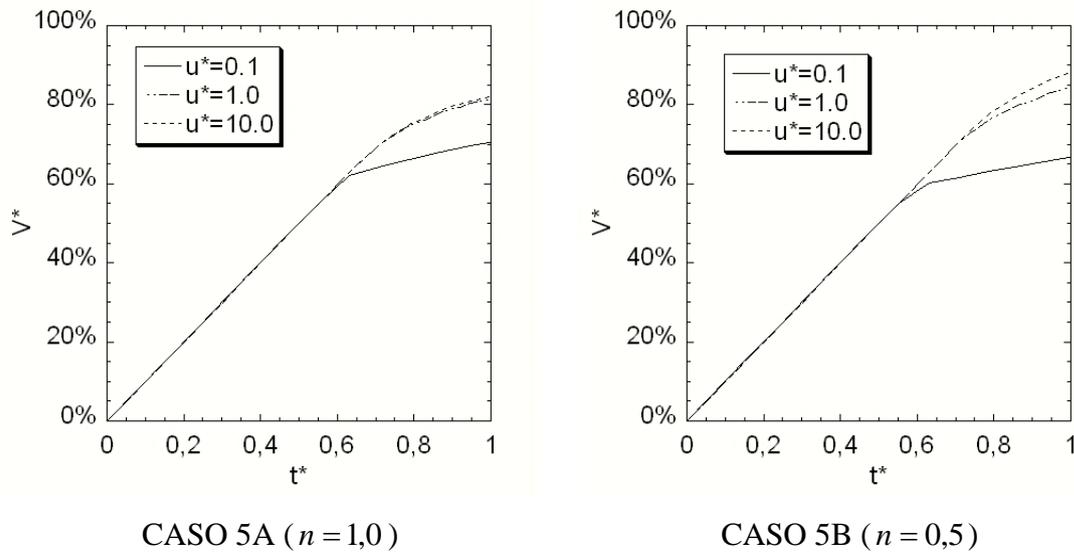
Analisando o caso para a velocidade  $u^* = 10,0$  (CASO 4B), a eficiência (80%) é significativamente superior às demais. A viscosidade do fluido deslocador é  $\eta=0,1$  e a viscosidade média do fluido deslocado é  $\bar{\eta} = 0,2$ . Verifica-se que a pequena diferença de viscosidades reduziu o processo de *fingering* (Figura 6.14).

6.2.2.

**Caso 5 – Fluido Newtoniano ( $\eta=1,0$ ) → Fluido Não Newtoniano**

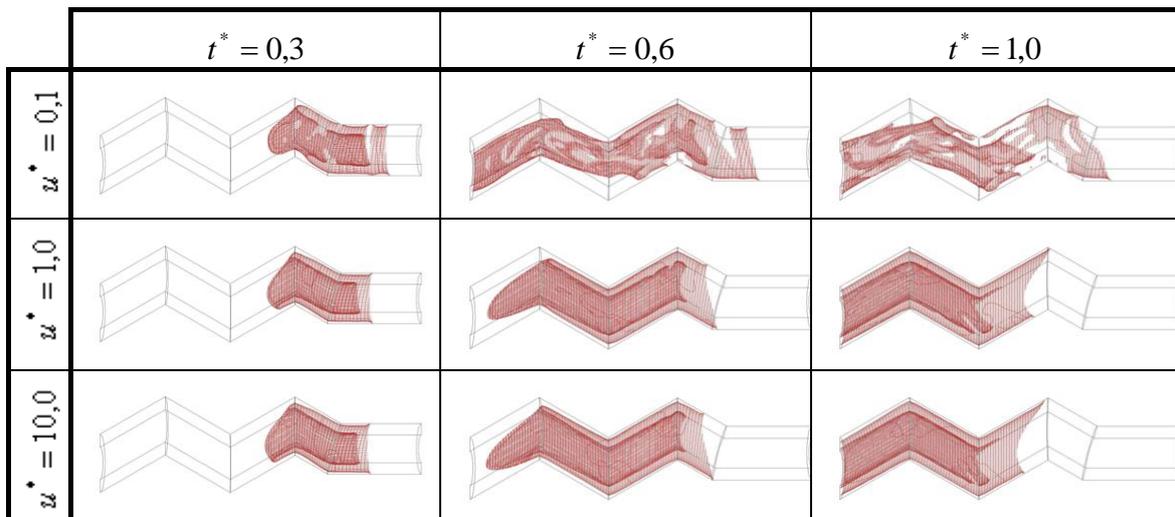
O fluido deslocador (newtoniano) simula o colchão lavador enquanto o deslocado (não newtoniano) simula a lama de perfuração, com viscosidade  $\eta=1,0$ .

Este processo apresenta uma significativa melhora na eficiência de deslocamento  $N \rightarrow NN$ , conforme observado na Tabela 6.4. Verifica-se que a eficiência aumenta com o aumento da velocidade.



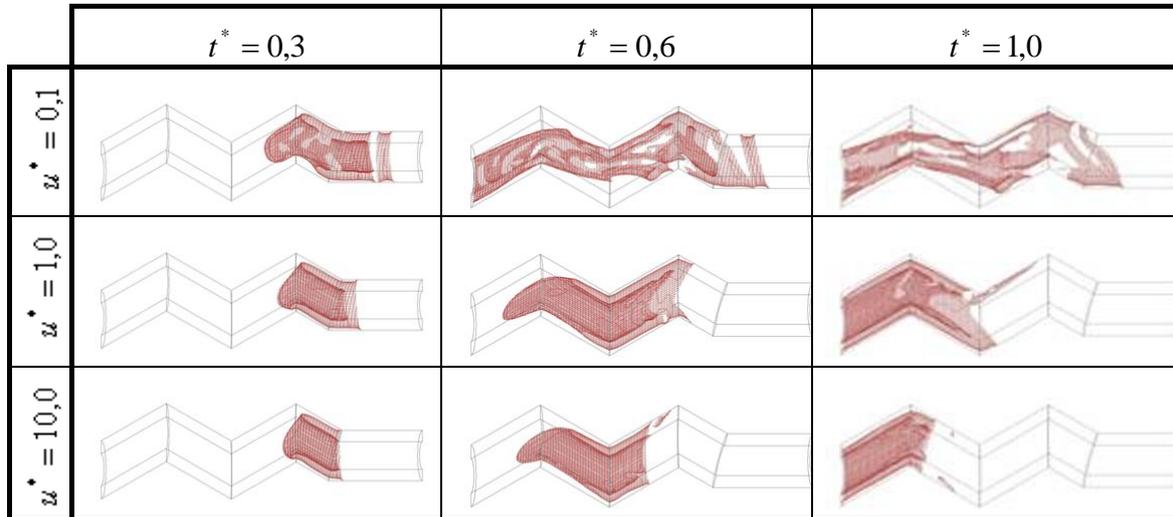
**Figura 6.15 – CASO 5: Fluido newtoniano → Fluido não newtoniano ( $\eta = 1,0$ )**

A Figura 6.16 (CASO 5A) e a Figura 6.17 (CASO 5B) mostram os resultados para as velocidades  $u^* = 0,1$ ,  $u^* = 1,0$  e  $u^* = 10,0$ .



**Figura 6.16 – CASO 5A: Newtoniano ( $\eta=1,0$ ) → Não newtoniano ( $n=1,0$ )**

Analisando os casos para a velocidade  $u^* = 0,1$ , a eficiência do CASO 5A (71%) é ligeiramente superior a do CASO 5B (67%). A viscosidade do fluido deslocador é  $\eta = 1,0$  e as viscosidades médias dos fluidos deslocados são  $\bar{\eta} = 4,1$  e  $\bar{\eta} = 4,9$ , respectivamente. Verifica-se um acentuado processo de *fingering* (Figura 6.16 e Figura 6.17).



**Figura 6.17 – CASO 5B: Newtoniano ( $\eta=1,0$ ) → Não newtoniano ( $n=0,5$ )**

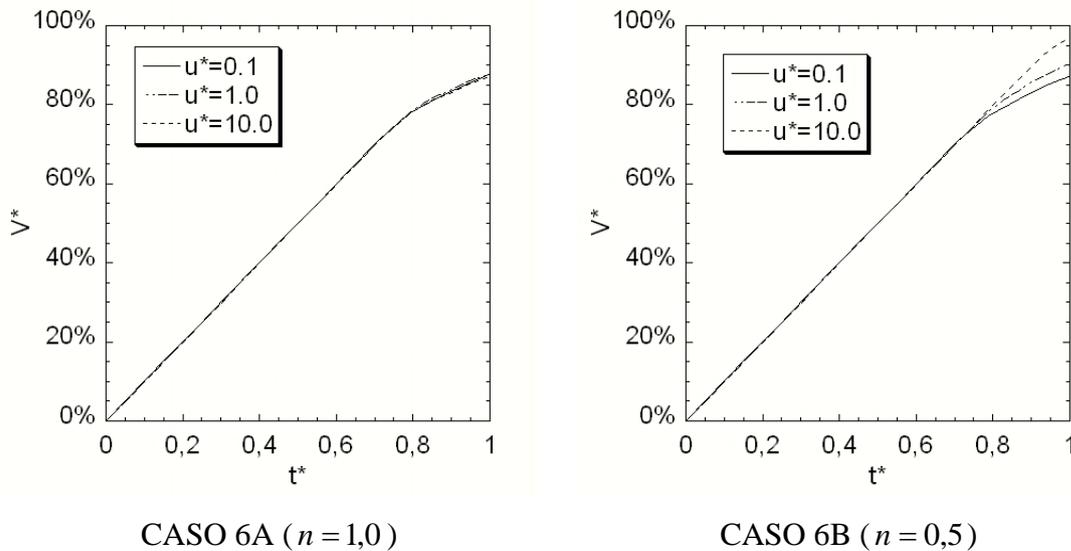
Analisando os casos para as velocidades  $u^* = 1,0$  (CASO 5A e 5B) e  $u^* = 10,0$  (CASO 5A e 5B), as eficiências são semelhantes (82%, 85%, 83% e 88%, respectivamente). A viscosidade do fluido deslocador é  $\eta = 1,0$  e as viscosidades médias dos fluidos deslocados são  $\bar{\eta} = 1,4$ ,  $\bar{\eta} = 1,0$ ,  $\bar{\eta} = 1,0$  e  $\bar{\eta} = 0,2$ , respectivamente. Verifica-se uma melhora no processo de deslocamento, devido à pequena diferença de viscosidades (Figura 6.16 e Figura 6.17).

## 6.2.3.

**Caso 6 – Fluido Newtoniano ( $\eta=10,0$ )  $\rightarrow$  Fluido Não Newtoniano**

O fluido deslocador (newtoniano) simula o colchão lavador enquanto o deslocado (não newtoniano) simula a lama de perfuração, com viscosidade  $\eta=10,0$ .

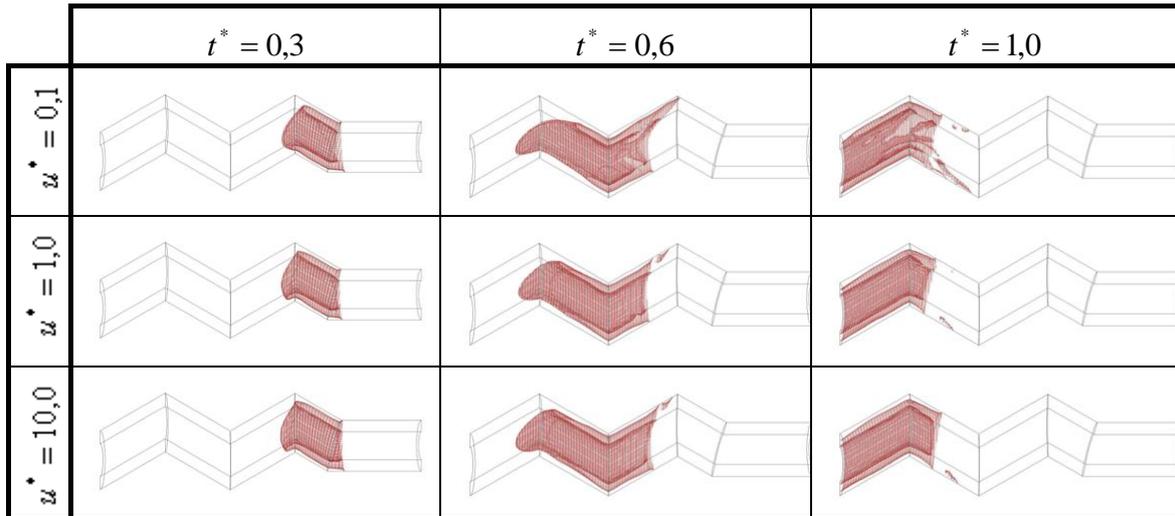
Este processo apresenta a melhor eficiência de deslocamento  $N \rightarrow NN$ , conforme observado na Tabela 6.4. Verifica-se que a eficiência aumenta com o aumento da velocidade.



**Figura 6.18 – CASO 6: Fluido newtoniano  $\rightarrow$  Fluido não newtoniano ( $\eta=10,0$ )**

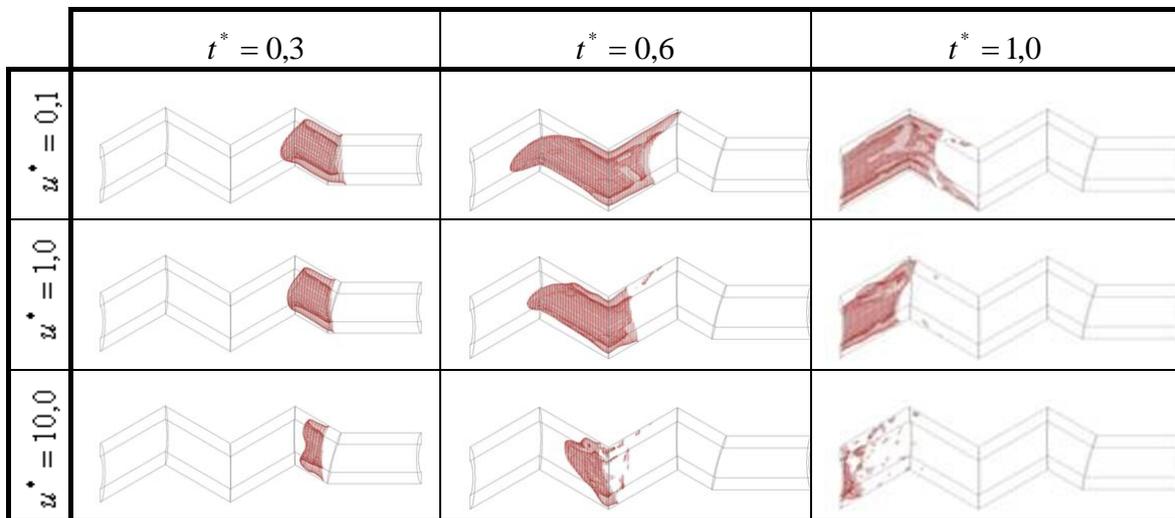
A Figura 6.19 (CASO 6A) e a Figura 6.20 (CASO 6B) mostram os resultados para as velocidades  $u^* = 0,1$ ,  $u^* = 1,0$  e  $u^* = 10,0$ .

Analisando os casos para as velocidades  $u^* = 0,1$ ,  $u^* = 1,0$  e  $u^* = 10,0$  (CASO 6A), as eficiências são próximas (88%). A viscosidade do fluido deslocador é  $\eta=10,0$  e as viscosidades médias dos fluidos deslocados são  $\bar{\eta}=4,9$ ,  $\bar{\eta}= 1,3$ ,  $\bar{\eta}= 1,0$ , respectivamente. Verifica-se uma efetiva melhora no processo de deslocamento (Figura 6.19). Nesta análise, a diferença de viscosidades entre fluido deslocador e deslocado passa a ser positiva.



**Figura 6.19 – CASO 6A: Newtoniano ( $\eta=10,0$ )  $\rightarrow$  Não newtoniano ( $n=1,0$ )**

Analisando os casos para as velocidades  $u^* = 0,1$ ,  $u^* = 1,0$  e  $u^* = 10,0$  (CASO 6B), as eficiências aumentam com o aumento da velocidade (87%, 91% e 97%, respectivamente). A viscosidade do fluido deslocador é  $\eta=10,0$  e as viscosidades médias dos fluidos deslocados são  $\bar{\eta} = 5,8$ ,  $\bar{\eta} = 1,0$ ,  $\bar{\eta} = 0,2$ , respectivamente. Verifica-se uma efetiva melhora no processo de deslocamento (Figura 6.20). Quanto maior a diferença positiva de viscosidade, melhor a eficiência.



**Figura 6.20 – CASO 6B: Newtoniano ( $\eta=10,0$ )  $\rightarrow$  Não newtoniano ( $n=0,5$ )**