

# ESTUDO DO PROCESSO DE LIQUEFAÇÃO DO HIDROGÊNIO

## PARTE I: ENSAIO TERMOMÉTRICO COM VÁLVULAS J-T

Débora Salomon Marques<sup>1</sup> (*deborasalomon@gmail.com*), Ennio Peres da Silva<sup>1,2</sup> (*lh2ennio@ifi.unicamp.br*)

1. Laboratório de Hidrogênio, Departamento de Física Aplicada, IFGW, UNICAMP, Campinas-SP.

2. Prof. Dr. / Orientador.

Instituição de fomento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP

Palavras-chave: Hidrogênio Líquido - Efeito Joule-Thomson - Criogenia

### INTRODUÇÃO

Esse trabalho integra os estudos do Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP sobre os métodos de armazenamento do hidrogênio, constituindo-se no primeiro ensaio para a liquefação desse gás. Nesse trabalho, foi estudado o efeito Joule-Thomson, fenômeno termodinâmico que consiste no resfriamento ou aquecimento de um gás durante uma expansão isentálpica. O trabalho consistiu em dimensionar e construir um sistema de expansão e obter dados de temperatura, pressão e vazão para três gases: N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>, tendo como objetivo entender a correlação entre esses parâmetros para a posterior construção de um sistema de liquefação de hidrogênio.

### METODOLOGIA

A partir de estudos teóricos de termodinâmica, criogenia e segurança foram projetados e construídos os arranjos experimentais que em sua versão final consistiu em uma válvula reguladora de pressão, uma válvula agulha, um manômetro, um trocador de calor tipo casca e tubo, a válvula J-T (disco de aço inox com um furo para expansão do gás - Fig. 1), um rotâmetro e 4 termopares conectados a uma placa de aquisição de dados em um computador.



Fig. 1: Montagem da válvula J-T. O disco com furo de 0,3 mm de diâmetro é colocado dentro de um porta filtro para ser anexado adequadamente ao sistema.

Os arranjos foram testados inicialmente com ar comprimido, o que permitiu vários aperfeiçoamentos. Esse sistema é conhecido como sistema de Hampson (Fig. 2 e 3). O experimento consistiu em estabelecer uma diferença de pressão na válvula J-T e observar a diferença de temperatura, bem como o tempo para o sistema entrar em equilíbrio. À montante da válvula era estabelecida uma pressão a partir do próprio cilindro de gás, e à jusante o sistema estava aberto à atmosfera. Para o H<sub>2</sub> foi necessário resfriar o gás com N<sub>2</sub> líquido, pois à temperatura ambiente esse gás está acima da temperatura de inversão. Os dados foram obtidos pelo software LabVIEW e tratados no software Origin.



Fig. 2: Sistema operando com H<sub>2</sub> passando por N<sub>2</sub> líquido para reduzir a temperatura do gás antes da expansão (acima).



Fig. 3: Versão do sistema de Hampson com trocador de calor tipo casca e tubo (esquerda).

### RESULTADOS

Em cada experimento regulava-se o fluxo para três valores distintos de vazão, e observou-se que quanto maior a vazão, maior a queda de temperatura para o N<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub> (Fig. 4), o que implica que cada vazão corresponde a uma pressão (pois quanto maior a pressão, maior é a queda de temperatura). Para o H<sub>2</sub> ocorreu o aquecimento na expansão até o momento em que o gás atingiu a temperatura de inversão e iniciou o resfriamento.

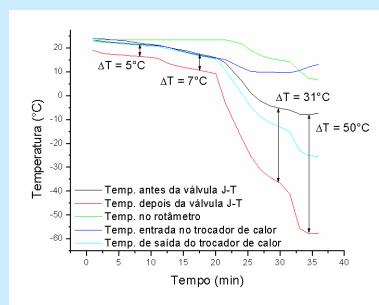


Fig. 4: Gráfico dos dados coletado durante experimento com CH<sub>4</sub> com ênfase na redução de temperatura na válvula J-T.

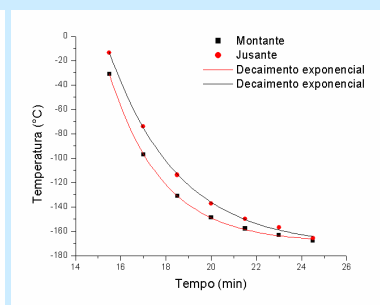


Fig. 5: Comportamento da temperatura ao longo do tempo para o H<sub>2</sub>. O processo leva alguns minutos para entrar em equilíbrio térmico.

Observou-se que em geral o comportamento da temperatura ao longo do tempo era um decaimento exponencial (Fig. 5). Como se trata de um fenômeno real, que não é quase-estático, há um intervalo de tempo até que o sistema entre em equilíbrio, e nem sempre é possível atingir o equilíbrio devido à limitação de gás no cilindro. Nesse caso foi possível extrapolar a função a partir das tendências observadas experimentalmente. É possível prever a queda da temperatura a partir do coeficiente de Joule-Thomson, dado por:  $\mu = (\Delta T/\Delta P)_H$ .

### CONCLUSÕES

Quanto menor o furo, menor a vazão e maior a pressão fornecida ao sistema. O efeito é maior quanto maior a diferença de pressão. Para calcular o coeficiente de Joule-Thomson é necessário esperar até que o sistema entre em equilíbrio térmico, ou extrapolar os valores obtidos experimentalmente para obter o valor efetivo de variação de temperatura (Fig. 6). Quanto maior a massa do sistema, maior a inércia térmica que aumenta o tempo que a temperatura leva para entrar em equilíbrio. As trocas térmicas são maiores quanto menor for a vazão.

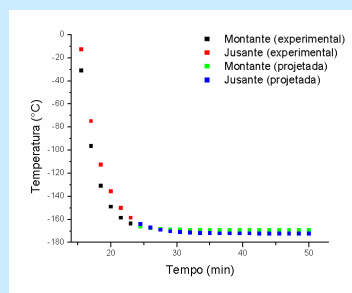


Fig. 6: Dados da temperatura do H<sub>2</sub> extrapolados para verificar o tempo de equilíbrio e a diferença efetiva de temperatura.

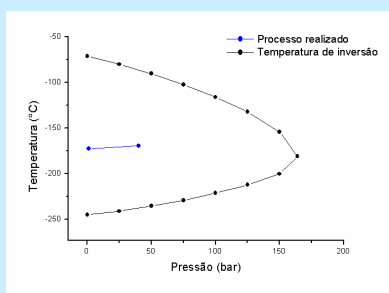


Fig. 7: Processo termodinâmico realizado com H<sub>2</sub> em relação à sua curva de inversão (Ref. Perry's Chemical Engineers Handbook).