

## 4

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1

#### Escoamento entre Placas Paralelas

##### 4.1.1

##### Testes Preliminares

Inicialmente, fizemos testes na planta experimental e validamos a montagem experimental usando fluidos newtonianos, que não apresentam deslizamento e cujos resultados são conhecidos por permitirem solução analítica. Para isso, utilizamos uma solução de água com glicerina a fim de obter uma viscosidade similar àquela com a qual trabalhamos. As placas utilizadas nesses testes foram as de aço inox sem revestimento. Os resultados experimentais concordaram com a solução analítica com menos de 5% de diferença.

Após a validação do procedimento experimental, realizamos os testes para as diversas placas revestidas. As características das superfícies destas placas encontram-se na Tab. 3.1. Como primeiro fluido de trabalho, utilizamos uma dispersão de Carbopol 0,13%. Obtivemos os resultados apresentados na Fig. 4.1.

A Figura 4.1 fornece a velocidade média adimensional em função da tensão cisalhante na parede, também adimensional, para diferentes revestimentos. Nessa figura encontra-se também a solução numérica, que é obtida supondo não deslizamento na parede. Conseqüentemente, o desvio entre os dados experimentais e a solução numérica é uma medida do deslizamento ocorrido.

A Figura 4.1 mostra portanto que a placa que apresentou maior deslizamento foi a Placa 02, enquanto que a que apresentou o menor deslizamento foi a Placa 09. Essas duas placas têm a mesma rugosidade ( $0.11 \mu\text{m}$ ), enquanto que seus ângulos de contato são  $82^\circ$  para a Placa 02 e  $129^\circ$  para a Placa 09. Logo, esse resultado indica que o nível de deslizamento aumenta conforme o ângulo de contato diminui, ou seja, conforme a molhabilidade aumenta. Esta tendência é confirmada por pesquisas publicadas recentemente (23).

Por outro lado, as Placas 03 e 04 têm o mesmo ângulo de contato ( $86^\circ$ ), enquanto que suas rugosidades são diferentes ( $0.05 \mu\text{m}$  para a Placa 03 e

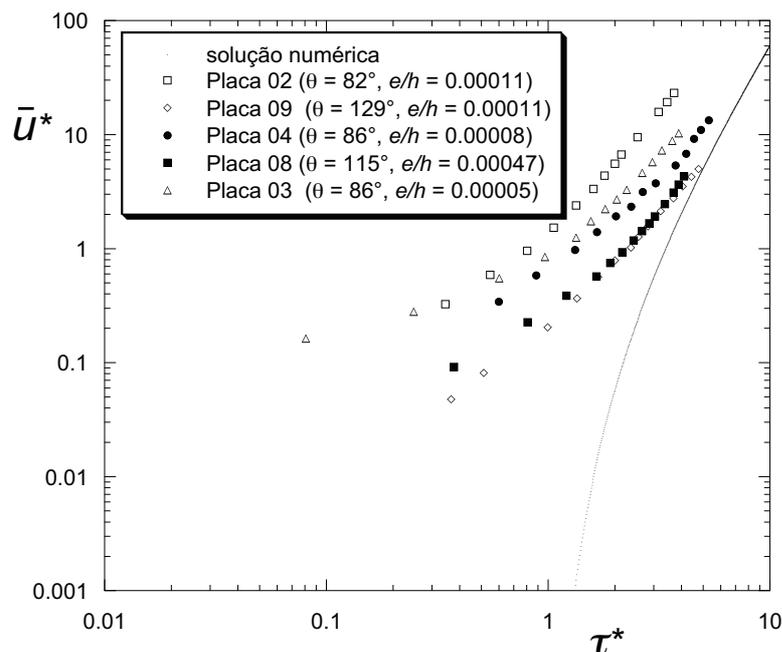


Figura 4.1: Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede. Fluido à base de água. Características das superfícies na Tab. 3.1.

0.08  $\mu\text{m}$  para a Placa 04). Como os dados da Placa 03 se desviam mais da solução numérica (e portanto apresentam maior grau de deslizamento) do que os dados da Placa 04, conclui-se que o nível de deslizamento aumenta conforme a rugosidade diminui, conforme era esperado.

#### 4.1.2

##### Testes com Fluido à Base de Água

Após efetuados os testes mencionados anteriormente, recebemos da USP uma outra remessa de placas com as rugosidades controladas por lixas de granulometrias diferentes e com diversos ângulos de contato (ver Tab. 3.2). Nessa segunda remessa existiam placas com a mesma rugosidade e ângulos de contato diferentes e outras placas com aproximadamente o mesmo ângulo de contato, mas com rugosidades diferentes. Tanto a rugosidade quanto os ângulos de contato nos foram medidos e fornecidos com as placas pela USP.

Na Figura 4.2 encontram-se os resultados de quatro testes realizados com a solução aquosa de Carbopol 0,13% em placas recebidas nessa segunda remessa, revestidas com Interzone 954 mas sem tratamento com plasma. Estas placas apresentaram aproximadamente o mesmo ângulo de contato ( $80^\circ$ ), mas suas rugosidades são diferentes (ver Tab. 3.2). Analisando esses resultados não observamos uma variação do deslizamento aparente com o aumento da rugosidade, em contraste com o que a literatura (23) e os resultados anteriores

sugerem. Isso ocorreu pelo fato de que todas as rugosidades, apesar de diferentes, são inferiores a um limite abaixo do qual a rugosidade não afeta mais o escoamento. Veremos mais adiante que, se a rugosidade for suficientemente grande, o deslizamento é totalmente suprimido (Fig. 4.5).

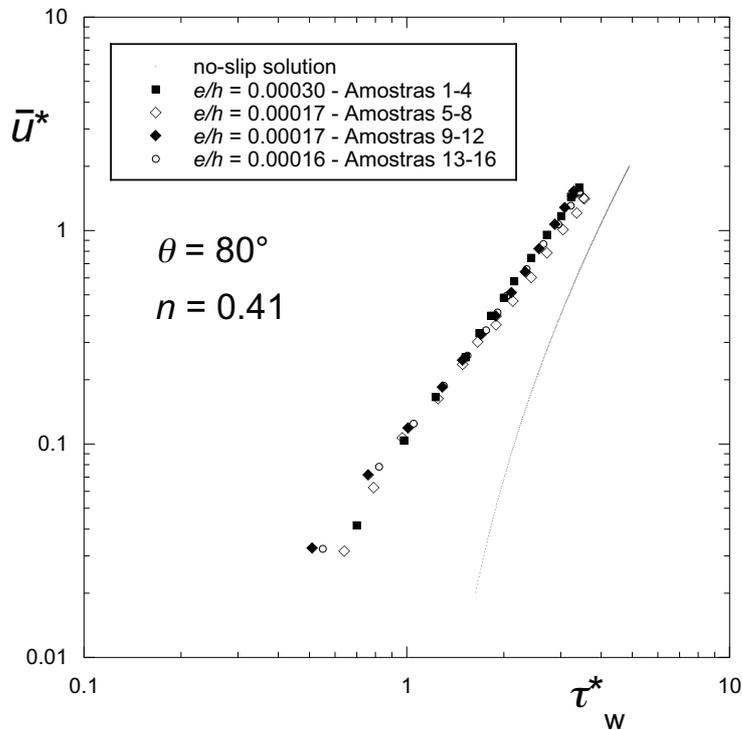


Figura 4.2: Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito da rugosidade. Fluido à base de água. Características das superfícies na Tab. 3.2.

Na Fig. 4.3 podemos encontrar os resultados dos testes realizados nas placas dessa segunda remessa, que apresentavam rugosidades aproximadamente iguais, mas com ângulos de contato diferentes. Analisando esses resultados observamos que os resultados referentes ao menor ângulo de contato (amostras 21-24) apresentaram o maior nível de deslizamento, e vice-versa, os resultados referentes ao maior ângulo de contato (amostras 37-40) apresentaram o menor nível de deslizamento. Esta tendência está de acordo com a literatura (23).

No entanto, os outros resultados apresentados na Fig. 4.3 não obedecem à mesma tendência. Por exemplo, os resultados referentes a  $\theta = 110^\circ$  (amostras 33-36) apresentam alto nível de deslizamento, enquanto que os resultados referentes a  $\theta = 62^\circ$  e  $\theta = 80^\circ$  (amostras 25-28 e 1-4, respectivamente) apresentam nível de deslizamento mais baixo.

As constatações acima mostram que o ângulo de contato com o fluido base (água) não correlaciona perfeitamente os resultados. Talvez outros fatores

também sejam importantes, como por exemplo a interação entre a superfície e os outros parâmetros do fluido em escoamento.

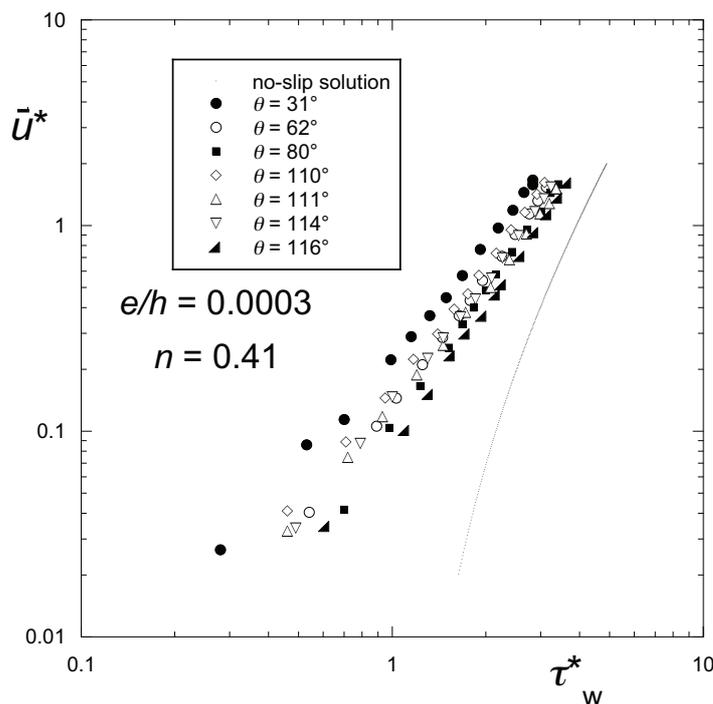


Figura 4.3: Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito do ângulo de contato. Fluido à base de água. Características das superfícies na Tab. 3.2.

A Fig. 4.4 sumariza todos os resultados obtidos com as placas da segunda remessa (e a mesma solução de carbopol), incluindo portanto os resultados mostrados nas Figs. 4.2 e 4.3.

#### 4.1.3

##### Testes com Fluido à Base de Óleo

Realizados os testes com a dispersão de Carbopol 0,13%, demos início a testes com uma suspensão à base de óleo, para obter resultados em outra faixa de ângulos de contato. O primeiro passo foi a realização de um escoamento entre placas paralelas suficientemente rugosas para comprovar que a solução numérica das equações governantes obtida descreve o caso de não-deslizamento. Esses resultados podem ser encontrados na Fig. 4.5. Nessa figura podemos observar que quando a tensão adimensional na parede assume um valor inferior a 1, a velocidade média adimensional cai a valores desprezíveis, significando que a suspensão praticamente para de escoar. Observamos também que os resultados experimentais concordam muito bem com a solução numérica obtida, comprovando que, quando não há deslizamento, o experimento é bem descrito pela modelagem matemática apresentada.

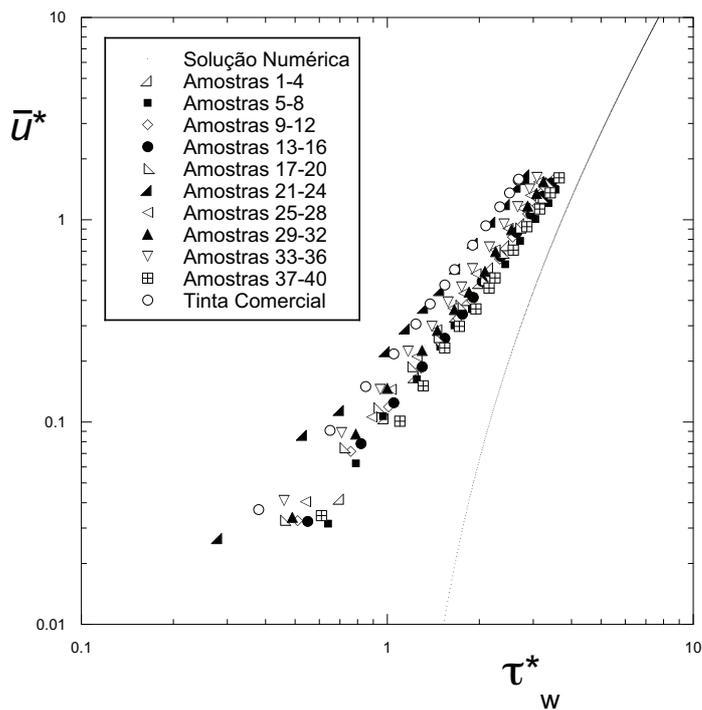


Figura 4.4: Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Fluido à base de água. Características das superfícies na Tab. 3.2.

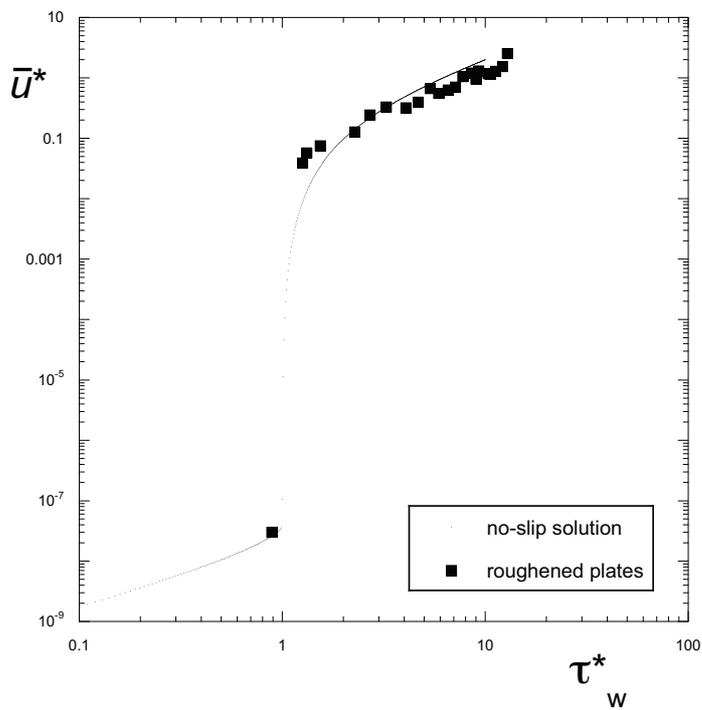


Figura 4.5: Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Não-deslizamento (superfície muito rugosa, lixa 50, fluido à base de óleo).

Em seguida realizamos os testes de escoamento da suspensão à base de óleo, com as placas que apresentavam o mesmo ângulo de contato com o fluido base (óleo), mas com rugosidades diferentes, a saber, amostras 1 a 16 da segunda remessa. Esses resultados encontram-se na Fig. 4.6. Como essas placas foram as mesmas utilizadas nos testes com Carbopol, não esperávamos uma variação significativa do deslizamento aparente nesses testes, visto que as rugosidades dessas placas não variaram de forma significativa. De fato, tendo em vista as incertezas associadas às medidas, observamos diferenças não muito significativas entre os resultados dos testes com as placas de rugosidade relativa ( $e/h$ ) igual a 0,00030 e os resultados dos testes das demais placas (com praticamente a mesma rugosidade relativa). O teste com as placas de maior rugosidade relativa ( $e/h=0,00030$ ) apresentou um menor deslizamento quando comparado com os demais, seguindo a tendência observada nos primeiros testes de escoamento e também a tendência encontrada na literatura.

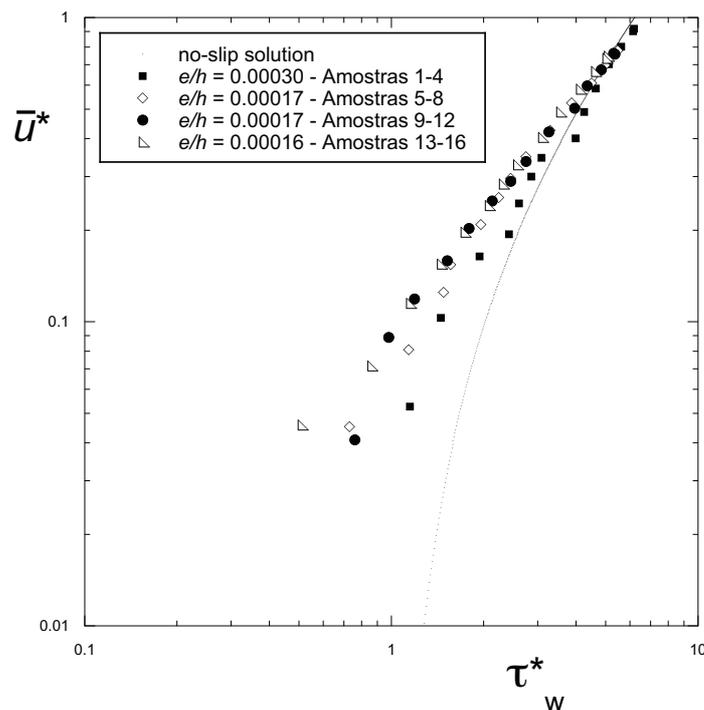


Figura 4.6: Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito da rugosidade. Fluido à base de óleo. Características das superfícies na Tab. 3.2.

Na Figura 4.7 apresentamos os resultados obtidos com as placas de mesma rugosidade mas com diferentes tratamentos de plasma. Esta figura mostra que todos os revestimentos causam deslizamento significativo, mas não fica clara uma tendência de comportamento com o ângulo de contato.

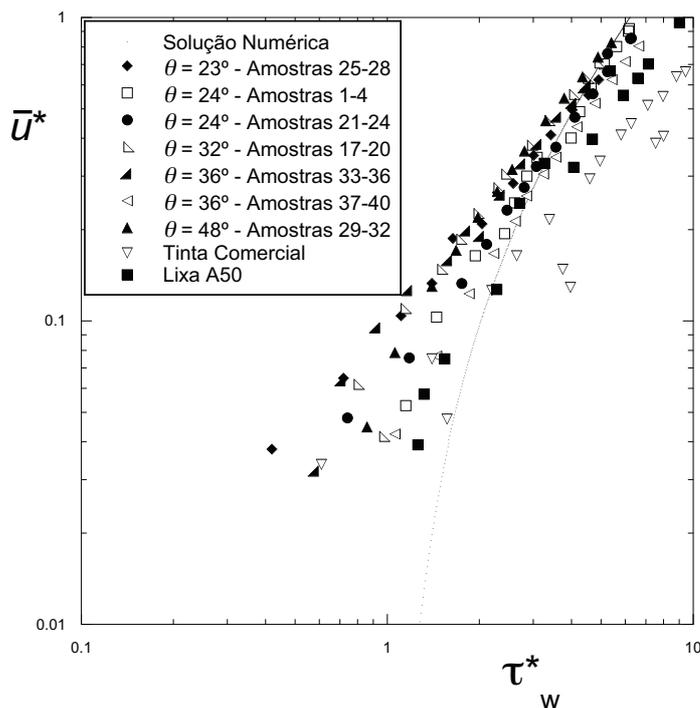


Figura 4.7: Velocidade média adimensional x Tensão cisalhante adimensional na parede – Efeito do ângulo de contato. Fluido à base de óleo. Características das superfícies na Tab. 3.2.

Portanto, mais uma vez obtemos indícios de que o ângulo de contato por si só não correlaciona bem o nível de deslizamento, sugerindo que outros parâmetros, não controlados no presente experimento, também influenciam o fenômeno.

Uma outra possibilidade para explicar o fato de não termos conseguido observar uma correlação entre o deslizamento e a molhabilidade seja a natureza do fluido à base de óleo utilizado, que consiste basicamente de um fluido de perfuração composto por partículas sólidas em suspensão. Talvez em alguns casos tenha ocorrido mudança da reologia ao longo dos experimentos, o que também explicaria que alguns dos resultados tenham caído abaixo da curva teórica.

Mas, de qualquer forma, podemos ver claramente que as amostras sem tratamento apresentam nível de deslizamento inferior, e que as amostras 17-20 ( $\text{CF}_4 + \text{H}_2$ ), 25-28 (Ar), 29-32 ( $\text{SF}_6$ ) e 33-36 ( $\text{CF}_4$ ) apresentam nível de deslizamento superior.

## 4.2

### Medição da Aderência da Parafina

Com o auxílio do novo acessório para o reômetro ARES, determinamos a tensão cisalhante de descolamento para cada um dos revestimentos, seguindo o procedimento descrito no Capítulo 3.

#### 4.2.1

##### Resultados sem Pré-aquecimento das Placas

Na Figura 4.8 encontram-se os resultados das medidas de tensão limite de descolamento de parafina efetuadas nas placas listadas na Tab. 3.1. Além destas, testamos também uma placa de teflon fabricado pela 3M.

Nestes testes, a parafina fundida a 60°C era vertida para dentro do anel sobre a placa que estava à temperatura ambiente.

Pelos resultados da Fig. 4.8 podemos constatar que as placas 06 e de teflon 3M foram as que apresentaram os maiores valores de tensão de descolamento de parafina, enquanto que a placa de aço inox (placa 03) foi a que apresentou o menor valor.

Esses resultados indicariam que baixos ângulos de contato da água com o revestimento (ver Tabela 3.1) correspondem a baixas tensões de descolamento, enquanto que altos valores de ângulo de contato da água com o revestimento correspondem a altos valores de tensão de descolamento. Esta tendência é oposta à esperada, e por isso suspeitamos que a transferência de calor na placa, diferente para as diferentes placas por causa das diferentes condutividades térmicas, poderia estar causando tensões térmicas que descolariam a parafina, total ou parcialmente, antes do teste propriamente dito. Por esse motivo resolvemos passar a pré-aquecer as placas à mesma temperatura da parafina fundida, isto é 60°C. Estes novos testes são descritos na próxima seção.

#### 4.2.2

##### Resultados com Pré-aquecimento das Placas

Na Figura 4.9 encontram-se os resultados das medidas de tensão limite de descolamento de parafina efetuadas nas placas entregues pela USP na segunda remessa. Nesse caso, a medida da tensão de descolamento de parafina foi efetuada com um procedimento modificado em relação ao procedimento anterior. A diferença desse novo procedimento adotado foi que as placas foram previamente aquecidas, em uma estufa, a 60°C, em seguida montadas rapidamente no reômetro. Imediatamente após a montagem da placa no reômetro, o anel era colocado sobre a placa e a parafina fundida a 60°C vertida dentro dele. Esperávamos então a ocorrência da solidificação e do resfriamento até

a temperatura ambiente. Comparando os resultados obtidos com os ângulos de contato medidos pela USP podemos constatar uma tendência inversa. A placa com maior tensão de descolamento de parafina (tinta comercial) não teve o seu ângulo de contato medido, mas a placa com segunda maior tensão de descolamento (placa 21-24) corresponde ao menor ângulo de contato com a água. Já as placas com maiores ângulos de contato com a água (17-20, 29-32, 37-40) apresentaram as mais baixas tensões de descolamento com a parafina, indicando que é preciso pré-aquecer as placas para obtermos resultados coerentes.

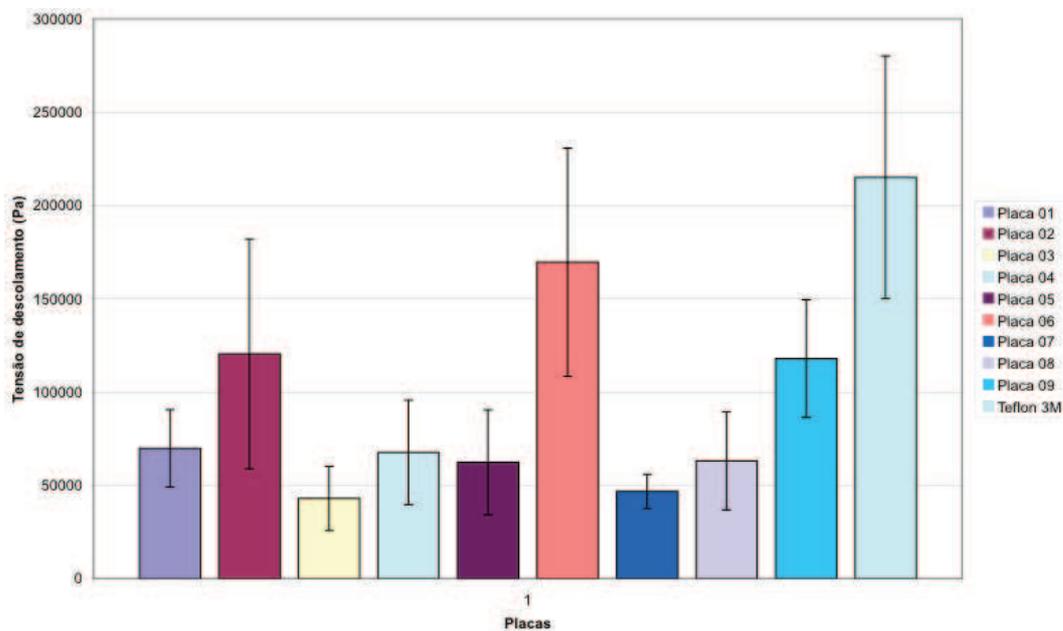


Figura 4.8: Tensão de Descolamento de Parafina (Pa) - Primeira remessa de placas sem pré-aquecimento.

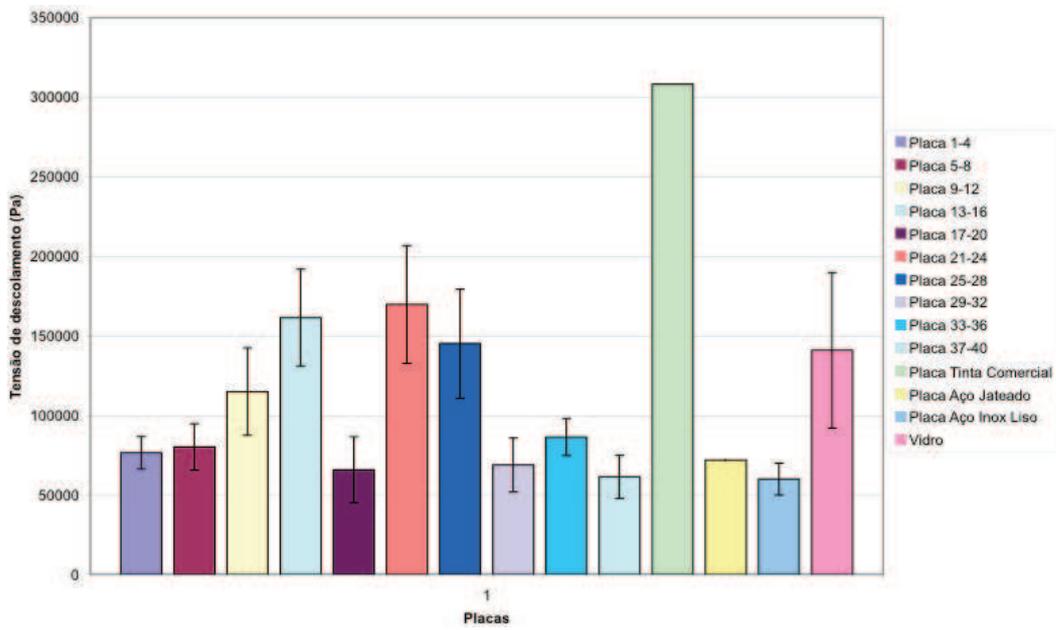


Figura 4.9: Tensão de Descolamento de Parafina (Pa) - Segunda remessa de placas com pré-aquecimento.