

APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS NUMÉRICAS NO PROJETO DE COMPRESSORES PARA REFRIGERAÇÃO

Fabian Fagotti e Rinaldo Puff

Embraco S. A. - GTPP

Rua Rui Barbosa, 1020, 89.219-901, Cx. P. 91, Joinville SC

RESUMO

O projeto ótimo de compressores requer análises em diversos campos de conhecimento, além de ser restrito por várias condições de contorno não necessariamente relacionadas ao ótimo de componentes isolados. O uso de programas de simulação tem mostrado ser uma ferramenta de projeto extremamente útil, tanto no teste de hipóteses prévio à construção de protótipos, a qual demanda muito tempo e tem alto custo. Este artigo descreve programas de simulação e abordagens teórico-experimentais usadas na Embraco para o projeto de compressores herméticos alternativos de refrigeração. Mais especificamente, o escopo se restringe a problemas de escoamento e transferência de calor, bem como alguns tópicos correlatos, em especial questões ligadas a ruído, a projeto de motores e ao sistema de refrigeração em si.

INTRODUÇÃO

Em um ramo industrial com alto nível de competição, como é o caso da área de refrigeração, o contínuo desenvolvimento tecnológico tem papel capital na sobrevivência das empresas. Devido à ampla atuação em mercados globais, via de regra extremamente exigentes quanto a aspectos de qualidade e inovação, a consciência e preocupação com tal realidade é fator que tem delineado o papel de liderança que a Embraco desempenha no ramo de compressores para refrigeração.

Diversas facetas do processo contínuo de capacitação tecnológica que têm lugar na empresa poderiam ser objeto desta explanação. No entanto, o escopo do aqui apresentado restringe-se aos tópicos relativos ao desenvolvimento de novos produtos e otimização dos atuais, em um cenário típico de pesquisa aplicada. Especificamente, versa-se sobre o desenvolvimento de ferramentas numéricas para o projeto de produtos. Obviamente, isto não descarta a importância de incursões no campo da pesquisa básica, até como parte imprescindível do processo de formação de massa crítica. Neste cenário, ressalta-se o quão profícuos tornaram-se os convênios de cooperação técnico-científica firmados com universidades.

É importante ressaltar que, com o presente trabalho, não se pretende exaurir o assunto do desenvolvimento tecnológico na Embraco. Diversos campos, também de suma importância, não são aqui abordados ao bem da concisão. Exemplos destes

são as áreas de engenharia de materiais, processos de fabricação, etc.

São descritas brevemente as principais ferramentas computacionais desenvolvidas e utilizadas para projeto. A maior parte é composta por códigos numéricos elaborados a partir de trabalhos de pesquisa próprios ou em conjunto com universidades. Relata-se a aplicação de técnicas como volumes finitos e elementos finitos na solução de problemas de engenharia, seus campos de abrangência e resultados obteníveis. Também são apresentados os programas de simulação utilizados para previsão de características de funcionamento global do compressor, bem como de componentes específicos, como mancais, válvulas, filtros acústicos, etc. As análises factíveis com tais programas cobrem ampla gama de problemas físicos que têm lugar em compressores herméticos alternativos para refrigeração. A utilização destes habilita a previsão de todas as principais características de funcionamento, além de viabilizar a geração de dados importantes para o dimensionamento dos componentes e otimização, tanto no que tange à eficiência quanto a questões como custo, confiabilidade e ruído. Elucidam-se as relações de dependência entre os diversos códigos computacionais com dados experimentais e avaliações obtidas por outros meios, como via sistema de projeto assistido por computador (CAD), descrevendo-se as interfaces para entradas e saídas de dados. As técnicas experimentais e os aparatos necessários para tal são descritos sucintamente. Em todos os casos evidenciam-se os resultados passíveis de serem obtidos, assim como breve relatos do histórico do desenvolvimento.

FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS VERSUS TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Os métodos e ferramentas aqui apresentados aplicam-se, via de regra, a qualquer tipo de compressor, levando-se em conta as devidas adaptações. No entanto, faz-se referência principalmente a compressores herméticos alternativos para refrigeração, por ser este o principal produto da Embraco.

Os programas de simulação e as bancadas e técnicas experimentais são, na sua quase totalidade, desenvolvidos na própria empresa ou em convênios com universidades, nos quais os pesquisadores da primeira têm papel ativo. Tal postura justifica-se por dois fatos. Primeiro, as aplicações são bastante específicas, impossibilitando, na maioria dos casos, a mera aquisição de um programa ou aparato comercialmente disponível. Além disto, e mais importante, há uma preocupação bastante grande concernente à formação de massa crítica na empresa. Entende-se que esta é a maneira mais produtiva para se fazer o aporte de tecnologia, evitando-se o uso de ferramentas tipo "caixa-preta". Na decisão da empresa em internacionalizar-se, tornou-se patente a necessidade do domínio pleno das tecnologias necessárias para se assumir um papel de liderança, cenário no qual a estratégia adotada foi de veras profícua.

O interesse pela simulação surgiu da defasagem que se observava entre o conhecimento teórico e o empírico no ramo de compressores. Tem-se claro, todavia, que ferramentas computacionais não substituem o uso de técnicas experimentais em muitos casos. O resultado do uso conjunto de ambas é sabidamente proveitoso, já que um meio sempre supre as deficiências do outro. Com a aplicação de métodos numéricos para solução de problemas de engenharia (CAE) existe sempre a dúvida do quão aproximado o modelo matemático está da realidade. Estas ferramentas são, contudo, muito mais proficientes no que tange à maleabilidade na alteração de condições de contorno para a análise e à quantidade de dados gerados, o que contribui de veras no entendimento dos fenômenos físicos. Obviamente, neste aspecto o principal impacto é tornar mais proficiente o uso de dados experimentais e, assim, evitar-se o desenvolvimento via tentativa-e-erro.

OTIMIZAÇÃO

De um modo geral, a otimização de um compressor ou de componentes do mesmo deve levar em conta quatro variáveis principais: eficiência, nível de ruído, confiabilidade e custo. Dependendo do mercado a que se destina o produto, o peso de cada uma destas na função-objetivo varia o seu valor, levando a diferentes soluções de compromisso. Devido aos fortes vínculos entre tais vetores, deve-se sempre ter em conta que um ganho em qualquer dos aspectos habitualmente vem acompanhado de substanciais alterações nos outros. Além disto, outros aspectos, a priori secundários, podem ser variáveis desta função, ou mesmo restrições no processo de otimização. Exemplos disto são a mínima tensão de partida, a curva de tombamento e o nível de circulação externa de óleo, entre outras. Um exemplo de problema de otimização é apresentado por de Bortoli e Puff (1998).

Nas seções seguintes são elucidadas as abordagens dadas aos diversos componentes. Embora, ênfase seja dada a

aspectos de escoamento e transferência de calor, mais importantes quando se trata da eficiência, outros aspectos são também tratados superficialmente, de modo a se dar um panorama geral das inter-relações.

MOTOR ELÉTRICO

Este componente sempre merece especial atenção, tendo-se em vista a combinação das eficiências deste e da bomba mecânica resultar na eficiência global do compressor. Além disto, diversos outros aspectos da funcionabilidade do mesmo são determinados pelo correto dimensionamento do componente, isto sem se contar o grande peso do mesmo em termos de custo.

A avaliação dos campos magnéticos pode ser feita com o auxílio de um programa que use técnicas de elementos finitos comercialmente disponível (no caso, o ANSYS), já que o desenvolvimento deste tem caráter de aplicação geral. Basicamente os dados de entrada são a geometria do motor e as características dos materiais. Todavia certas características funcionais, como torques de partida e tombamento, ou limitantes de projeto, como a saturação magnética e dimensionamento da bobinagem, são melhor avaliadas com o uso de códigos específicos. No caso, este programa foi desenvolvido com auxílio de consultoria externa. Outros aspectos têm sido analisados em convênios com universidades, principalmente na análise de conceitos alternativos ao do motor de indução tradicional. O programa utiliza um método analítico, baseado na solução de um circuito elétrico equivalente detalhado. Os dados de entrada são a geometria das lâminas, características dos materiais, restrições dadas pelas dimensões comercialmente disponíveis dos condutores e condições ambientais para se avaliar o desempenho em função da solicitação (torques, potências e rendimentos). Certos dados empíricos são necessários, cuja correta avaliação depende substancialmente do conhecimento dos processos de fabricação (por exemplo, o "fator de enchimento" das ranhuras que é factível).

A validação dos resultados obtidos numericamente é feita fazendo-se uso de um dinamômetro, no qual podem ser definidas todas as condições de contorno encontradas na aplicação real, e com o qual podem ser obtidos os valores efetivos de torque e eficiência dos motores.

ANÁLISE ESTRUTURAL

Cada vez mais são requeridas nos produtos características de pequeno tamanho e peso, sendo isto especialmente válido para compressores. Tal fato, aliado à constante necessidade de redução de custos, confere extrema importância à otimização estrutural, o que implica componentes cada vez mais leves e menores, ou seja, com coeficientes de segurança de projeto cada vez mais baixos. O uso de técnicas numéricas, como as derivadas do método dos elementos finitos (FEM), é portanto fundamental para o correto dimensionamento dos componentes, partindo-se da necessidade de um profundo conhecimento das distribuições de tensões que nestes têm lugar.

Fazendo menção em aprimorar os seus conhecimentos na técnica citada, celebrou-se em 1986 o primeiro convênio

envolvendo a Embraco e a FEJ (Faculdade de Engenharia de Joinville); vide Heinzelmann (1989). O objetivo inicial era de formar um grupo de pessoas com massa crítica no assunto. Como forma de sedimentar os conhecimentos, aconteceu posteriormente a utilização do método no auxílio da solução de alguns problemas específicos. A principal limitante para a solução de problemas nesta época era a parca capacidade de memória e baixa velocidade dos computadores disponíveis. Numa etapa seguinte, já com recursos computacionais mais avançados, como um computador próprio para o setor de pesquisa, um sistema CAD com capacidade de modelamento tridimensional e terminais com recursos gráficos, optou-se por se desenvolver um programa próprio, de propósito geral, denominado DOCTUS. Este contempla a solução de problemas lineares com uso de elementos de viga, casca e elasticidade (bi e tridimensionais).

Em se formando a massa crítica, e com o desenvolvimento desmedido dos meios comercialmente disponíveis, foi decidida a descontinuação do desenvolvimento do *software* de caráter geral e a sua substituição por um outro, adquirido de terceiros (ANSYS). Este inclui, adicionalmente ao disponível no DOCTUS, a análise não-linear, além da possibilidade de solução de problemas acústicos, de transferência de calor e eletromagnéticos. Outras vantagens observadas dizem respeito à maior facilidade de integração com sistemas CAD (via IGES) e no tempo dispendido na

geração de malhas. O principal motivo desta decisão foi que não se justificava o investimento no desenvolvimento de novos elementos e abordagens teóricas, tanto economicamente quanto em termos de desenvolvimento.

Há de se ressaltar que a decisão de se desenvolver um *software* próprio trouxe muita vantagem no que tange à capacitação no se avaliar outros programas e usá-los de maneira adequada. Alguns problemas específicos, todavia, continuaram a ser tratados com o uso de programas próprios, principalmente quando se usa o FEM em conjunto com outros programas de simulação, o que via de regra significa uma agilidade maior em termos de interface e, principalmente, maiores velocidades de computação, em função de se usar rotinas dedicadas. Vide, por exemplo, Fagotti et al. (1996). Esta disponibilidade também justifica sobremaneira o investimento em capacitação feito segundo a estratégia inicial.

A figura (1) mostra um exemplo de resultado de uma análise de tensões.

Métodos experimentais também são muitíssimo importantes na avaliação estrutural de componentes, por isto foram desenvolvidos internamente testes de fadiga, além de medições de frequência natural e modos de vibração, rigidez de estruturas e técnicas de extensometria para medição de tensões. Estes dados são usados, via de regra, para validação dos resultados obtidos quando do uso da técnica numérica.

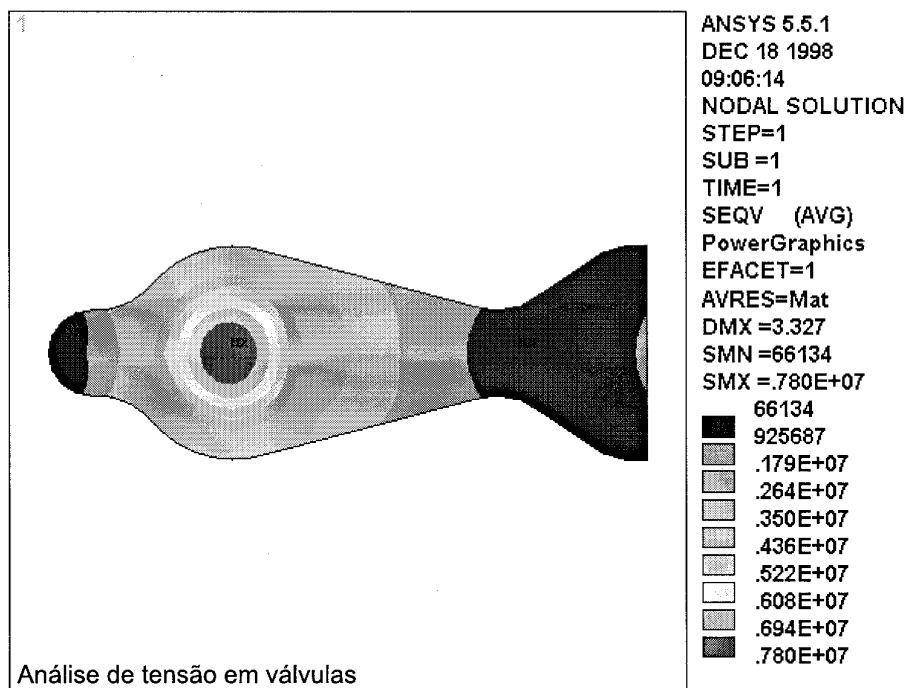


Fig. 1 - Análise de tensões em uma válvula de compressor

SIMULAÇÃO DE MANCAIS

Surgido do convênio com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), teve início com diversos trabalhos conjuntos (p. ex., Manke et al., 1993). Com o *software* derivado, computam-se a distribuição de pressão, a vazão de lubrificante, a trajetória do eixo no mancal ao longo do ciclo e a potência dissipada no mancal por atrito viscoso. Os dados de entrada são as características geométricas, as propriedades físicas do óleo e a condição de operação do compressor, com o carregamento sendo avaliado internamente ao próprio programa. Usando-se a teoria da lubrificação hidrodinâmica na formulação do problema, este é resolvido aplicando-se o método dos volumes finitos à equação de Reynolds resultante. Existem versões para mancais curtos e finitos, radiais e axiais, além do que prevê-se tanto o funcionamento em regime laminar quanto turbulento. A determinação da fronteira de cavitação do óleo também faz parte do problema. Ainda há a possibilidade de se considerar os mancais isoladamente ou como parte de um sistema acoplado.

O cálculo da potência dissipada nos mancais é importante na avaliação da eficiência do compressor, já que é o fator preponderante no cômputo das perdas mecânicas. A determinação da trajetória do eixo no mancal é relevante sob o aspecto de confiabilidade, sendo a folga mínima admissível no ciclo um parâmetro de projeto bem estabelecido no desenvolvimento de projetos na empresa.

A figura (2) apresenta um exemplo de trajetória típica do eixo no interior do mancal com o compressor em funcionamento em condição de carregamento extremo. O raio da trajetória é adimensionalizado em relação à folga radial do mancal.

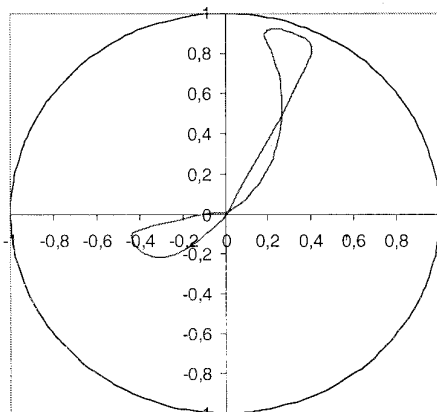


Fig. 2 – Trajetória do eixo no mancal

A validação dos resultados é feita experimentalmente, com o uso de uma técnica para avaliação de perdas mecânicas desenvolvido na própria empresa (p. ex., Lillie e Krueger, 1990). Tal técnica permite ainda a comparação de mancais de diversos tipos (rolamento, com anéis antifricção, hidrodinâmicos, etc.). Para isto, pode-se utilizar tanto o princípio de medição via transdutor de torque quanto o de avaliar as perdas por meio da medição da desaceleração do conjunto.

SIMULAÇÃO DO MOVIMENTO SECUNDÁRIO DO PISTÃO

Para análise de questões relativas à confiabilidade, dissipação viscosa e vazamento pela folga entre pistão e cilindro, foi desenvolvido um programa para cálculo da trajetória do pistão na direção transversal ao eixo do cilindro (Prata et al., 1998). Este também utiliza uma formulação de volumes finitos para cálculo da folga (dada pela inclinação do pistão no cilindro ao longo do ciclo), pela solução da equação de Reynolds resultante. Também são avaliadas a potência dissipada e a vazão de fluido lubrificante pela folga. A equação de Reynolds é resolvida em conjunto com as equações da dinâmica do pistão, em regime transiente. Diversos erros de forma e de posição dos componentes podem ser considerados, o que implica a solução de um problema cujo modelo é bastante próximo do real. Dados a respeito do vazamento pela folga pistão/cilindro e do movimento são obtidos com aparatos desenvolvidos na própria empresa (p. ex., Ferreira et al., 1984).

A figura (3) mostra um exemplo de resultado obtível com este programa.

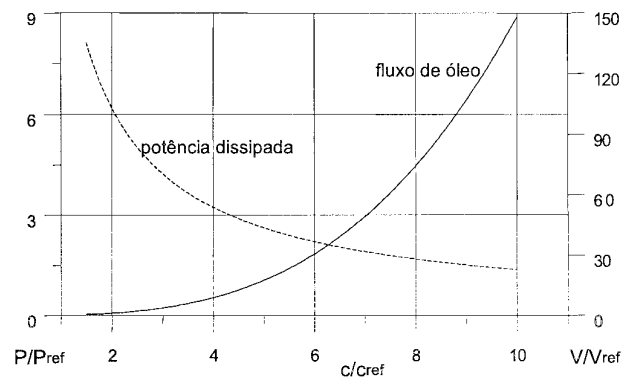


Fig. 3 – Potência dissipada e vazamento médios no ciclo em função da folga (valores adimensionalizados)

A maior deficiência deste programa diz respeito à previsão do vazamento de refrigerante, já que isto exige o modelamento do escoamento bifásico da mistura deste com o óleo. Nesta área, todavia, já se fazem alguns esforços no sentido de modelá-los.

PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE FUNCIONAMENTO

Este programa teve por origem uma dissertação de mestrado no âmbito do convênio Embraco/UFSC. Tal trabalho representou o primeiro passo no estabelecimento dos vínculos com a UFSC, numa época na qual o principal intuito era de formação e desenvolvimento de massa crítica. Obviamente, desde então, diversas melhorias e adequações vêm sendo implementadas no modelo (vide, p. ex., Fagotti, et al., 1994). Usam-se como dados de entrada as características geométricas da bomba, características das válvulas (áreas efetivas de força e escoamento, rigidez e frequência das palhetas, coeficiente de amortecimento, etc.), tipo de gás, velocidade angular do motor e condições de funcionamento (temperaturas de evaporação, condensação, subresfriamento, superaquecimento,

entrada no compressor e outras ao longo do compressor). Como saída, calculam-se perdas de massa e potência discretizadas, capacidade de refrigeração, consumo, eficiências, movimento das válvulas, fluxos de massa e energia, pressão e temperatura no cilindro e pressão nas câmaras de sucção e descarga (todas discretizadas ao longo do ciclo), diagrama pressão versus volume e parâmetros para análise energética e exergetica.

As seguintes características são modeladas no programa: deslocamento do pistão em função da velocidade instantânea do motor, processo termodinâmico no interior do cilindro, escoamento através das válvulas, dinâmica das válvulas, vazamento pela folga pistão/cilindro, pulsação do gás nos filtros acústicos, relação torque-potência-eficiência para o motor e simulação de mancais (usando aproximação de mancais curtos ou dados gerados pelo programa de simulação de mancais). As equações diferenciais resultantes são resolvidas pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem ou por integração direta (Euler), interativa e iterativamente. Para o cômputo das propriedades termodinâmicas do gás são usadas interpolações de tabelas geradas com o uso do programa REFPROP, comercialmente disponível. O movimento das válvulas pode ser modelado via superposição modal (macro-elementos), via modelo massa-mola de um grau de liberdade ou ainda via elementos finitos, dependendo da precisão necessária ou dos dados disponíveis. Modelam-se a pulsação de gás nos dutos usando teoria acústica linear. Finalmente, os processos termodinâmicos no interior do cilindro podem ser descritos via modelo politrópico ou via primeira lei da termodinâmica. Desta forma, partindo-se de dados conhecidos ou facilmente mensuráveis, pode-se estimar com precisão as principais características de funcionamento do compressor.

A figura (4) mostra um diagrama pressão versus volume, obtido numericamente, para um compressor típico.

Também foram desenvolvidos programas para simulação de outros tipos de compressores, em convênio com a UFSC (palhetas deslizantes), em convênio com a Universidade de Purdue-EUA (pistão rolante) ou mesmo independentemente (scroll).

A comprovação experimental é levada a efeito valendo-se de diversos aparatos. Levantam-se dados relativos ao funcionamento em painel calorimétrico. Obtêm-se o diagrama pressão versus volume e o movimento das válvulas com o compressor instrumentado (valendo-se de transdutores piezoelétricos e indutivos, respectivamente), sendo os sinais tratados e processados em *softwares* desenvolvidos na própria empresa. O mesmo se dá com relação à bancada para medição de áreas efetivas de força e escoamento.

BALANÇO TÉRMICO

Também este programa teve origem do convênio Embraco/UFSC. Tem uma interface com o programa de simulação do funcionamento de compressores, o qual é utilizado para avaliação dos fluxos de energia necessários ao cômputo do balanço térmico. Utilizando coeficientes de transferência de calor, estimados experimentalmente, e a interface acima mencionada, avalia as temperaturas representativas dos diversos volumes de controle nos quais o compressor é dividido. Para o caso de um compressor alternativo, são estes: câmara de sucção, câmara de descarga, descarga, ambiente interno, cilindro, óleo, motor e carcaça. Resolvem-se as equações de balanço de energia em cada volume de controle conjuntamente, utilizando o método de Newton-Raphson.

Este programa é usado principalmente em dois casos. O primeiro ocorre quando desejam-se prever as características de funcionamento do compressor em uma condição nunca testada ou para um projeto prévio, ou seja, quando desconhecem-se as temperaturas de operação, as quais são dados de entrada para o programa de simulação de compressores. A segunda caracteriza-se quando, dada a condição de funcionamento, deseja-se saber a distribuição de temperatura, a qual tem sérias implicações em termos de desempenho e confiabilidade.

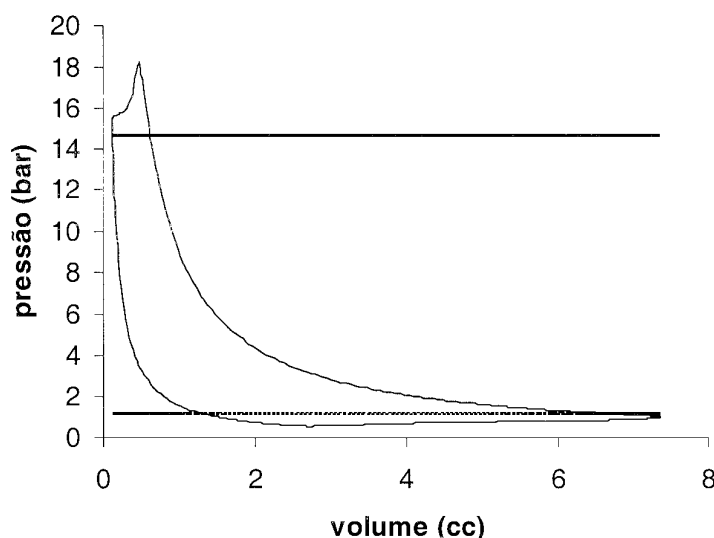


Fig. 4 – Diagrama pressão versus volume de um compressor típico

ESCOAMENTO EM VÁLVULAS

Em compressores do tipo utilizado para refrigeração e condicionadores de ar, os sistemas de válvulas são de grande importância no que diz respeito ao escoamento e à eficiência energética. Como fonte criadora de massa crítica e de técnicas avançadas de projeto destes sistemas, o convênio com a UFSC foi também de fundamental importância.

Dentre as características importantes para o bom desempenho de válvulas, as quais no caso deste tipo de compressor são automáticas, ou seja, acionadas pela própria diferença de pressão que nela se estabelece, estão as áreas efetivas de força (AEF) e de escoamento (AEE). A AEF determina a força que o escoamento que passa pela válvula exerce sobre a palheta, enquanto que a AEE é inversamente proporcional à perda de carga que a válvula exerce sobre o escoamento. Estas duas grandezas são fortemente dependentes da geometria da válvula, além de terem de ser balanceadas com outras características da válvula para o adequado funcionamento da mesma. Para sua avaliação numérica foi desenvolvido um programa que determina os campos de pressão e de velocidades do escoamento na válvula, e com uso destas informações, as áreas efetivas. O programa em questão utiliza a técnica dos volumes finitos (vide, p. ex., Deschamps et al., 1996), e permite resolver os campos para situações de escoamento laminar e turbulento, e também para palhetas inclinadas. Outra forma de avaliar as áreas efetivas é medi-las em bancada experimental.

A figura (5) apresenta um gráfico típico de valores medidos de AEF e AEE.

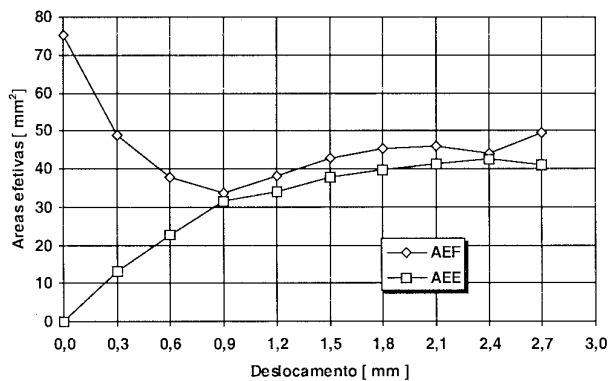


Fig. 5 – Áreas efetivas de força e escoamento de uma válvula de compressor

Outro aspecto importante de válvulas é analisar a sua dinâmica em funcionamento, ou seja, verificar como ocorrem a sua abertura e fechamento, e como se apresenta o seu movimento durante o tempo em que está aberta. O movimento da válvula é regido pela força do escoamento, e pelas características construtivas, como a rigidez e frequência natural. Estas características podem ser obtidas tanto experimentalmente quanto numericamente, fazendo-se uso de programas de cálculo estrutural via elementos finitos, citados anteriormente.

O tipo de abordagem dado ao tratamento do problema de escoamento em válvulas foi também usado na solução de

outros tipos de problemas. Por exemplo, desenvolveu-se um programa específico para análise do escoamento e dos processos de transferência de calor que ocorrem no interior do cilindro ao longo do ciclo. Um outro leva à solução do problema de escoamento nas válvulas acoplado ao que ocorre no cilindro.

Também muito utilizado na avaliação escoamentos em geral, particularmente no que tem lugar nas válvulas e filtros acústicos, é o software comercial para análise de escoamentos e transferência de calor (CFD) FLUENT. Vale ressaltar que, da mesma maneira do que ocorreu no caso de análise estrutural, muita da proficiência no uso de softwares comerciais na solução de problemas de escoamento e transferência de calor se deve à experiência passada dos usuários no desenvolvimento dos próprios programas.

SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

A partir do momento em que se inicia o desenvolvimento de um novo compressor, até o momento em que ele é lançado no mercado, diversas fases tem de ser seguidas. Uma destas fases é a de avaliação do novo produto em sistemas de refrigeração nos quais serão efetivamente aplicados. Na fase inicial do projeto, normalmente tais avaliações não podem ser feitas experimentalmente, devido à indisponibilidade de protótipos. Neste momento torna-se necessária a utilização de modelos numéricos. Dentro de um convênio de pesquisa com a UFSC, programas importantes foram desenvolvidos com a finalidade de acelerar as avaliações de compressores em sistema. Um destes programas é capaz de simular o comportamento dinâmico de refrigeradores domésticos. Para tanto, o modelo leva em consideração a presença dos seguintes componentes: condensador, evaporador, compressor hermético alternativo e um tubo capilar. O modelo pode ainda simular refrigeradores que empregam condensadores com movimentação forçada ou natural de ar. As resistências térmicas necessárias à avaliação das trocas de calor, tanto do lado interno como do lado externo dos trocadores de calor, são estimadas pelo próprio programa para cada instante de tempo. Conforme vem surgindo a necessidade, outras configurações de sistemas são modelados.

Outro programa desenvolvidos no âmbito do convênio com a UFSC faz a simulação do escoamento em tubos capilares, considerando escoamento bifásico e com condições de contorno adiabático ou com transferência de calor com a linha de sucção. Para referência destes, vide Melo et al. (1998).

Os principais experimentos na área de sistemas de refrigeração são realizados em câmaras climatizadas, no interior das quais são instalados sistemas como geladeiras e *freezers*, instrumentados, para levantamento de curvas de *pull-down*, e de temperaturas ao longo de todo o sistema, inclusive no interior do gabinete, para avaliação dos compressores instalados. Outra bancada largamente utilizada é a de teste e desenvolvimento de tubos capilares. Trata-se de uma bancada na qual podem ser instalados tubos capilares de diferentes dimensões e com diferentes características, para análise de seu desempenho em funcionamento. Obviamente, os dados gerados com tais bancadas são também utilizadas para validação dos programas supracitados.

ACÚSTICA E VIBRAÇÕES

Dispõe-se de um programa, desenvolvido internamente, para cálculo da vibração do conjunto mecânico do compressor em funcionamento. Este utiliza como dados de entrada os parâmetros geométricos (centros de gravidade, momentos de inércia, dimensões) dos componentes do compressor, suas massas, as matrizes rigidez e amortecimento das molas de suspensão e da carcaça do compressor. As grandezas relativas às molas são facilmente determináveis experimentalmente. Já os parâmetros geométricos podem ser avaliados por medição direta ou via CAD, a partir da geração no sistema dos sólidos correspondentes aos componentes. Tem por finalidade não só prever o nível de vibração do compressor, mas também, acoplado a uma rotina de otimização, avaliar as características ótimas para a suspensão e o balanceamento.

Para simulação e projeto de filtros acústicos, são utilizados um *software* comercial de análise por elementos finitos e elementos de contorno (SYSNOISE), além de diversos outros que utilizam modelos mais simplificados, estes últimos desenvolvidos na própria empresa.

Dispõe-se também de diversos programas computacionais para análise de dados experimentais. Medida a função resposta em frequência da carcaça, e conhecendo-se a sua geometria, pode-se obter os parâmetros modais (massa, rigidez, amortecimento e frequências de ressonância) e a animação dos modos de vibração. Utilizam-se também *softwares* para medição da resposta de vibração do compressor e da pulsação do gás no domínio de frequências. Para medição do nível de pressão sonora irradiado pelo compressor, utilizam-se duas câmaras acústicas reverberantes. Desenvolveu-se um programa computacional para, a partir do nível de pressão, fazer a avaliação da potência sonora em banda de 1/3 de oitava, bem

como uma análise estatística dos resultados de ruído. O mapeamento do campo acústico e a determinação da potência sonora são feitos com uso de um *software* que permite identificar regiões da fonte que mais contribuem para o ruído total irradiado. Ainda, na busca de soluções adequadas para problemas de ruído em compressores e sistemas de refrigeração, tem-se investido na área de psico-acústica, por meio da análise subjetiva de ruído e utilização de *sound quality analysis* como ferramenta de projeto. Um exemplo de problema abordado encontra-se em Baars et al. (1998).

No esforço de se conhecer melhor as fontes e caminhos de transmissão de ruído no compressor, paralelamente aos trabalhos experimentais que utilizam as técnicas acima descritas, desenvolveram-se diversos trabalhos teórico-experimentais no convênio com a UFSC.

CONCLUSÕES

Com o uso dos programas acima citados, tem-se uma economia significativa tanto em termos de custos quanto de tempo para o ciclo de desenvolvimento de produtos (originais ou derivados), em função de minimizarem-se as necessidades de testes e protótipos.

No desenvolvimento de tais programas, uma interface direta com universidades tem se mostrado de grande valia. Isto pode ser comprovado em se verificando o número de ferramentas de projetos geradas a partir destes convênios, bem como a abrangência e eficácia destas. A isto vem se somar o aspecto de geração contínua de massa crítica em campos de interesse, o qual se torna deveras agilizado.

A figura (6) resume as principais interfaces utilizadas para os diversos programas citados.

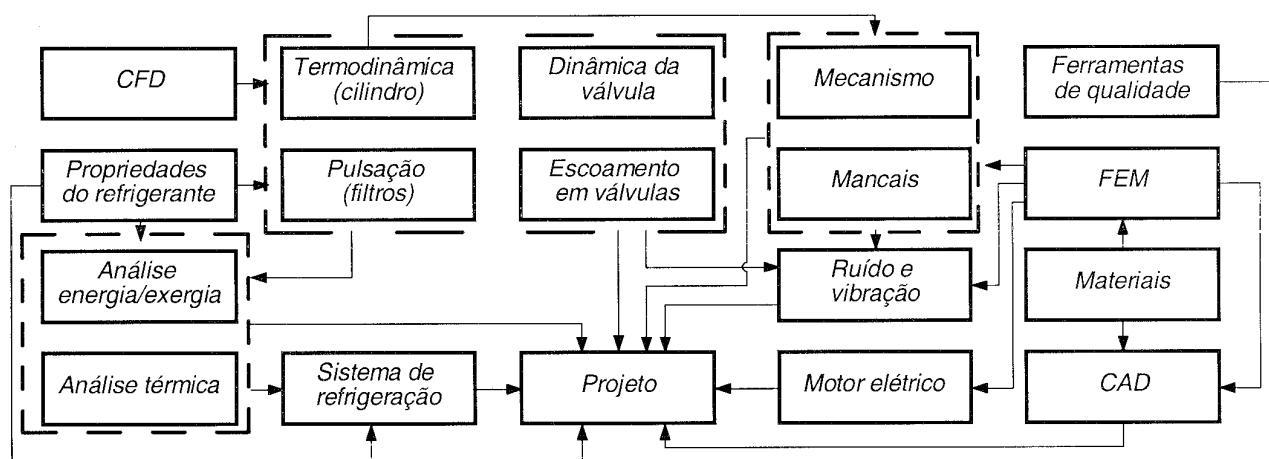


Fig. 6 – Interfaces entre alguns dos campos de conhecimento envolvidos no projeto de compressores quanto à eficiência

REFERÊNCIAS

- E., Silveira, M., Lampugnani, G. e Quarello, I., 1998, "Compressor Noise Source Identification in Low Frequency", Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, 555-560
- de Bortoli, M. G. D. e Puff, R., 1998, "Compressor Components Optimization with the Use of the Finite Element Method", Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, 679-684
- Deschamps, C. J., Ferreira, R. T. S. e Prata, A. T., 1996, "Turbulent Flow Through Valves of Reciprocating Compressors", Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, 377-382
- Fagotti, F., de Bortoli, M. G. D. e Barbieri, R., 1996, "A Finite Element Approach to Compressor Valves Motion Simulation", Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, 359-364
- Fagotti, F., Todescat, M. L., Ferreira, R. T. S. e Prata, A. T., 1994, "Heat Transfer Modeling in a Reciprocating Compressor", Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, 262-266
- Ferreira, R. T. S. e Lilie, D. E. B., 1984, "Evaluation of the Leakage Through the Clearance Between Piston and Cylinder in Hermetic Compressors", Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, 1-6
- Heinzelmann, E., de Bortoli, M. G. D., Driessen, J. L., Sangó, R. e Barbieri, R., 1989, "Relato de um Desenvolvimento Integrado em CAE/CAD", Máquinas e Metais, junho, 56-61
- Lilie, D. E. B. e Krueger, M., 1990, "Friction Loss Measurement on a Reciprocating Compressor", Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, 741-749
- Manke, A. L., Prata, A. T. e Ferreira, R. T. S., 1993, "Análise de Mancais Radiais Desalinados Considerando Efeitos de Cavitação", Anais do III Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ventilação e Condicionamento de Ar, 95-98
- Melo, C., Boabaid Neto, C., Ferreira, R. T. S. e Pereira, R. H., 1998, "Constitutive Equations for Capillary Tube Modeling", Proceedings of the International Refrigeration Conference at Purdue, 431-436
- Prata, A. T., Fernandes, J. R. S. e Fagotti, F., 1998, "Piston Lubrication Model for Reciprocating Compressors", AES - Vol. 38, Proceedings of the ASME Advanced Energy System Division, 325-332