

PROBLEMA DE STEFAN EM COORDENADAS CARTESIANAS**Felipe Neri Potrich, Sandi I. S. De Souza**URI, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Rua Universidade das Missões, 464, CEP 98802-470 SANTO ÂNGELO -RS
E-mail: potricao@yahoo.com.br**Introdução**

A solidificação e a fusão são de vital importância para as indústrias que se utilizam de processos metalúrgicos de fabricação. Pois a grande maioria dos produtos industrializados, metálicos e não metálicos, que sofrem algum processo de conformação passam em algum estágio de sua fabricação pelos processos de fusão e solidificação. Como principal exemplo dos processos industriais tem-se a fundição que tem como objetivo fundamental dar forma adequada a um sólido, vertendo-o em estado líquido para o interior da cavidade de um molde. O conhecimento do mecanismo de troca térmica durante a solidificação e fusão também é importante no desenvolvimento de projetos otimizados de armazenadores de energia nas formas sensível e latente, e em sistemas de isolamento térmico dinâmico. Este último ocorre quando são utilizados materiais de mudança de fase (MMF), com temperatura de fusão próxima da temperatura ambiente, como um acréscimo à resistência na passagem de energia térmica. Neste sistema, o MMF utiliza energia incidente em uma das faces para mudar de fase sem conduzir esta energia para outra face, pois o processo ocorre à temperatura constante para substâncias puras, e a transferência ocorre por condução devido ao desequilíbrio de energia sensível (temperatura). Após cessar a fonte de energia térmica, que pode ser os raios solares, o sistema emite essa energia de volta ao ambiente retornando ao estado inicial fechando o ciclo. Stefan (1891) foi um dos pioneiros na abordagem do problema de transferência de calor nos processos de fusão e solidificação. Em sua abordagem Stefan considerou que a transferência de calor ocorreria de forma unidirecional, desde uma superfície com temperatura superior a temperatura de fusão do material de mudança de fase (MMF), e por meio de hipóteses considerou que a transferência de calor só ocorreria por meio de difusão, desconsiderando a existência e interferência dos gradientes de densidade e conseqüentemente o desequilíbrio entre as forças viscosas e de empuxo que originam a convecção natural. A solução de Neumann (1860), é outra abordagem clássica da transferência de calor durante os processos de fusão ou solidificação. Esta abordagem, mesmo sendo antecessora é mais evoluída, do ponto de vista técnico, do que a abordagem proposta por Stefan. Ela não utiliza a condição inicial simplificadora no qual o domínio se encontra na temperatura de fusão no início do processo de fusão ou solidificação, sendo assim mais realista. Nesta abordagem clássica ocorre a transferência de calor em ambas as faces da fronteira de mudança de fase, líquido e sólido. O sentido do fluxo de energia depende do processo ser de fusão ou de solidificação. Do ponto de vista matemático, o problema de Neumann é mais extenso, mas com um grau de complexidade muito semelhante ao problema de Stefan.

Os processos de transferência de calor nos problemas de mudança de fase em geometria cartesiana são governados pelas equações da continuidade, da quantidade de movimento, (equações de Navier – Stokes) e pela equação da energia, que é obtida pelo balanço de energia para o sistema de coordenada cartesiana segundo Ozisik (1990), Incropera (1998), Bejan (1984), e ainda Van Wylen (1998).

Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo obter a solução matemática para o problema de Neumann em coordenadas cartesianas, utilizando para isto o programa computacional IHT. O referido problema consiste em um bloco de parafina, submetido a condições de contorno de primeira espécie. São determinados o fluxo de energia na fronteira do domínio e a evolução da fronteira de mudança de fase no interior do domínio, para diversos períodos de tempo. Isto possibilita quantificar as parcelas de energia doada e armazenada nas formas latente e sensível durante o processo. Este problema caracteriza-se como um isolamento térmico dinâmico.

Metodologia

Serão desenvolvidas simulações para a mudança de fase da parafina, envolvendo fusão parcial com ressolidificação, para geometria cartesiana, em forma transiente. Será utilizado o método dos Volumes Finitos para a solução das equações diferenciais governantes. As soluções apresentadas, otimizadas quanto às malhas espacial e temporal, envolvem condições de contorno de primeira espécie. Como resultados das simulações serão apresentados os comportamentos da evolução geométrica da fronteira de mudança de fase, dos campos de temperatura e densidade. O volume de material fundido e seu comportamento com o tempo também serão avaliados.

Resultados

Segundo Ho e Chen (1986), para números de Rayleigh menores do que 10^5 o processo pode ser considerado difusivo puro situação na qual a convecção natural, originada dos gradientes de massa específica e que são geradoras das forças de empuxo, estão em equilíbrio com as forças viscosas. Para esta situação a solução do problema torna-se “menos” complexa, pois apenas os termos difusivos são considerados sem necessidade de resolver o acoplamento pressão, velocidade e temperatura.

A solução da equação da energia fica assim reduzida à equação da difusão. Com a sua solução tem-se o campo de temperatura no domínio, enquanto que a identificação da posição da fronteira de mudança de fase e seu comportamento transiente são impossíveis de determinar, pois para uma substância pura a temperatura é constante na região de mudança de fase. Para contornar este fato reescreve-se a equação da energia utilizando a definição de temperatura de Kirchoff o que nos permite escrever a equação da energia tendo a propriedade termodinâmica entalpia como variável e que não é constante durante a mudança de fase possibilitando determinar através do comparativo entre a energia latente do MMF e o campo de entalpia do domínio determinar a posição e a evolução da frente de Mudança de Fase, segundo Souza (2003).

Conclusão

No processo de fusão existem três regiões distintas que são a região líquida, a região sólida e a região de interface onde ocorre a mudança de fase, sendo que cada região possui propriedades termofísicas diferenciadas. Sendo uma das características dos problemas de mudança de fase. Com a identificação da posição da fronteira de mudança de fase, tem-se condições de avaliar a quantidade de material fundido ou solidificado e que em conjunto com o conhecimento do campo de entalpia quantificar a energia doada ou retirada. Sabendo-se que o campo de entalpia pode definir o campo de temperatura que nos possibilita avaliar a taxa de transferência de calor.

O emprego da simulação numérica permitiu avaliar o comportamento do fenômeno com a mudança das condições de contorno. A inserção de condições de contorno convectivas e de fluxo prescrito enriquecem o problema, do ponto de vista científico. Soluções desta classe de problemas normalmente se restringem a utilização de condições de contorno de primeira espécie, temperatura prescrita na fronteira.

Referências Bibliográficas.

- Incropera, Frank P. e David P. DeWitt, 1998, “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, LTC, (Livros Técnicos e Científicos). 4ª edição. Rio de Janeiro, RJ.
- Ozisik, M. Necati, 1990, “Transferência de Calor um Texto Básico”, Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro, RJ.
- Souza, Sandi I. S., 2003, “The Water Melting and Solidification Considering the Natural Convection In Polar Geometry”, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica COBEM-2003, São Paulo, SP.
- Van Wylen, Gordon J., 1998, “Fundamentos da Termodinâmica”, Edgard Blucher LTDA. 5ª edição, São Paulo, SP.