

UMA REVISÃO DAS TECNOLOGIAS DE INTEGRAÇÃO DE DADOS EM CAD/CAM

Raimundo Ricardo Matos da Cunha

Altamir Dias

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, 88040-900, Trindade, Florianópolis-SC, Brasil. E-mail: ricardo@emc.ufsc.br; altamir@emc.ufsc.br.

Resumo

Durante as fases do ciclo de vida de um produto, a Engenharia se utiliza de ferramentas computacionais para auxiliar na execução de várias atividades do desenvolvimento de produto. Organizar e colocar disponível dados numa forma computacional abrangente, é um problema complicado de solucionar. O volume de informação, a diversidade de contextos associados e a dispersão geográfica das equipes, são barreiras que dificultam a integração das atividades. As tecnologias utilizadas para integrar sistemas computacionais de auxílio ao projeto, são conhecidas na literatura e na prática por diversas denominações. Estas tecnologias serão analisadas nesse artigo quanto à sua aplicação dentro do contexto de integração das atividades de projeto e fabricação, através da troca de dados entre sistemas CAD/CAM e outros sistemas CAX's afins. Pretende-se também verificar quais informações são relevantes e pertinentes aos sistemas CAD/CAM, e descrever o estado atual das limitações e dos recursos computacionais presentes nesses sistemas.

Palavras-chaves: CAD/CAM, Modelagem, Sistemas computacionais, Troca de dados.

1. INTRODUÇÃO

Não apenas a metodologia de trabalho, mas sobretudo as ferramentas utilizadas, influenciam a concepção e o resultado final de um produto. Na sociedade moderna, a utilização dos computadores como meio de expressão, geração e manipulação da informação, é imprescindível. No contexto do CAD/CAM, surge a necessidade pela troca de dados e compartilhamento de informação nas atividades de desenvolvimento do produto. Outro fato que evidencia esta necessidade é o modelo de trabalho atual caracterizado como sendo: corporativo, integrado, concorrente, e globalizado. Portanto, o modelo de representação e a arquitetura computacional dos sistemas deve considerar todos os aspectos da indústria e da equipe envolvida com as atividades do processo de desenvolvimento do produto. Os recursos disponíveis devem favorecer que o fluxo de atividades transcorra de forma integrada e concorrente; além de estar adaptado ao mercado globalizado, com recursos de redes computacionais (*Internet, Intranet*). Os meios para atingir este objetivo, são fornecidos pela aplicação de técnicas de Inteligência Artificial (IA), sistemas de informação, por métodos mais avançados de modelagem do produto e também pela adoção de formatos de arquivo padrão para troca de dados.

Os sistemas baseados em modelos do produto, adotam diversas arquiteturas computacionais, que fornecem diferentes métodos e tecnologias integradas para assistir o projeto, permitindo modelar tanto o produto, como também os processos de produção e fabricação e o domínio da aplicação em si. As referências (Krause *et al.*, 1993) e (McMahon e

Browne, 1998) mostram o relacionamento que existe os diversos modelos aplicados ao produto, e que constituem o seu ciclo de vida.

Os modelos do ciclo de vida do produto são agrupados em quatro categorias: *Modelos do Produto*: constituído pelos sub-modelos funcional, sólido, e de cálculo; *Modelos de Processo*: constituído pelos sub-modelos de trajetórias da ferramenta, e operacional; *Modelos de Aplicação*: constituído pelos sub-modelos de conhecimento da aplicação, e outros; *Modelos de Fábrica*: constituído pelos sub-modelos de estoque, leiaute de fábrica, planejamento, e equipamento.

Cada modelo preocupa-se em representar informações próprias do seu escopo. Por exemplo, o Modelo de Fábrica se preocupa com a fábrica e como os processos envolvidos vão se modificando à medida que o produto toma forma dentro da produção.

Modelos baseados em features de fabricação exercem um papel importante para o Modelo de Fábrica do produto, pois refletem o compromisso da fábrica em produzir certas formas especificadas na definição da feature.

Neste trabalho, algumas propostas serão comentadas e discutidas, dando especial atenção em questões relacionadas à troca e ao compartilhamento de dados e informações úteis às atividades de desenvolvimento do produto. Os pontos principais serão os novos avanços na modelagem do produto e no suporte computacional para o trabalho cooperativo.

2.0 QUADRO ATUAL DOS SISTEMAS CAD/CAM

Atualmente, os sistemas CAD/CAM estão amplamente difundidos no meio industrial como um todo, e suas aplicações são abrangentes quanto ao domínio de atuação.

É sabido que as técnicas e metodologias de modelagem geométrica estão bem avançadas. Com um certo grau de satisfação, elas auxiliam na criação de formas e manipulação de dimensões. Todavia, existem várias limitações nos sistemas CAD/CAM quando aplicados na modelagem de um produto. Por exemplo, algumas propriedades de importância significativa para a modelagem de aspectos tecnológicos, tais como: tolerâncias, lista de materiais, condições superficiais e funcionais; carecem de representações mais adequadas. Estas propriedades, ainda não estão colocadas numa representação computacional otimizada para auxiliar o projetista. Percebe-se que os sistemas CAD/CAM em geral, concentram-se demasiadamente em representar e capturar simplesmente atributos e relacionamentos geométricos (McMahon e Browne, 1998).

Portanto, a despeito do sucesso, é também consenso que os sistemas CAD, em geral, ainda não são uma ferramenta totalmente acabada e perfeita para suporte ao projetista durante a fase de idealização do projeto. Essa afirmação também pode ser estendida para as todas as fases do desenvolvimento de produto, no que se refere aos demais sistemas (*CAM - Computer-Aided Manufacturing, CAPP - Computer-Aided Process Planning, CAFD - Computer-Aided Fixture Design, ..., CAX's - Computer-Aided "X"*) de auxílio aos projetistas. Atualmente, exige-se de tais sistemas, uma abrangência corporativa e integrada, a qual não fique apenas centrada e isolada num setor específico, mas que englobe todo o desenvolvimento de um produto.

O desafio da nova geração de sistemas CAD é representar no computador, uma variedade maior de propriedades e atributos de projeto, que sejam familiares aos projetistas e que manipule aspectos da prática da engenharia, da organização de empresas e gerenciamento de equipamentos e recursos, os quais influenciam em decisões tomadas na fase de projeto.

Os pesquisadores têm focado a atenção e esforço no desenvolvimento de ferramentas e técnicas que são hábeis a suportar as várias fases de projeto. Inicialmente, o esforço concentrou-se em fornecer suporte para o projeto detalhado. Mais recentemente entretanto, tem se voltado para o projeto conceitual.

3.MODELAGEM E REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO

Devido à complexidade natural da atividade de projeto e à variedade de produtos mecânicos, as novas propostas de metodologias, técnicas e ferramentas para tratar a questão do projeto são apenas variações de melhoramentos de outras técnicas já existentes. As mudanças são sutis e se concentram basicamente em melhorar as representações do pensamento através de novas estruturas de dados mais adequadas à captura das intenções do projetista, ou através da mudança de estratégias e forma de aplicação de conceitos.

A necessidade de modelagem do produto foi estimulada pela demanda crescente por produtos de alta qualidade e baixos custos, e pela diminuição do tempo de lançamento (*lead-time*) do produto no mercado. Por conta dessa demanda, surgiram diversas estratégias para suportar o desenvolvimento do produto: CIM (*Computer Integrated Manufacturing*); Produção livre de supérfluos (*Lean Production*); Engenharia Concorrente; Fábrica Fractal e Fabricação Virtual. Embora cada uma dessas estratégias tenham o seu particular interesse, um foco comum é a necessidade por informações tecnológicas avançadas, com o objetivo de aplicá-las na integração e coordenação das questões referentes ao ciclo de vida do produto nas fases do seu desenvolvimento.

Na descrição de um produto mecânico, é necessário representar diferentes aspectos da função, do comportamento, e da estrutura do produto. A função representa a utilização do produto pelo usuário. O comportamento é a seqüência dos estados pelos quais o produto passa para conseguir realizar sua função. A estrutura refere-se aos componentes físicos ou formas utilizadas para obter o comportamento do produto. Tendo representado os vários aspectos do produto mecânico, é necessário ser capaz de entender as interações entre estes, tal que seja possível gerar e selecionar algumas soluções de projeto.

De acordo com (Hsu e Woon, 1998), para suportar as atividades de projeto num nível conceitual, é necessário resolver duas dificuldades inerentes: A modelagem do problema, referindo-se à modelagem da complexidade de interações entre os diferentes contextos e aspectos do produto; A representação do raciocínio, ou da intenção do projetista a respeito da geração e seleção de soluções viáveis para o problema.

Na seqüência, são feitos comentários sobre vantagens e desvantagens de algumas técnicas aplicadas à representação e modelagem do compartilhamento e troca de dados.

4.TÉCNICAS DE MODELAGEM E REPRESENTAÇÃO

As representações para modelagem variam desde as que são orientadas ao computador, até aquelas orientadas ao usuário, conforme o espectro ilustrado na Figura 1.

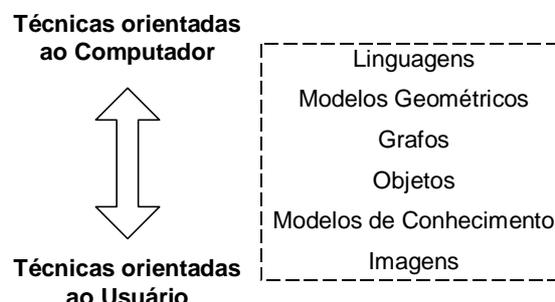


Figura 1. Espectro das representações de modelagem em projeto (Hsu e Woon, 1998).

As técnicas orientadas ao computador são aquelas cujo objetivo é garantir que o raciocínio computacional possa ser suportado eficientemente. Por outro lado, as técnicas

orientadas ao usuário concentram-se em fornecer ambientes de modelagem que auxiliem a criatividade do projetista.

4.1.Linguagens

As linguagens representam uma alternativa de formalização do projeto, representando-o de forma única, sem ambigüidades. Devido à representação compacta, as linguagens gramaticais são um meio eficiente de estruturação do conhecimento de projeto. Elas têm sido usadas para descrever os aspectos funcionais, comportamentais, e estruturais do produto.

Uma outra estratégia tem sido o desenvolvimento de uma ontologia de projeto compartilhada. A ontologia é um conjunto útil de termos e conceitos gerais o suficiente para descrever tipos diferentes de conhecimento em diferentes domínios, mas são específicos o bastante para serem aplicados a problemas específicos.

A análise e o desenvolvimento de uma ontologia tem se mostrado útil para: formação de um consenso; projeto e programação orientada a objeto; programação baseada em componente; projeto de interface para usuários; modelagem de informação; reengenharia de processos comerciais; e projeto de esquemas conceituais. A definição de uma ontologia serviria para compartilhar e reusar o conhecimento e favorecer uma melhor integração entre as diferentes fases do ciclo de vida do produto.

4.2.Modelos Geométricos

A modelagem geométrica por sólidos concentra-se na representação dos aspectos estruturais do produto. As representações mais comuns da geometria das formas são: B-Rep (*Boundary Representation*), CSG (*Constructive Solid Geometry*), geometria paramétrica e/ou variacional e sistemas de projetos baseados em *features*. Estas técnicas são descritas abaixo.

Modeladores B-Rep representam a geometria e as relações topológicas entre as várias entidades de um sólido, tais como vértices, arestas, faces, e ciclos. Por ser uma proposta de modelagem de sólidos, ela já captura bem mais informações do que os modelos de padrões gráficos e estruturas de arame (*wireframe*). Vale ressaltar que a representação B-Rep quando aplicada sozinha, é insuficiente para fazer reconhecimento de *features*.

O reconhecimento de *features* é um importante recurso computacional de suporte ao projeto e demais atividades do ciclo de vida do produto.

No caso da CSG, representa-se a geometria e a topologia a partir de operações booleanas (união, subtração, intersecção) e de transformações geométricas (translação, rotação, escalamento) realizadas sobre um conjunto de sólidos básicos, denominados de primitivas (tais como: cilindro, cone, esfera, paralelepípedo, pirâmide, torus, etc. ...).

As técnicas de modelagem paramétrica e variacional, são duas outras alternativas para modelos baseados na geometria. Do ponto de vista do usuário final, ambas as técnicas possibilitam descrever atributos geométricos utilizando-se de valores dimensionais, como de relações entre os valores de dimensões parametrizadas do modelo. As diferenças na aplicação de uma ou de outra destas propostas é sutil, e às vezes elas assumem configurações híbridas. Portanto, faz-se necessário um estudo mais minucioso para identificar num modelo geométrico particular, qual técnica está sendo adotada. Mais detalhes sobre fundamentos e diretrizes gerais destas duas propostas podem ser consultados no livros de (McMahon e Browne, 1998), e (Shah e Mäntylä, 1995).

O importante aqui é enfatizar que estas técnicas dão mais um passo na melhoria dos modelos geométricos aplicados nos sistemas CAD/CAM modernos, de forma a capturar mais informação da intenção do projetista durante o processo de concepção ou idealização. A Figura 2 mostra, numa escala temporal, essa evolução.

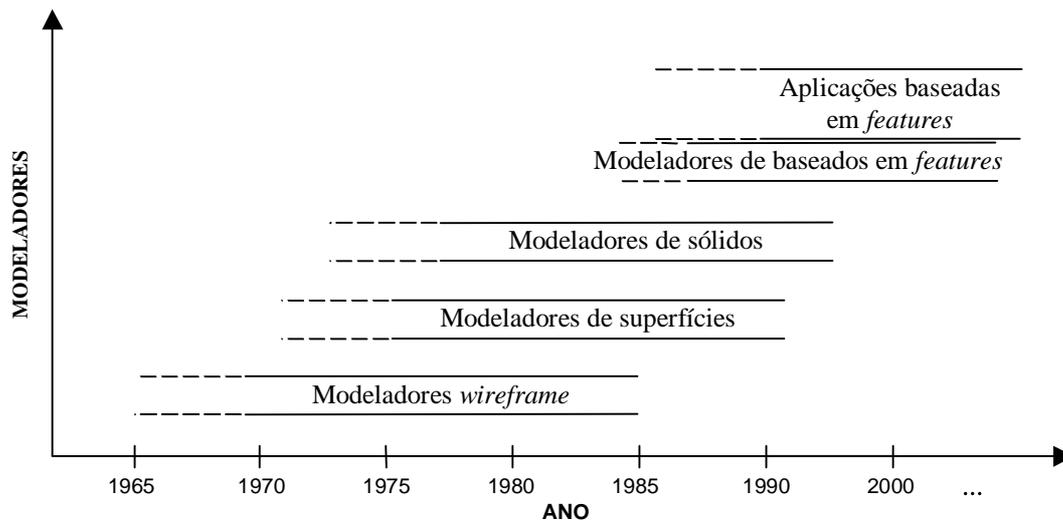


Figura 2. Evolução dos modeladores geométricos (Shah e Rogers, 1988).

4.3. Projeto Baseado em *Features*

A metodologia de “Projeto Baseado em *Features*” tenta solucionar essas deficiências dos sistemas CAD atuais. Os novos sistemas CAD, utilizam o conceito de *feature* para encapsular dados geométricos ou não, dentro das especificidades da aplicação. Isso deve ser tal que, uma mesma peça possa enfatizar somente atributos que forem relevantes, quando ela for aplicada a diferentes aplicações.

Vista como na Equação (1), a geometria representa a parcela física, exata e quantitativa do modelo de dados, enquanto a semântica representa a parcela abstrata, de contexto e qualitativa.

$$Feature \Leftrightarrow Geometria \cup Semântica \quad (1)$$

Segundo (Shah e Mäntyla, 1995), pode-se tirar duas conclusões:

1. *Features* são estruturas de conhecimento estereotipadas embutidas em processos cognitivos de projeto, análise, planejamento, e todas as outras atividades de Engenharia.
2. *Features* são dependentes do ponto de vista e da aplicação.

Sabe-se que a integração CAD/CAM exige que as características do projeto e da fabricação do produto devem ser extraídas e interpretadas automaticamente de um modelo de CAD, sem a intervenção humana (Fuh *et al.*, 1996). Portanto, um ambiente de multi-modelagem partindo do projeto de produtos e sistemas, exige que diferentes visões destes sejam recuperadas ao longo do processo de criação e produção. Ao mesmo tempo, deve prover que a troca de informações ocorra facilmente ao longo de todo o desenvolvimento.

4.4. Orientação a Objeto em CAD

Não há uma única definição original de Orientação a Objeto em CAD. Entretanto, pode-se defini-la como sendo: “O CAD que emprega objetos inteligentes, os quais podem avaliar mensagens e respondê-las”. A Orientação a Objeto em CAD usa estes objetos como uma unidade da representação para armazenar as intenções do projetista no projeto.

Um objeto é uma entidade que combina sua estrutura de dados e seu comportamento numa estrutura de dados única (Hsu e Woon, 1998). As características do objeto são: abstração (o foco sobre o qual ele deseja representar); encapsulação (separação de aspectos

externos do objeto dos detalhes de implementação), polimorfismo (permitir várias implementações diferentes de uma mesma operação), e herança (permitir compartilhar atributos e métodos sem a necessidade de redundância).

Atualmente, as técnicas de modelagem e programação orientadas a objeto são amplamente empregadas no desenvolvimento de sistemas CAD. Entidades do sistema são divididas em hierarquias de classe. As mensagens instruem aos objetos como eles podem se desenhar, caracterizando um polimorfismo dinâmico. Novas entidades podem ser adicionadas, e podem herdar características ou comportamentos encapsulados por classes de objetos. Outra característica da orientação a objeto em CAD, é que o mecanismo de passagem de mensagens entre objetos reforça os relacionamentos existentes entre modelos sólidos de montagens de conjuntos de peças. Esta modelagem facilita os relacionamentos entre partes do projeto.

As técnicas orientadas a objeto fornecem a flexibilidade necessária para o projeto conceitual. Os elementos físicos do projeto, seus parâmetros, propriedades, restrições e relacionamentos podem ser representados como objetos, com seus atributos e métodos.

4.5.Grafos e Imagens

A modelagem de features se utiliza bastante de grafos para representação e implementação das estruturas de dados. Eles têm sido usados para modelar todos os aspectos do produto: função, comportamento e estrutura. Além desses aspectos, os grafos também podem ser usados para modelagem de restrições e requerimentos. Uma das principais vantagens dos grafos é que a teoria sobre este tipo de estrutura está bem fundamentada matematicamente, e já existem muitos trabalhos desenvolvidos com implementações de algoritmos otimizados para manipulação.

No caso dos modelos visuais, eles são considerados os mais próximos da forma de pensamento e raciocínio do humano. Recursos de rascunho à mão livre é uma boa forma para discussões de aceleração e para comparação com diferentes soluções.

Alguns pesquisadores, citados por (Hsu e Woon, 1998), contribuíram com propostas de alguns modelos baseados em imagens: em 1990, Radcliffe e Lee propuseram um modelo para o processo de pensamento visual que evita a barreira entre a definição dos processos cognitivos e o domínio físico; e em 1991, Sittas pesquisou sobre o desenho à mão livre de formas tridimensionais durante as atividades de projeto conceitual.

4.6.Inteligência Artificial no Projeto

Brachman e Levesque, citados por (McMahon e Browne, 1998), resumem que a principal aplicação da IA se concentra na descrição de regras para o mundo real, tal que uma máquina inteligente possa tirar novas conclusões a respeito de seu contexto de conhecimento, manipulando as descrições originais definidas previamente.

A aplicação da IA no projeto está normalmente interessada em tornar os computadores mais inteligentes, capacitando-os a representar e a manipular o conhecimento do mundo real de duas formas: ou com o estudo de como os projetistas aplicam a inteligência humana ao projeto, ou com a tentativa de fornecer suporte computacional mais esperto durante o projeto.

Através de representações computacionais de heurísticas de projeto, as quais são mais fáceis de expressar do que utilizar métodos matemáticos clássicos, a IA vem desenvolvendo os chamados “sistemas especialistas” ou “sistemas baseados no conhecimento”.

Os componentes de um sistema especialista são: A base de conhecimento, que armazena o conhecimento de uma área específica. Nesta base, o conhecimento é representado por uma simbologia baseada numa linguagem ou notação semântica de significados, a qual possui uma sintaxe de instruções computacionais bem definida. O motor de inferência, que interage com o usuário e realiza operações de procura e comparação entre o assunto da pesquisa e o

conhecimento armazenado na base. O propósito desse processo é encontrar um objetivo satisfatório para a procura realizada pelo usuário. Segundo Buchanan e Shortiffe, citados por (McMahon e Browne, 1998), a aquisição de conhecimento é caracterizada como: “A transferência ou transformação do conhecimento ou da experiência com um problema específico, para um programa computacional”. A aquisição de conhecimento, se dá pela interação do especialista com o motor de inferência, através de um mecanismo de entrevista ou pelo estudo do comportamento do especialista em resolver um problema particular.

5.PADRÕES DE ARQUIVOS PARA TROCA DE DADOS

Um esforço considerável tem-se feito com o objetivo de desenvolver um padrão internacional para aproveitar propostas anteriores, e fornecer uma base melhorada de troca de dados para aplicação na integração das atividades de desenvolvimento do produto. Esse esforço recebeu o nome de STEP (*Standard for the Exchange Product Data*). O STEP busca prover um formato universal para dados de produtos, permitindo que as deficiências verificadas no uso de padrões predecessores sejam eliminadas.

A ISO já aprovou o STEP como padrão internacional, através da norma ISO 10303. Este padrão permite a descrição completa, não-ambígua e processável por computador, das características físicas e funcionais de produtos ao longo de todo o seu ciclo de vida, abrangendo também a troca de dados de produtos e compartilhamento destes entre funções de um sistema produtivo. O STEP provê um conjunto de especificações, chamado de protocolos de aplicação, que ditam a forma e conteúdo das informações a serem trocadas entre os sistemas. STEP é visto neste projeto como uma tecnologia de informação, isto é, como uma especificação do modelo de dados a ser seguida.

O padrão STEP está sendo implementado através do uso de uma série de protocolos de aplicação (AP). A Parte 203 representa o nascimento de uma proposta na troca digital de dados de produto como modelos sólidos devem ser comunicados. Utilizando este protocolo, sistemas CAD podem agora trocar modelos sólidos diretamente sob controle de configuração de um formato padronizado com diferentes sistemas CAD.

A principal entidade deste modelo é o produto. Associada a esta entidade estão muitas outras entidades que capturam informações sobre: versão e definição do produto; aprovações; ações; eventos (data e hora); contratos; classificação de segurança; pessoas e organizações; representação geométrica; etc. Várias destas informações podem ser utilizadas como modelo de informação para implementar o modelo de fluxo de informação de um ambiente de desenvolvimento de produto.

O protocolo 203 definirá quase toda a estrutura de informação presente no banco de dados. As informações servirão para especificar o produto, dizer como ele foi desenvolvido, e relatar a sua história através de versões, definições, desenhos e outras informações relevantes. Informações que não são capturadas pelo modelo serão modeladas com entidades adicionais, a fim de completar o modelo de informação do ambiente. Para o interesse de troca de dados utilizando a tecnologia de features, o padrão STEP reserva dois módulos: a Parte 48, e a Parte 224. A Parte 48 é um recurso genérico que fornece um modelo de dados para features de forma. No caso da Parte 224, ela é um protocolo de aplicação específica para o CAPP.

6.GERENCIAMENTO DA INFORMAÇÃO EM CAD/CAM

No início da década de noventa surgiram os primeiros sistemas PDM (*Product Data Management*). Estes incorporavam ao recurso de gerenciamento de documentos eletrônicos dos EDMS (*Electronic Data Management System*), a possibilidade de gerenciar dados de produto. Isto significava atuar em rede como os sistemas de CAD, compartilhando-os através de bancos de dados. Essa pode ser considerada a 1ª. geração dos sistemas PDM.

Atualmente, o desenvolvimento de produto deve estar integrado com todas as atividades, áreas e informações da empresa. Para essa necessidade, surgiram os sistemas PDM ditos de 2ª. geração. Tais sistemas atendem grande parte das necessidades de engenharia, gerenciando os modelos CAD e aplicando o conceito DMU (*Digital Mock-Up*), os recursos de coordenação dos fluxos de atividades de decisão, aprovação e ordenamento de tarefas, e modificações realizadas sobre os modelos. Além disso, permitem uma integração com os sistemas computacionais de MRP (*Materials Requirements Planning*) através de relacionamentos com listas de materiais, atendendo as áreas de planejamento, fabricação, suprimentos e financeiras.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As funções de projeto do produto e engenharia da produção devem tornar-se inteiramente integrados com a fabricação, e todos os gargalos do fluxo de informação do produto e da engenharia, a partir dessas funções até às funções de fabricação, devem ser eliminados.

A estreita ligação entre as funções de projeto, planejamento, e fabricação requer a informação suficientemente completa e precisa de todos os aspectos do produto, dos processos de produção, e das operações factíveis e disponíveis. Portanto, os sistemas de planejamento e projeto do futuro, deverão estar estreitamente alinhados com a tecnologia de fabricação, e os sistemas de fabricação precisarão de informação mais completa e precisa do que os sistemas atuais.

Idealmente, esta integração deverá conduzir à “Engenharia Concorrente” do ciclo de vida do produto, onde projeto, fabricação, manutenção, eventual descarte ou desmonte, e questões de reutilização do produto podem ser consideradas simultaneamente durante o seu projeto (Shah e Mäntyla., 1995). As tecnologias desenvolvidas em termos de novas ferramentas computacionais, precisam estar direcionadas ao atendimento destes requisitos; e nos sistemas CAD/CAM, isso não seria diferente.

Acredito que a reutilização da informação que constitui o ciclo de vida do produto, dentro de diferentes contextos funcionais, geográficos e temporais, é uma questão não alcançável com os modelos apresentados. Uma estrutura de dados universal, que contemple e atenda estes requisitos, ainda é algo sem solução. As pesquisas nessa área são muitas, mas ainda muito incipientes e com soluções muito específicas e limitadas.

8. REFERÊNCIAS

- Chang, Tien-Chien; Wysk, Richard A.; Wang, Hsu-Pin; 1997, ‘Computer Aided Manufacturing’, Prentice Hall, 2nd edition, 672 p..
- Fuh, Jerry Y. H.; Chang, Chao-Hwa; Melkanoff, Michel A.; 1996, “The development of an integrated and intelligent CAD/CAPP/CAFP environment using logic-based reasoning”, *Computer Aided Design*, v. 28, N^o 3, p. 217-232.
- Hsu, W.; Woon, I. M. Y.; 1998, “Current research in the conceptual design of mechanical products”, *Computer Aided Design*, Elsevier Science Ltd., vol. 30, N^o 5, p. 377-389.
- Krause, F.-L.; Kimura, F.; Kjellberg, T.; Lu, S. C.-Y.; 1993, “Product Modelling”, *Annals of the CIRP*, p. 695-705, vol. 42/2.
- Mäntyla, M., 1988, “An Introduction to Solid Modeling”, Computer Science Press.
- McMahon, C.; Browne, J.; 1998, “CAD CAM: Principles, Practice and Manufacturing Management”, Addison Wesley Longman, 2nd edition, p..
- Shah, J. J.; Mäntyla, M.; 1995, “Parametric and Feature-Based CAD/CAM”, New York, John Wiley & Sons, 619 p..
- Shah, J. J.; Rogers, M. T.; 1988, “Expert form feature modelling shell”, *Computer Aided Design*, vol. 20, N^o 9, p. 515-524.