

## DESCRIÇÃO SISTEMÁTICA DA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL COM O AUXÍLIO DE TÉCNICAS DA QUALIDADE TOTAL

**Autores:** Vanderley de Vasconcelos (aluno do CPGEM/pesquisador do CDTN)

Wander L. Vasconcelos (prof. do Depto. de Eng. Metalúrgica)

### RESUMO

Neste trabalho é sugerida a utilização do ciclo *PDCA*, método sistemático para gerenciamento de programas de Qualidade Total, para auxiliar na tarefa da descrição de relações microestruturais. O uso de diagramas de Pareto, diagramas de causa e efeito, padronização, técnicas de análise de sistemas e técnicas de modelagem e simulação, complementam a metodologia sugerida. A utilização dessas ferramentas poderá permitir uma melhor otimização de recursos no desenvolvimento de novos materiais, além de facilitar a caracterização das microestruturas obtidas e permitir uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos com o emprego de experimentos computacionais.

### INTRODUÇÃO

O objetivo principal da Ciência e Engenharia dos Materiais é o desenvolvimento e fabricação econômica de materiais, sejam eles metálicos, cerâmicos, compósitos, biológicos, etc., com o desempenho adequado para as aplicações a que se destinam. Para realizar esta tarefa, é necessário prever as propriedades destes materiais, projetar as rotas de processamento físico e químico dos produtos e controlar a sua fabricação e qualidade. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para a descrição da evolução microestrutural, a qual deverá auxiliar nas tarefas acima citadas, tendo em vista as correlações *desempenho x propriedades x microestrutura x processamento*. O desenvolvimento da metodologia é baseado na filosofia da Qualidade Total e utiliza intensamente suas ferramentas, bem como conceitos de análise de sistemas e sistemas especialistas.

### O PROBLEMA DA DESCRIÇÃO MICROESTRUTURAL

Uma visão geral do problema da obtenção de relações entre processamento, estrutura, propriedades e desempenho é mostrada na Figura 1. Nota-se que, além das relações *microestrutura x propriedades*, tradicionalmente estudadas [1], as relações do tipo *processamento x microestrutura* também são parte da descrição microestrutural.

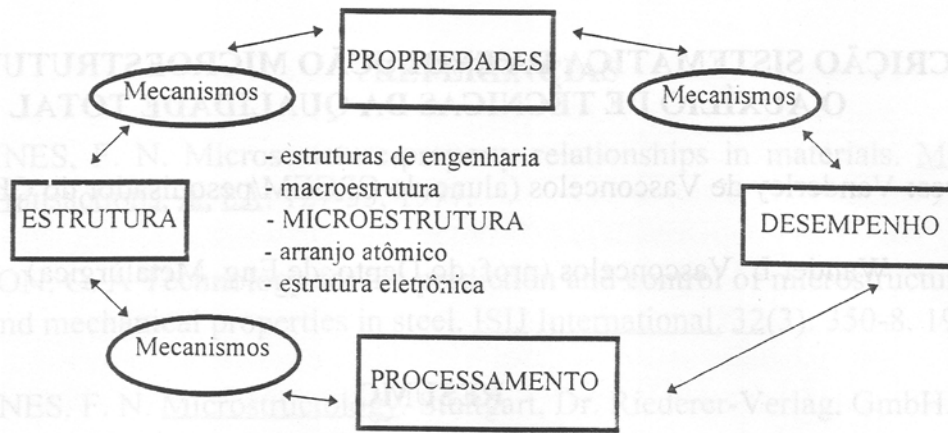


Figura 1 - Relações entre processamento, microestrutura, propriedades e desempenho no desenvolvimento de materiais.

De uma maneira geral, a previsão e controle da evolução microestrutural e, conseqüentemente, das propriedades dos materiais, é feita com base no conhecimento e experiência dos engenheiros, pesquisadores e técnicos envolvidos. Isto torna as previsões e métodos utilizados para controlar a produção, bastante dependentes das habilidades individuais, além de serem muitas vezes demoradas e com grande dispêndio de recursos [2].

Como as propriedades dos materiais dependem da sua estrutura em todos os seus níveis considerados (estruturas de engenharia, macroestrutura, microestrutura, estrutura de arranjo atômico, etc.) ressurte-se, portanto, de uma metodologia sistemática que descreva a estrutura e a evolução estrutural, em função, por exemplo, do tempo e da temperatura, de tal forma que as causas e mecanismos reponsáveis pelas transformações possam ser melhor analisados e suas trajetórias melhor previstas.

Relativamente pouca atenção tem sido dada às microestruturas, em relação às estruturas de arranjo atômico ou mesmo em relação aos outros níveis estruturais. Uma previsão completa do desenvolvimento microestrutural em sólidos policristalinos, por exemplo, em função do tempo e da temperatura de processamento não foi ainda estabelecida, principalmente devido à complexidade das interações entre os grãos [3].

Nos materiais reais, uma caracterização quantitativa rigorosa, torna-se difícil praticamente, mesmo em uma microestrutura monofásica porosa simples, por exemplo, no que diz respeito às suas propriedades topológicas. Torna-se mais difícil ainda um acompanhamento da variação destas características durante o processamento. Por isto, torna-se necessário, em muitos casos, o emprego de técnicas de modelagem computacional da evolução microestrutural, as quais podem permitir a avaliação de todas as propriedades importantes para a caracterização, em amostras estatisticamente representativas [4].

A existência de centenas de modelos para processos que envolvem evolução microestrutural, tais como a sinterização ou o crescimento de grão, analisando tanto os aspectos estacionários quanto cinéticos, dá uma indicação da importância do tema [5,6]. O que se nota é que cada um dos modelos se aplica normalmente a uma situação ou estágio específico do processo, o que torna difícil a comparação entre eles ou mesmo a busca de qual deles melhor se aplica ao caso que se está estudando.

Estruturalmente os materiais são constituídos de um grande número de partículas de diferentes fases, inclusões e poros, os quais estão conectados, formando um contínuo em três dimensões. A fim de associar a estrutura com as propriedades, da forma como elas são medidas na massa do material, deve-se considerar a estrutura como um sistema constituído de partes que interagem entre si. É com este enfoque que se pretende analisar a evolução microestrutural, desenvolvendo uma metodologia que permita obter, além dos parâmetros métricos, também os parâmetros topológicos, morfológicos e topográficos da microestrutura, em função das condições de processamento. A metodologia deverá indicar, de forma inequívoca, que tipo de processo está sendo estudado, quais elementos microestruturais estarão presentes, que parâmetros, dentre os possíveis, são importantes, e que tipo de modelo se aplica.

## FERRAMENTAS DA QUALIDADE TOTAL

A Qualidade Total é uma filosofia de gerenciamento onde a preocupação com a qualidade ocorre em todas as etapas do processo, em oposição ao controle de qualidade nos moldes tradicionais onde a verificação da qualidade dos produtos ou serviços é realizada somente no final do processo, quando pouco ou nada pode ser feito em relação a melhorias da qualidade em qualquer uma de suas dimensões [7].

O ciclo PDCA (“plan, do, check, action”) é um método sistemático para o gerenciamento de programas de Qualidade Total e consiste, em linhas gerais, em caminhos para se atingir metas. Na Figura 2, o PDCA é ilustrado de uma forma simples e reduzida. Na fase de planejamento (“plan”) devem ser claramente definidas as metas e os métodos para alcançá-las, i. e., deve ser concebido um plano de ação para se alcançar as metas. Na fase de execução (“do”) as pessoas envolvidas devem ser treinadas previamente nas tarefas sob suas responsabilidades e o plano de ação ser então implementado. Na fase de verificação (“check”) os resultados da implementação do plano de ação devem ser comparados com as metas estabelecidas para se certificar se ele foi de fato efetivo. Na fase de atuação (“action”) deve-se atuar no processo em função dos resultados obtidos, estabelecendo e utilizando padrões para que as metas alcançadas sejam mantidas ou melhoradas.

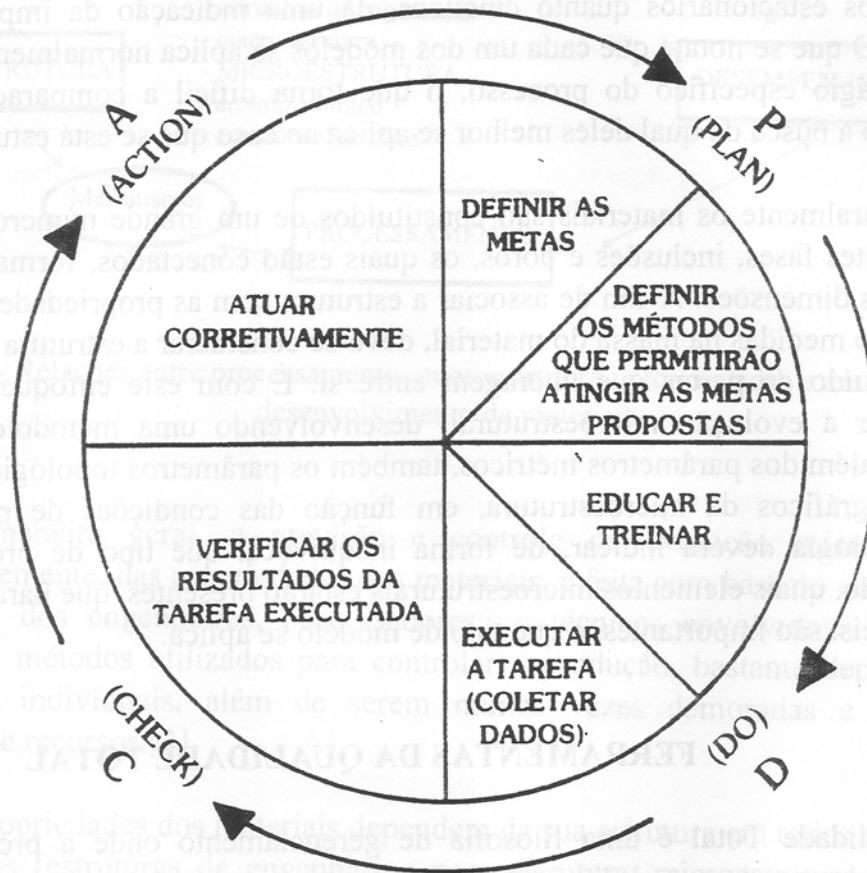


Figura 2 - Ciclo PDCA simplificado para se atingir uma meta genérica [7].

Em cada uma das fases mencionadas, várias ferramentas podem ser utilizadas, com a finalidade de sistematizar o processo, identificando as causas fundamentais, evitando esquecimento de fatores importantes para os efeitos analisados e auxiliando na priorização e seleção de opções. Algumas das ferramentas úteis para o desenvolvimento de uma metodologia sistemática para a descrição microestrutural são descritas a seguir:

- **Diagrama de Pareto** - mostra em um gráfico de barras a relação entre um problema identificado e suas causas [8]. Seu conceito é baseado na constatação de que 80 % de um efeito (problema) pode ser normalmente atribuído a 20 % das causas identificáveis. A utilidade principal deste tipo de diagrama consiste na atribuição de prioridades, destacando as causas que devem merecer maior atenção, para cada processo. Seja, por exemplo, a análise do problema de obtenção de micrografias de má qualidade em um determinado laboratório de microscopia óptica. Neste caso os resultados fictícios ilustrados na Figura 3 indicam que os esforços deverão se

concentrar na identificação das razões pelas quais estão sendo obtidas micrografias com regiões mal focalizadas.

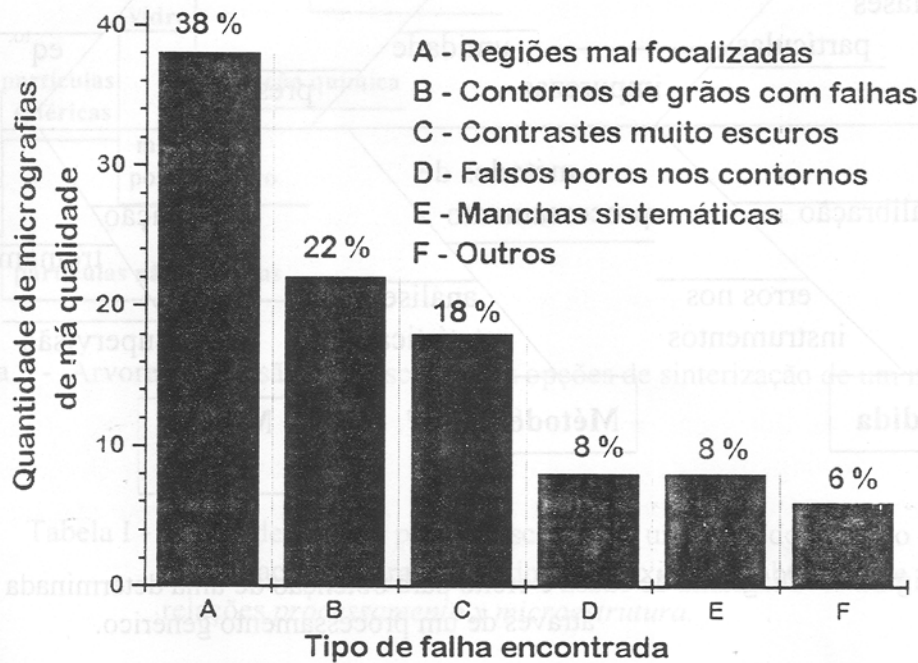


Figura 3 - Diagrama de Pareto para o problema de obtenção de micrografias de má qualidade.

- Diagramas de Causa e Efeito** - estes diagramas mostram esquematicamente as causas potenciais de cada efeito analisado [8]. Numa abordagem básica, utiliza-se na sua construção os seis componentes fundamentais de qualquer processo: meio ambiente, materiais, máquina, medida, método e mão de obra (6 M). A Figura 4 mostra um diagrama de causa e efeito (também chamado de diagrama de espinha de peixe devido à sua forma) para um processamento genérico para obtenção de um material com determinada microestrutura. Além de documentar a tarefa de solução de determinado problema, esta ferramenta auxilia na busca das suas causas fundamentais, através da busca dos porquê's de cada causa mostrada na "espinha" principal do diagrama, obtendo seqüencialmente "espinhas" secundárias, terciárias, etc., até atingir o nível de detalhe desejado.

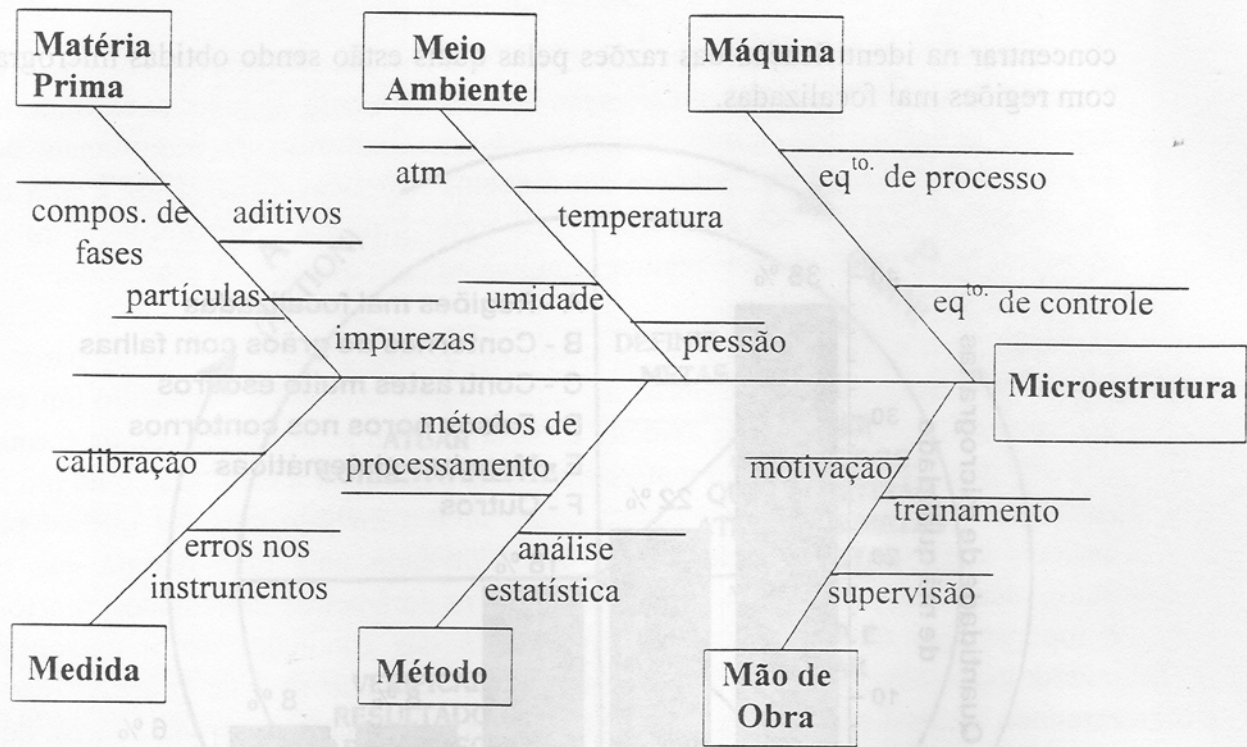


Figura 4 - Diagrama de causa e efeito para obtenção de uma determinada microestrutura através de um processamento genérico.

- **Árvore de Decisão** - mostra, através de seus ramos, cada uma das possibilidades lógicas de um processo ou de implementação de um sistema [9]. Apesar de ser uma ferramenta de emprego mais usual em análise de sistemas, se enquadra bem dentro da visão sistêmica e metódica da abordagem da Qualidade Total. A Figura 5 mostra um exemplo de aplicação de árvore de decisão na escolha de opções de sinterização de materiais cerâmicos. Sem a preocupação de ser exaustivo, observa-se a possibilidade de pelo menos 1152 diferentes tipos de processamento ( $2^6 \times 6 \times 3$ ), o que dá uma idéia da complexidade de uma abordagem genérica deste tipo de processamento.
- **Tabela de Decisão** - nesse tipo de tabela, são obtidas as ações que devem ser tomadas como consequência de decisões listadas sistematicamente [9]. Tem basicamente o mesmo escopo de aplicação das árvores de decisão, com a vantagem de obrigar o seu usuário a colocar todas as possibilidades ( $2^n$ , onde  $n$  é o número de opções). Tem, no entanto, a desvantagem de, pela sua forma, lidar apenas com eventos mutuamente exclusivos. A Tabela I é uma tabela de decisão para a escolha de um tipo de modelo computacional a ser usado no estudo do processo de sinterização, como apoio na obtenção de relações *processamento x microestrutura*. Nessa tabela são mostradas apenas 16 das  $2^7 = 128$  possibilidades.

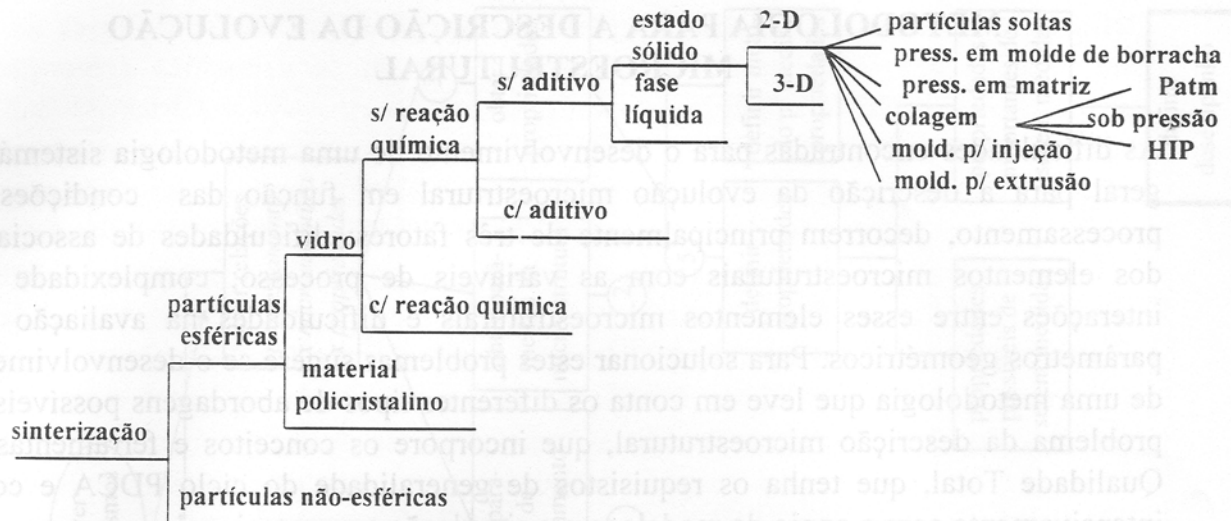


Figura 5 - Árvore de decisão para escolha das opções de sinterização de um material cerâmico.

Tabela I - Tabela de decisão para a escolha de um tipo de modelo computacional para ser usado para auxiliar na obtenção de relações *processamento x microestrutura*.

Tipo de Modelo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
simulação (matemático)	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	...
estacionário (cinético)	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	...
monomodal (distrib. medida)	S	S	S	S	S	S	S	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	...
curvat. de pescoço (s/ curvat.pesc.)	S	S	S	S	N	N	N	N	S	S	S	S	N	N	N	N	N	...
força unidirecion. (força central)	S	S	N	N	S	S	N	N	S	S	N	N	S	S	N	N	N	...
morfol. matemat. (redist. de massa)	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	N	...
s/atração partícula (c/ atraç. partíc.)	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	...

Outras importantes ferramentas da Qualidade Total, também aplicáveis para a metodologia sugerida são: “brainstorming”, estratificação, histogramas, diagramas de relação, análise de regressão, diagramas de árvore e fatores de correlação [7].

## METODOLOGIA PARA A DESCRIÇÃO DA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL

As dificuldades encontradas para o desenvolvimento de uma metodologia sistemática geral para a descrição da evolução microestrutural em função das condições de processamento, decorrem principalmente de três fatores: dificuldades de associação dos elementos microestruturais com as variáveis de processo; complexidade das interações entre esses elementos microestruturais e dificuldades na avaliação dos parâmetros geométricos. Para solucionar estes problemas sugere-se o desenvolvimento de uma metodologia que leve em conta os diferentes tipos de abordagens possíveis do problema da descrição microestrutural, que incorpore os conceitos e ferramentas da Qualidade Total, que tenha os requisitos de generalidade do ciclo PDCA e conte intensivamente com o apoio da modelagem e simulação computacional.

A metodologia proposta é mostrada esquematicamente na Figura 6. A análise de problemas de descrição microestrutural deve se iniciar pela identificação precisa do tipo de abordagem necessária para o problema. Isto pode ser feito com o auxílio do diagrama esquemático da Figura 7. Esse diagrama não pretende ser completo, mas apenas um guia para uma clara definição do problema.

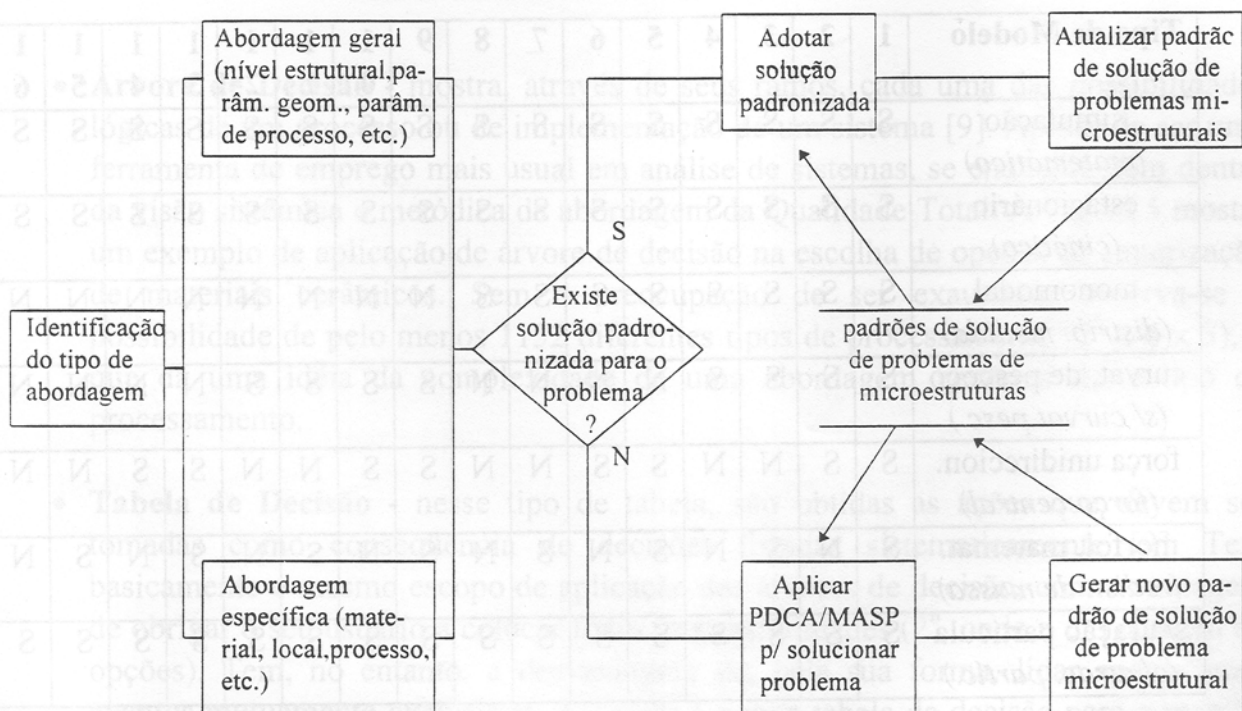


Figura 6 - Metodologia proposta para análise de problemas de descrição microestrutural.



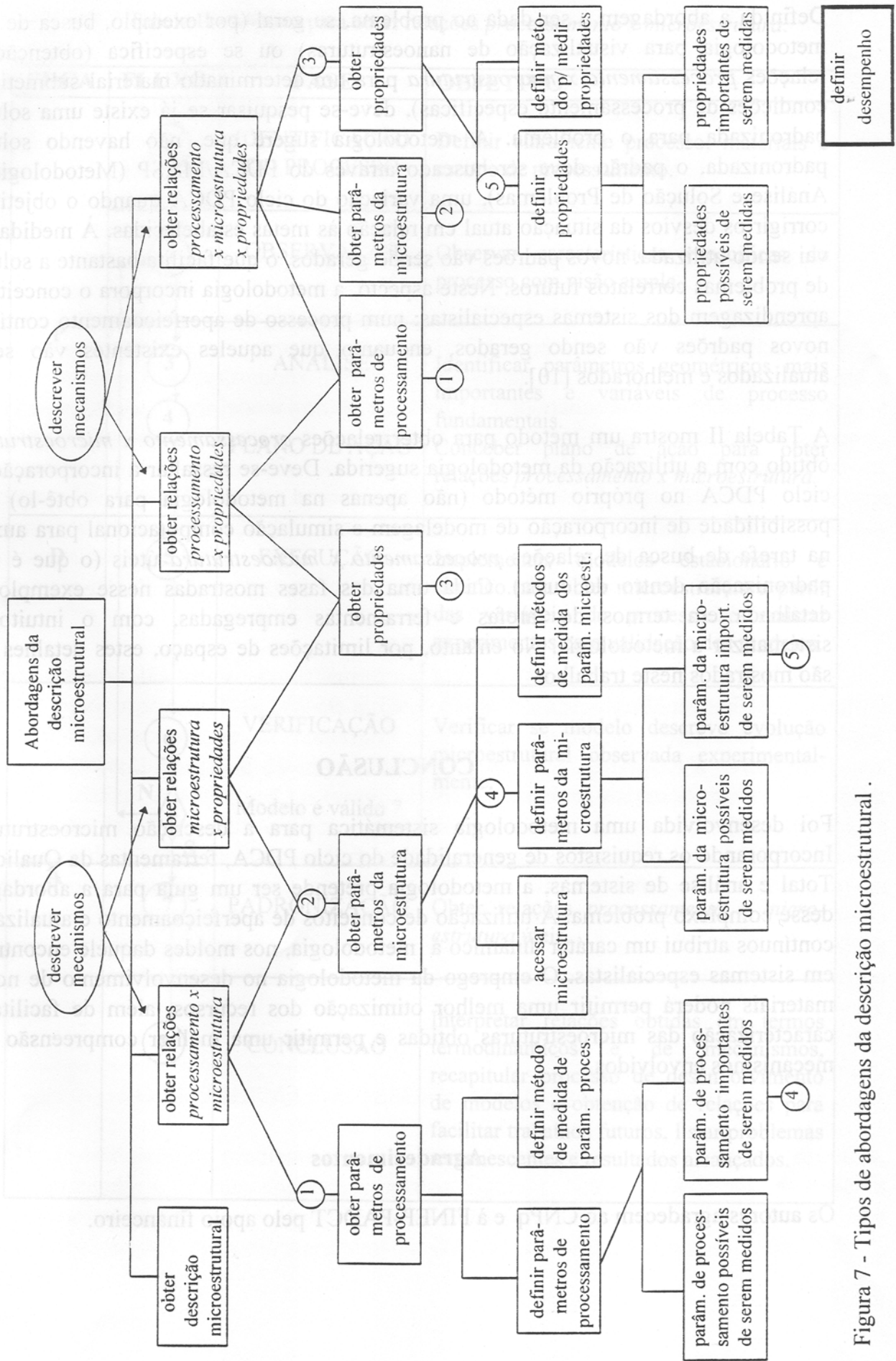


Figura 7 - Tipos de abordagens da descrição microestrutural .

Definida a abordagem a ser dada ao problema, se geral (por exemplo, busca de uma metodologia para visualização de nanoestruturas) ou se específica (obtenção de relações *processamento x microestrutura* para um determinado material submetido a condições de processamento específicas), deve-se pesquisar se já existe uma solução padronizada para o problema. A metodologia sugere que, não havendo solução padronizada, o padrão deve ser buscado através do PDCA/MASP (Metodologia de Análise e Solução de Problemas), uma variação do ciclo PDCA quando o objetivo é corrigir os desvios da situação atual em relação às metas estabelecidas. À medida que vai sendo utilizada, novos padrões vão sendo gerados, o que facilita bastante a solução de problemas correlatos futuros. Neste aspecto, a metodologia incorpora o conceito de aprendizagem dos sistemas especialistas: num processo de aperfeiçoamento contínuo, novos padrões vão sendo gerados, enquanto que aqueles existentes vão sendo atualizados e melhorados [10].

A Tabela II mostra um método para obter relações *processamento x microestrutura*, obtido com a utilização da metodologia sugerida. Deve-se ressaltar a incorporação do ciclo PDCA no próprio método (não apenas na metodologia para obtê-lo) e a possibilidade de incorporação de modelagem e simulação computacional para auxiliar na tarefa de busca de relações *processamento x microestrutura* úteis (o que é uma padronização dentro de outra). Cada uma das fases mostradas nesse exemplo foi detalhada em termos de tarefas e ferramentas empregadas, com o intuito de sistematizar a metodologia. No entanto, por limitações de espaço, estes detalhes não são mostrados neste trabalho.

## CONCLUSÃO

Foi desenvolvida uma metodologia sistemática para a descrição microestrutural. Incorporando os requisitos de generalidade do ciclo PDCA, ferramentas da Qualidade Total e análise de sistemas, a metodologia pretende ser um guia para a abordagem desse complexo problema. A utilização de conceitos de aperfeiçoamento e atualização contínuos atribui um caráter dinâmico à metodologia, nos moldes daquele encontrado em sistemas especialistas. O emprego da metodologia no desenvolvimento de novos materiais poderá permitir uma melhor otimização dos recursos, além de facilitar a caracterização das microestruturas obtidas e permitir uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FINEP-PADCT pelo apoio financeiro.

Tabela II - Método para obter relações *processamento x microestrutura*.

PDCA	FLUXO	FASE	OBJETIVO
P	①	IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO	Definir claramente processo, materiais e escopo de processamento.
	②	OBSERVAÇÃO	Observar características específicas do processo com visão ampla.
	③	ANÁLISE PLANO DE AÇÃO	Identificar parâmetros geométricos mais importantes e variáveis de processo fundamentais.
	④		Conceber plano de ação para obter relações <i>processamento x microestrutura</i> .
D	⑤	EXECUÇÃO	Implementar modelos estacionário e cinético para obter microestrutura a partir das variáveis de processo e realizar experimentos para validação dos modelos.
C	⑥	VERIFICAÇÃO	Verificar se modelo descreve evolução microestrutural observada experimentalmente.
		Modelo é válido ?	
A	⑦	PADRONIZAÇÃO	Obter relações <i>processamento x microestrutura</i> úteis.
	⑧	CONCLUSÃO	Interpretar relações obtidas em termos termodinâmicos e de mecanismos, recapitular processo de desenvolvimento de modelos e obtenção de relações para facilitar trabalhos futuros, listar problemas remanescentes e resultados alcançados.

## REFERÊNCIAS

- [1] RHINES, F. N. Microstructure-property relationships in materials. Metallurgical Transactions, A, 8A: 127-33, 1977.
- [2] KWON, O. A Technology for the prediction and control of microstructural changes and mechanical properties in steel. ISIJ International, 32(3): 350-8, 1992.
- [3] RHINES, F. N. Microstructology. Stuttgart, Dr. Riederer-Verlag, GmbH, 1986.
- [4] ZHENG, J. and JOHNSON, P. F. Computer simulation of particle packing and sintering. Ph.D. Thesis. Alfred University, Alfred, NY, 1991.
- [5] HANSEM, J. D. et alii. Combined-stage sintering model. Journal of the American Ceramic Society, 75(5): 1129-35, 1992.
- [6] LAMEIRAS, F. S., SANTOS, A. M. M. and PINHEIRO, P. Microparticle restructuring. Scripta Metallurgica et Materialia, 28: 1435-40, 1993.
- [7] CAMPOS, V. F. TQC - Gerenciamento da Rotina do Trabalho do Dia-a-dia. Bloch Editores, Rio de Janeiro, 1994.
- [8] CONTINO, A. V. Improve plant performance via statistical process control. Chemical Engineering, July, 20, 1987. p. 95-102.
- [9] GANE, C. e SARSON, T. Análise Estruturada de Sistemas. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1984.
- [10] HOLTZ, F. Sistemas Especialistas - Programando em Turbo C. Editora Campus, Rio de Janeiro, 1991.