

3. SÍNTESE E PROCESSAMENTO DE NANOCOMPÓSITOS Cu-MWCNT.

Como foi apresentado nos capítulos um e dois, os nanotubos de carbono apresentam excelentes propriedades mecânicas e de transporte. Deste modo, espera-se com a sua incorporação, um aprimoramento das propriedades da matriz de cobre. Dependendo do método de síntese e do tipo de processamento utilizado para produzir materiais em pastilhas (“*bulk*”), suas características finais como microestrutura, defeitos e propriedades em geral serão modificadas.

Um esquema resumo das principais técnicas tanto de síntese quanto de processamento pode ser visualizado na figura 3.1.

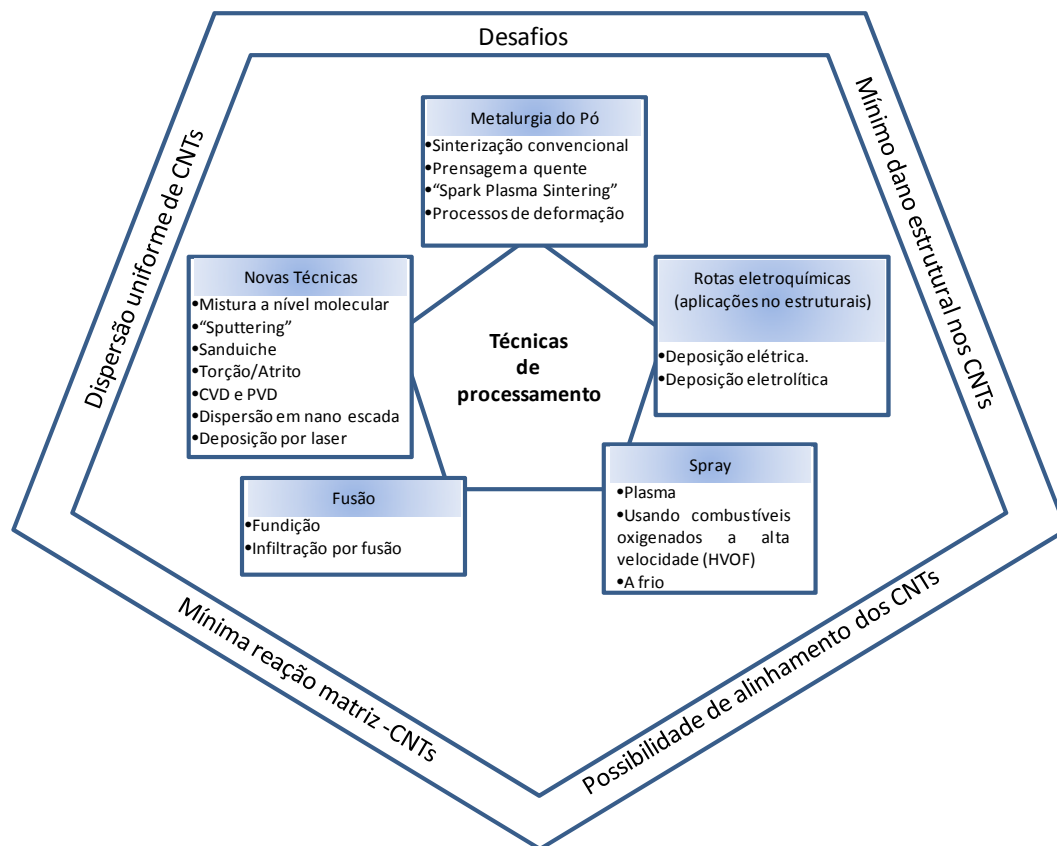


Figura 3.1. Esquema das principais técnicas para produção de nanocompósitos de matriz metálica reforçadas com nanotubos de carbono [54].

Neste capítulo se apresenta uma revisão dos principais métodos de produção de nanocompósitos de matriz metálica (MMNC), resultados reportados, assim como será descrito o processo da síntese usado.

3.1

Síntese de Nanocompósitos de Matriz Metálica- Nanotubos de Carbono

A produção de nanocompósitos de matriz metálica reforçados com CNTs (MM-CNT) requer métodos que vão depender da aplicação final do material, como filmes finos para dispositivos eletrônicos ou como material estrutural. Entre os principais métodos temos os eletrolíticos e métodos de síntese química, física e mecânicos. Os métodos eletrolíticos [55,56,57,58] e de síntese física (deposição catódica, deposição física de vapor, spray, laser) [59,60,61,62] são empregados para produção de filmes ou recobrimentos. Com os métodos de produção eletrolíticos tem se obtido uma dispersão homogênea com poucos aglomerados de CNTs na matriz. Controle adequado das variáveis como pH do eletrólito, corrente aplicada, concentração de nanotubos na solução e do precursor de íons metálicos, tem levado a obter bons resultados no que se refere a propriedades de condução elétrica [63,64]. Chen, X.H. et al [65] reportou que neste tipo de processo a concentração ótima de nanotubos no nanocompósito foi de 14 % vol (2,5% em massa aproximadamente).

Os métodos de síntese química como mistura a nível molecular [66,67,68] e co-precipitação [69,70] produzem o nanocompósito na forma de pó e precisam de etapas adicionais de processamento assim como os métodos mecânicos para aplicações estruturais. O processo de mistura a nível molecular tem apresentado bons resultados enquanto a dispersão de nanotubos, dentro do pó de cobre. Ele se baseia na incorporação de nanotubos previamente funcionalizados numa solução que contem íons de cobre, geralmente acetatos, sulfatos ou nitratos. Dispersão com ultrassom e/ou agitação magnética com posteriores tratamentos de calcinação e redução com hidrogênio são aplicados para a obtenção do pó. Uma vez compactado e sinterizado este material via sinterização convencional, pressão a quente ou SPS, é obtido o nanocompósito em forma de pastilhas.

Nanocompósitos produzidos por métodos mecânicos como sanduiche [71], torção/atrito [72] e ECAP (*“equal channel angular pressing”*) [73] são submetidos a deformações mecânicas a frio e posteriores tratamentos térmicos para alívio de tensões. Resultados reportados por esse tipo de processos indicam melhora nas propriedades mecânicas. Por exemplo, com o processo de sanduiche em matriz de alumínio aumenta-se o módulo de elasticidade em 59%, usando

2%vol SWCNTs, e a resistência a tração em 250%, usando uma fração volumétrica de CNTs de 9.5% [71]. Usando processos de torção/atrito em matriz de alumínio foi observada uma diminuição do tamanho de grão de até 80% para 5% em massa de CNTs [72], e aumento da dureza do nanocompósito em 20%, usando 1% vol. de CNTs [73], utilizando o ECAP. Esse aumento nas propriedades mecânicas é devido principalmente à deformação plástica severa que traz como consequência o aumento da densidade de discordâncias (endurecimento por deformação). Cabe resaltar que foram observados aglomerados de CNTs em todos os processos de deformação a frio.

Geralmente estes processos mecânicos partem de um nanocompósito em pó feito por mistura mecânica (moagem), onde pós-metálicos com tamanho de partícula na ordem de poucos micrometros de diâmetro são misturados com os nanotubos de carbono através de moinhos com esferas cerâmicas no seu interior. A moagem poderia causar danos estruturais dos CNTs durante a colisão com as esferas, assim como ocorrerá contaminação das partículas da matriz metálica [74].

3.1.1

Decoração dos Nanotubos com Nanopartículas Metálicas.

Se a adesão entre matriz metálica e os CNTs não é suficientemente forte para suportar altas cargas, os benefícios das altas propriedades mecânicas dos CNTs serão perdidos [50,54]. Uma das formas de melhorar esse inconveniente é criando defeitos e grupos funcionais que promovam centros de ancoramento de nanopartículas metálicas, como foi mencionado no capítulo anterior. Esse ancoramento, também conhecido como decoração, pode ser feito por nanopartículas metálicas da mesma matriz ou com outro tipo de metal que consiga se ligar com ela, visando posteriores processamentos termomecânicos. A decoração é feita por métodos químicos, seja durante a própria síntese do nanocompósito ou previamente, por exemplo, usando métodos eletrolíticos.

Dependendo do tipo de metal aderido na superfície dos CNTs, a interface entre eles vai ser fraca ou forte. Entre os metais de transição somente os metais ferromagnéticos como Fe, Co e Ni formarão ligações com átomos de carbono, o que sugere a importância da interação magnética na hibridação p-d entre eles. Cálculos teóricos reportados por H. L. Zhuang [75] indicam que metais de

transição como o cobre não formariam ligações químicas fortes com os átomos de carbono. A energia de ligação calculada para o Cu foi de 3,27 eV comparada, por exemplo, com o Ni (5,78 eV) ou Fe (6,31 eV). O ferro e níquel também tem a facilidade de preencher os CNTs na cavidade oca quando as etapas de mistura com as sais metálicas em solução e calcinação empregam períodos de contato maiores a 24 horas [76]. Resultados similares ancorando nanopartículas de Ni na superfície externa dos CNTs foi apresentado por P. Ayala et al. [77] onde foram utilizados nanotubos dopados com nitrogênio. As nanopartículas de Ni foram firmemente aderidas devido a presença de uma camada de oxido na interface.

Na figura 3.2 são apresentados exemplos de decoração de nanotubos por nanopartículas de níquel.

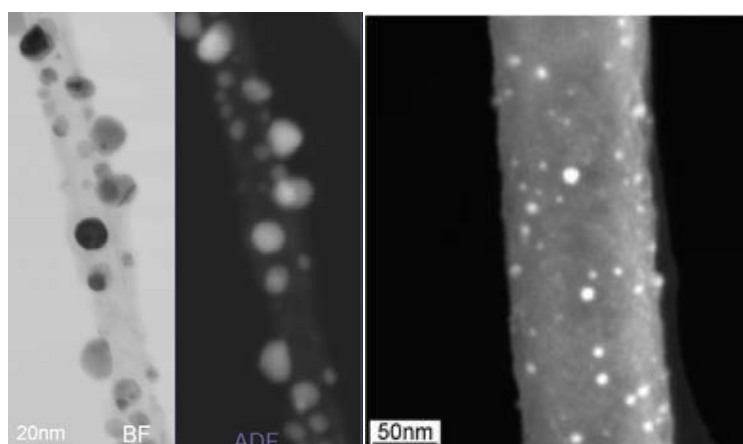


Figura 3.2. Imagens por TEM da decoração de nanotubos de parede múltipla por nanopartículas de níquel [77,78].

Assim como na funcionalização uma das variáveis na decoração é o tipo de solvente que vai ser usado para a mistura CNT-ions metálicos. Jean Phippe Tessonier et al.[78] realizou a deposição seletiva de nanopartículas metálicas dentro e fora de nanotubos de carbono de parede múltipla baseado na diferença em energias de interface entre soluções orgânicas e aquosas com a superfície dos CNTs. Os solventes orgânicos, devido a seu caráter lipopílico, molham melhor a superfície dos CNTs facilitando a decoração.

Estudos realizados para remoção de íons metálicos em solução por CNTs descrevem algumas variáveis importantes durante esse processo de mistura. Remoção de metais como cádmio (II) [79], zinco (II) [80], chumbo (II) [81], níquel (II) [82] e cobre (II) [83] indicam que são processos de adsorção

espontânea já que a energia livre de Gibbs calculada sempre foi negativa. Os dados termodinâmicos se baseiam nas equações de Langmuir e Freundlich [84].

O processo de remoção do cobre (II) de soluções aquosas usando CNTs é afetado por variáveis como pH da solução, tempo de contato, temperatura, concentração de CNTs e concentração de Cu(II) na solução. O pH da solução tem um efeito importante na carga superficial dos nanotubos. Com pH próximo a 6-7 os nanotubos ficaram superficialmente carregados negativamente o que melhora a atração eletrostática entre eles e os íons metálicos [80-83]. As melhores condições para adsorção do Cu pelos CNTs foram: tempo de contato entre CNT-Cu²⁺ de 120 minutos, pH entre 6 e 7 e temperatura de 60 °C [83]. Cabe mencionar que em todos os estudos de remoção de íons metálicos por CNTs em solução aquosa, a concentração destes últimos era bem maior que a dos íons metálicos (por exemplo, 1g/L de CNTs vs 20 mg/L de Cu²⁺). O processo de remoção de íons metálicos de Cu pelos CNTs é endotérmico, mas, dependendo da temperatura usada poderá afetar os grupos funcionais criados previamente durante a oxidação dos CNTs. Com pH ácidos ou muito básicos pode ocorrer desorção.

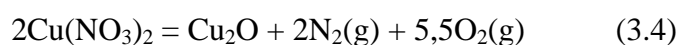
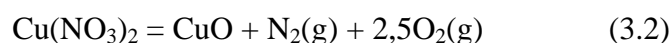
Outro processo de síntese química para decoração dos CNTs com nanopartículas metálicas é conhecido como método de Brust [85,86], onde a redução dos íons metálicos é feita com bases fortes em pH altamente básico, sem aplicação de temperatura.

Nesta tese foi escolhido o método de síntese química proposto por Mendoza, M.E. et al [25, 109] que consiste na mistura dos nanotubos de carbono de parede múltipla com nitrato de cobre em solução líquida (aquosa e THF), seguindo de dispersão com ultrassom, processo de dissociação e finalmente redução com atmosfera de hidrogênio.

3.1.2

Aspectos Termodinâmicos na Etapa de Dissociação do Nitrato de Cobre

O nitrato de cobre se caracteriza por ser solúvel em água e em poucos solventes orgânicos. Devido à estabilidade química dos nanotubos, tem como premissa que eles não vão reagir tanto na etapa de dissociação quanto na de redução. Quando uma solução contendo nitrato é aquecida a uma temperatura suficientemente alta, ocorre o processo de dissociação do nitrato para óxido, segundo as seguintes reações:



Ao avaliar as reações anteriores e calculando a variação da energia livre de Gibbs em função da temperatura, podemos observar que em condições de temperatura ambiente já esta acontecendo à dissociação, porém a cinética do processo é lenta. A partir de 200 °C temos a formação de CuO com desprendimento de NO₂ e O₂ como pode ser visto na figura 3.3.

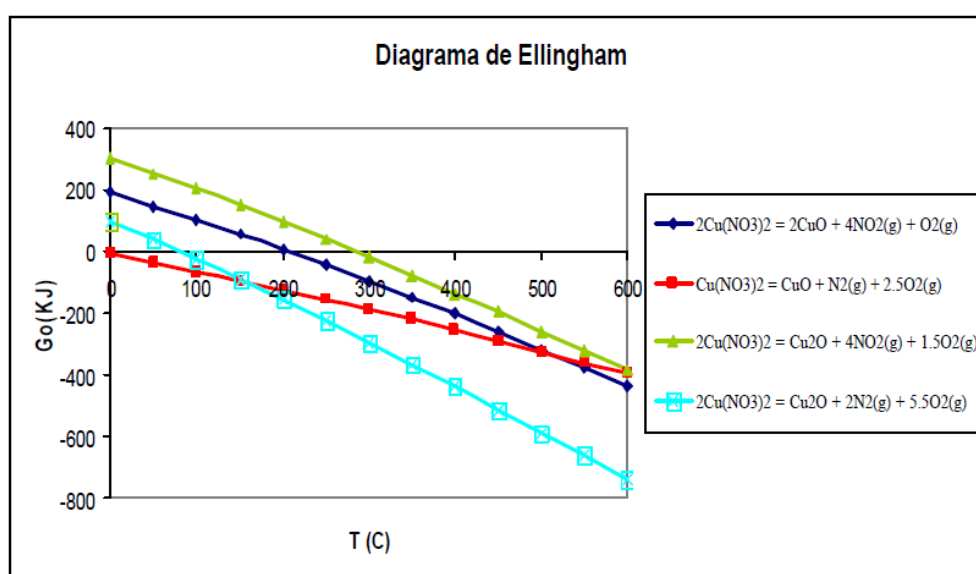
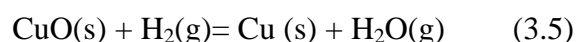


Figura 3.3. Variação da energia livre de Gibbs vs Temperatura, para as possíveis espécies a serem formadas na dissociação do nitrato de cobre [25].

3.1.3

Aspectos Termodinâmicos na Etapa de Redução dos Óxidos de Cobre.

Como foi estudado nos trabalhos de Mendoza, M.E. [25] e Motta, Marcelo [87], a espécie formada na dissociação de nitrato de cobre foi CuO. A redução desses óxidos com atmosfera de hidrogênio seguirá a equação 3.5:



Avaliando termodinamicamente mediante a variação da energia livre de Gibbs em função da temperatura (figura 3.4) para as reações de redução dos óxidos de cobre CuO e Cu₂O em atmosfera de hidrogênio, temos que o processo ocorre espontaneamente à temperatura ambiente. Aumentando a temperatura será

aumentada a velocidade do processo. Estudos feitos indicam que a 350 °C se consegue garantir a total redução de óxido de cobre para cobre metálico sem dano nos nanotubos de carbono.

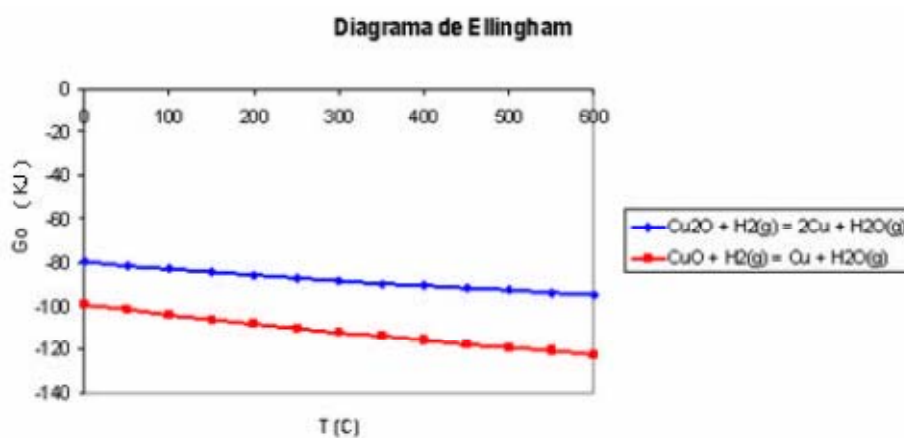


Figura 3.4. Variação da energia livre de Gibbs vs Temperatura, para redução de óxidos de cobre usando hidrogênio[25].

Em soluções orgânicas tem que ser levado em conta que a solubilidade do nitrato de cobre é diferente. Dependendo do tipo de solução durante o processo de dissociação variando o pH, pode ocorrer a precipitação de hidróxido de cobre, a qual é uma espécie estável que irá atrapalhar o processo de dispersão dos CNTs, assim como dificultaria o processo de redução usando hidrogênio. Por este motivo como será mencionado nos capítulos seguintes, também foi escolhido o tetrahydrofurano, por ser um bom dispersante por dissolver o nitrato de cobre e por ser estável a pH bem ácidos, na ordem de zero a quatro.

O cobre uma vez reduzido pode reoxidar não somente por ter afinidade com oxigênio, mas também pelo fato de apresentar estruturas nanométricas as quais incrementam a área superficial facilitando ainda mais a reoxidação. Como pode ser visto na figura 3.5, mantendo constante a pressão parcial de hidrogênio e aumentando a pressão parcial de água, o cobre vai reoxidar como Cu_2O por ser a fase mais estável.

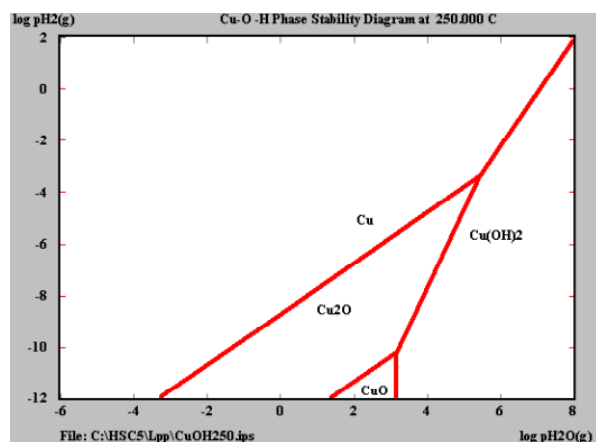


Figura 3.5. Diagrama de estabilidade de espécies, pH_2 vs pH_2O [25].

3.2 Compactação do Nanocompósito.

Uma vez obtido o nanocompósito em pó, este deverá ser submetido a etapas de consolidação e sinterização para obtenção de peças estruturais. A consolidação do pó geralmente é feita a frio, usando um molde apropriado, que dá a forma da pastilha por aplicação de pressão uniaxial. Uma etapa adicional é o uso de pressão isostática, a qual ajuda a densificar ainda mais o material devido à pressão exercida em todas as direções da amostra. O processo de compactação ocorre em várias etapas: escorregamento das partículas com pequena deformação, compressão elástica de pontos de contato entre as partículas, deformação plástica desses pontos até formar áreas de contato incrementando gradualmente o tamanho, e deformação massiva da massa inteira do pó. A etapa posterior é a sinterização onde a pastilha é submetida à temperatura para favorecer a difusão entre partículas e atingir a maior densidade do material em questão. Uma variante na consolidação do material é a aplicação de pressão e temperatura ao mesmo tempo. Nesse caso se incluem processos como pressão isostática a quente, pressão uniaxial a quente e o “*spark plasma sintering*” [54].

Nos processos de compactação de nanocompósitos deve-se avaliar também a pressão de compactação para não causar modificações ou danos estruturais nos CNTs. Estudos na aplicação de altas pressões em SWCNTs indicam que eles podem ser deformados em vários estágios. O primeiro está na faixa de 2-2,5 GPa, que corresponde a instabilidade da seção circular do nanotubo (forma oval). A segunda transição ocorre a 30 GPa, onde o nanotubo é deformado completamente [88]. Estudos similares foram feitos por A. Merlen et al [89] que aplicaram

pressão e temperatura ao mesmo tempo. À temperatura ambiente, os nanotubos de paredes simples não sofrem nenhuma modificação para pressão aplicada inferior a 2.4 GPa. Para pressões acima de 14 GPa e temperaturas da ordem de 1527 °C, os SWCNT foram transformados em diamante.

Já nanotubos de parede múltipla em estado purificado, sem a presença de solvente, se mostraram estáveis em condições de pressão entre 5,5 e 6,5 GPa e temperaturas entre 877 °C e 977 °C [90].

3.3 Sinterização

Sinterização é um processo de densificação e consolidação através da difusão com conseqüente crescimento de grão. Ela pode ser classificada em três categorias: sinterização em estado sólido, sinterização em fase líquida e sinterização reativa. A sinterização em fase líquida é a mais amplamente utilizada na indústria. Com a sinterização procura-se obter a densidade teórica do material aplicando a menor temperatura possível. A força motriz na sinterização é dada pela redução da energia livre superficial que se manifesta localmente como diferenças na curvatura. A ordem de grandeza é de poucos Joules/mol (J/mol), ao contrário das reações químicas, onde os valores são da ordem de kJ/mol. A diminuição da energia livre pode ocorrer de duas formas: eliminação das interfaces vapor/sólido e criação da área de contorno de grão seguida de crescimento de grão (densificação), e/ou redução da área superficial total pelo aumento do tamanho médio das partículas (coalescimento), como esquematizado na figura 3.6.

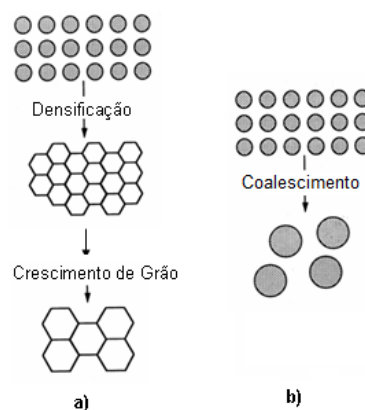


Figura 3.6. Esquema dos processos de densificação seguida por crescimento de grão (a) e de coalescimento (b) [91].

Os processos de coalescimento e densificação são competitivos entre si. As etapas que ocorrem durante a sinterização em estado sólido podem ser [91]:

- Contato inicial entre partículas. Existe formação pontos de união (pescoços).
- Crescimento de pontes de enlace. Aumenta o grão de união.
- Crescimento da porosidade. Podem desaparecer poros isolados e crescer grandes poros.
- Fechamento de enlaces entre poros. Ao fechar os canais de conexão entre poros começa ou isolamento dos mesmos. É considerado que se a porosidade é maior do que 10% os poros são interconectados, se é menor, os poros são isolados.
- Arredondamento de poros é devido ao crescimento de pescoços o qual é favorável em alta temperatura. Este fator é importante nas propriedades mecânicas.
- Densificação ou contração de poros. É a etapa mais importante na sinterização, pois aumenta a densidade do material compactado.

A taxa de sinterização depende de variáveis como: tipo de material, densidade inicial do corpo verde (compactação), tamanho de partícula, atmosfera do processo, taxa de aquecimento/resfriamento, temperatura máxima, tempo e aplicação ou não de pressão. Para efeitos desse trabalho, na produção de nanocompósitos vão ser revisados sumariamente dois processos: sinterização convencional e SPS.

3.3.1 Sistema Cu-C

Durante a sinterização e posteriores tratamentos termomecânicos é importante determinar se vai ocorrer alguma transformação de fase, formação de algum composto intermetálico ou precipitação. O cobre apresenta estrutura CFC com parâmetro de rede igual a 3,61 Å. Como foi explicado no capítulo 1, os nanotubos de carbono são folhas de grafeno (estrutura hexagonal) enroladas. O sistema C-Cu se caracteriza praticamente pela não miscibilidade entre eles (figura 3.7). No entanto existem indícios de que poderiam formar solução sólida [92].

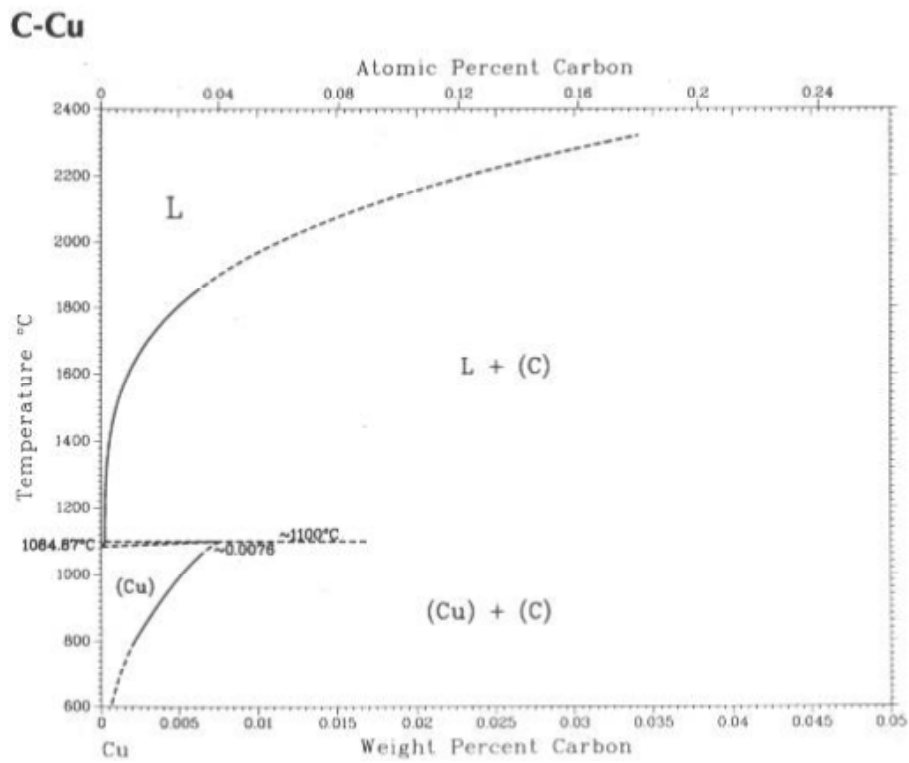


Figura 3.7. Diagrama de equilíbrio de fases do sistema Cu-C [93].

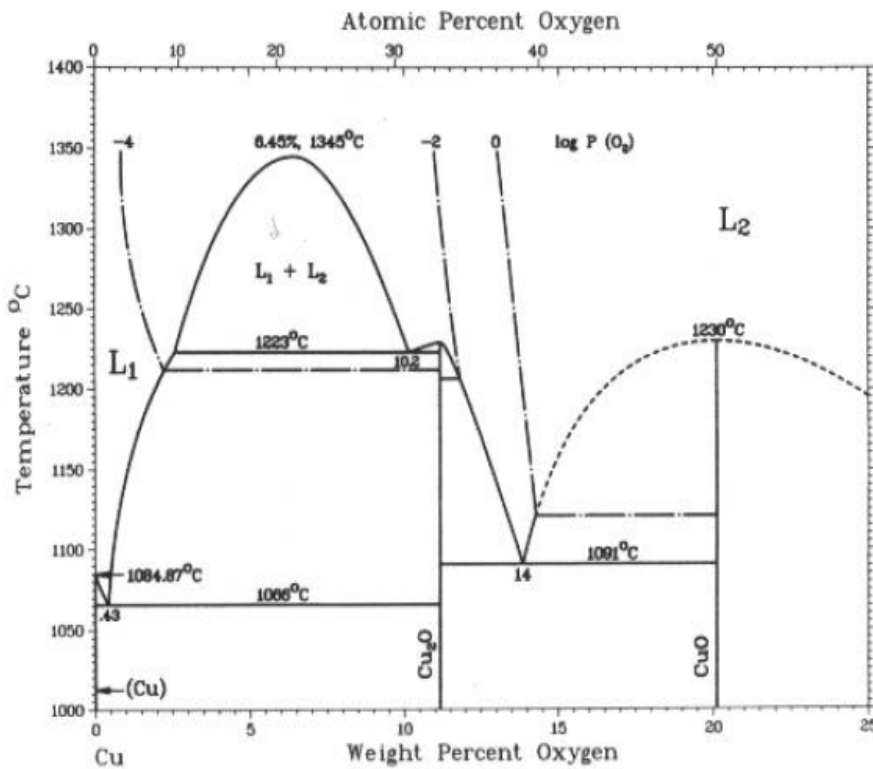


Figura 3.8 a) Diagrama de fases do sistema cobre – oxigênio [93].

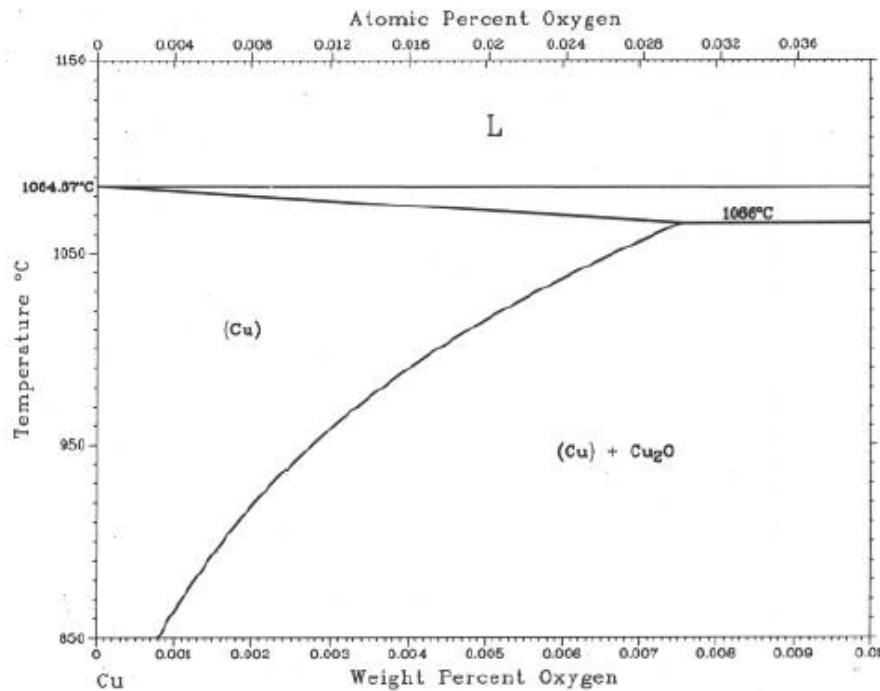


Figura 3.8 b) Diagrama de fases do sistema cobre - oxigênio. É apresentado em maior detalhe a solubilidade do oxigênio no cobre [93].

O cobre por natureza tende a ser facilmente oxidável. Ao se realizar um tratamento de sinterização ou de recozimento, uma das variáveis importantes é a atmosfera do sistema. A presença de pouca quantidade de oxigênio pode induzir, por exemplo, a precipitação de uma segunda fase de óxido de cobre (Cu₂O) ou, com o tempo, pode transformá-lo totalmente em óxido, como pode ser observado através dos diagramas de fases na figura 3.8.

3.3.2 Sinterização Convencional

Este é o método mais simples para produção de nanocompósitos estruturais. O nanocompósito em pó é compactado e sinterizado em atmosfera controlada ou em vácuo para evitar oxidação. Os CNTs podem atuar como obstáculos no movimento de contornos de grão e interfaces controlando o crescimento de grão.

Com este processo tem sido produzidos nanocompósitos de matriz de alumínio, cobre, prata [94, 95, 96], entre outros. Um dos problemas desse processo é a presença de poros na estrutura final do material, associados com a formação de clusters ou agregados de nanotubos. Processamentos termomecânicos posteriores podem ser aplicados para eliminação de poros. No entanto, pode

causar fragilidade e ruptura do material durante a deformação a frio, assim como endurecimento da matriz.

Chen et al [94] produziram um nanocompósito Cu-SWCNT por compactação isostática a 600 MPa seguido de sinterização convencional a 800 °C por 2h. Porosidade nas pastilhas na ordem de 2,47% foi calculada para uma fração volumétrica de CNTs de 8%. Ao aumentar a fração volumétrica, a porosidade também aumentou, o que indicaria que pode ter algum limite na incorporação de CNTs na matriz. Propriedades mecânicas como resistência ao dobramento aumentaram em 9% quando foi usado 8 vol% de CNTs [95]. Aumento no limite de escoamento de 90% em matrizes de alumínio foi reportado por I. Sridhar et al [96] utilizando 2 wt% MWCNTs. A densidade relativa foi superior a 99,9% por ter sido submetido à extrusão após a sinterização. Esse incremento nas propriedades é devido também à formação de uma fase intermediária Al_4C_3 na interface Al-CNT, o que assegura uma boa transferência de esforços mecânicos [97].

3.3.3 Sinterização Usando *Spark Plasma*

Os processos de sinterização assistidos ou ativados por corrente elétrica ECAS (*Electric Current Activated/assisted Sintering technique*) são usados para obter materiais densos, inclusive com estruturas nanométricas. Existem duas classificações de processos ECAS de acordo com a aplicação da corrente elétrica: sinterização por resistência (RS) e sinterização por descarga elétrica (SDE).

O primeiro envolve a aplicação de baixas voltagens (poucas dezenas de volts) e altas correntes (milhares de ampères) com fontes de corrente direta, alternada, retificada ou pulsada. A SDE usa energia elétrica armazenada num capacitor a qual é liberada de forma imediata através de pulsos no pó compactado. Altos valores de corrente e voltagem são empregados, além do fato de a mudança da corrente com o tempo (dI/dt) poder ser usada para testes, explorando fenômenos eletromagnéticos. Uma diferença entre os dois processos é o tempo de processamento característico. Na SDE o tempo está na ordem de 10^{-5} a 10^{-2} s, enquanto na RS é na ordem de 10^0 a 10^3 s [98].

O processo SPS é classificado dentro dos processos por resistência. Este tipo de técnica aplica simultaneamente uma corrente elétrica junto com uma

pressão mecânica para consolidar o pó ou sintetizar e densificar produtos com características estabelecidas. Um esquema deste processo pode ser observado na figura 3.9.

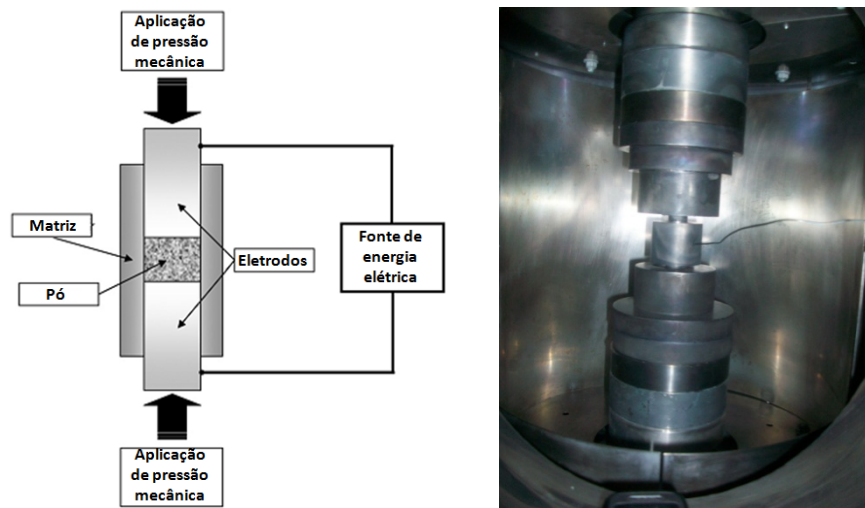


Figura 3.9. Esquema do processo SPS pode ser visto na figura da esquerda [98]. Na direita se apresenta uma imagem real do sistema (equipamento USP).

A corrente e carga aplicadas podem ser constantes ou variáveis através do processo de sinterização. O controle de temperatura do processo é realizado de forma controlada pelo ajuste da corrente elétrica.

As matrizes usadas para consolidar pós-metálicos podem ser condutoras ou isolantes. No caso de pós-isolantes a matriz tem que ser condutora para garantir o fechamento do circuito elétrico. Da mesma forma, os eletrodos ou espaçadores usados devem ser feitos de um material condutor como grafite, cobre, aço inox, etc.

O aquecimento de pós-condutores é devido ao efeito Joule e por transferência de calor desde a matriz, enquanto em pós-isolantes é devido somente ao último efeito mencionado.

Matrizes condutoras de grafite são amplamente usadas, mas apresentam um limitante mecânico uma vez que somente pode ser aplicadas baixas pressões (menor a 100 MPa). Por outro lado, tem a vantagem de atuar como componente redutor na sinterização. A pressão aplicada é uniaxial, no entanto, existem equipamentos com aplicação quase isostática ou isostática [99,100].

Acredita-se que as faíscas nas interfaces das partículas produzem o rápido aquecimento, o que melhora a taxa de sinterização. As taxas de aquecimento são

grandes podendo atingir até 1000 K/s. Os estágios que acontecem durante o processo de sinterização podem ser esquematizados na figura 3.10.

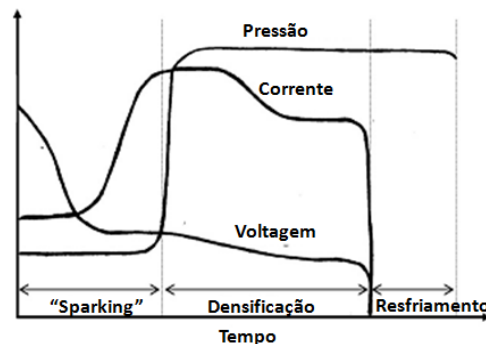


Figura 3.10. Gráfico de algumas variáveis de controle durante o processo SPS, mostrando os principais estágios do processo [98].

O controle das variáveis do processo como tensão, corrente, pressão e tempo é realizado previamente através de um programa computadorizado e os valores das variáveis a controlar são registrados automaticamente.

Este tipo de processo tem sido referência nos últimos anos para a produção de materiais nanocompósitos devido a suas altas taxas de aquecimento, menor tempo e temperatura de sinterização, o que leva a densificar rapidamente o material consolidado, mantendo estruturas nanométricas.

S. Diouf e A. Molinari [101] descreveram os mecanismos de densificação tendo em conta os efeitos de tamanho de partícula e pressão. Ao aplicar pressão ocorre arranjo de partículas assim como deformação localizada, deformação no volume e crescimento de pescoços. Os dois primeiros são melhorados quando o tamanho de partícula aumenta, enquanto a formação de pescoços é melhor quando o tamanho de partícula decresce. O trabalho conclui que o cobre em pó com tamanho de partícula na ordem de micrometros só é sinterizado acima de 650 °C. Zhang Zhaouhi et al. [102] dividiram os estágios de sinterização em quatro etapas: ativação e refinamento do pó, formação e crescimento de pescoços, densificação rápida e densificação por deformação plástica.

Com esse processo, obteve-se um aprimoramento nas propriedades mecânicas nas matrizes de alumínio, cobre, titânio e magnésio reforçadas com nanotubos de carbono [103]. O aumento na resistência à tração de 35%, 20% e de 300% foram reportados por Jin-zhi Liao [104], Esawi, AMK et al [105] e H.

Kwon et al. [106] em nanocompósitos com matriz de alumínio quando usaram 0,5 wt%, 2 wt% e 0,2 wt% CNTs, respectivamente.

Matrizes de cobre reforçadas com CNTs mostraram um aumento de 60% na resistência a tração utilizando 10 vol% MWCNTs. Aumento na dureza e resistência ao desgaste duas e três vezes maior quando comparada com cobre sem nanotubos foi atingida para nanocompósitos produzidos por mistura mecânica de pós e SPS [107,68]. Cha, S. I, Et al [108] e Kim, K.T. [68] reportaram melhora no módulo de elasticidade, obtendo os valores de 135 e 137 GPa para o volume de 10% de CNTs, enquanto para o cobre sem nanotubos os valores obtidos foram de 80 e 70 GPa respectivamente.