

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Materiais e Metalurgia

TRABALHO DE FORMATURA

Nome: Marcelo Silveira de Pádua

No. USP: 3316279

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO
PAULO**

Departamento de Engenharia de Materiais e Metalurgia

**Comparação do espalhamento de estanho e bismuto líquidos
empregando o programa Surface Evolver**

São Paulo

2005

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi por toda sua dedicação na orientação deste trabalho e pelos ensinamentos durante esses anos.

À minha família pela paciência e todo amor dispensado.

Aos amigos que fiz dentro desta escola os quais tornam esse período inesquecível.

À Escola Politécnica pela minha formação e conhecimento adquirido.

Por tua vida,
Tua ausência.
Tua presença.
Por tuas conquistas.
Tua postura.
Tua candura.
Tua doçura.
Por tua luz.
Tua graça.
Tua paz.
Ser capaz.
Por tuas lágrimas.
Teu sorriso.
Tua beleza.
Tua grandeza.
Por teus olhos.
Teu brilho.
Tua caridade.
Tua amizade.
Pra vencer.
Pra crer.
(Anônimo)

Índice

Resumo	1
1-Introdução	2
2-Revisão Bibliográfica	4
2.1-Molhamento e espalhamento	6
2.2-Tensão superficial e energia de superfície	9
2.3- Equacionamento da energia de superfície	10
2.4-Composição da liga metálica e molhamento	11
2.5-Ensaio da gota sésil	12
2.6-Programa computacional Surface Evolver	14
2.6.1-Conceitos usados pelo programa	14
2.6.2-Gota com gravidade	16
3-Objetivos	20
4-Materiais e métodos	21
5-Resultados e discussões	23
6-Conclusões	37
7-Referências bibliográficas	38

Índice de Figuras

Figura 1: Junta preenchida por capilaridade	4
Figura 2: Líquido molhando o substrato sólido: $\theta < 90^\circ$	7
Figura 3: Líquido não molhando o substrato sólido: $\theta > 90^\circ$	8
Figura 4: Ângulos da gota séssil	13

Índice de Gráficos

Gráfico 1: ângulo de contato em função do tempo (Sn)	28
Gráfico 2: diâmetro em função do tempo (Sn)	28
Gráfico 3: ângulo de contato em função do tempo (Bi)	29
Gráfico 4: diâmetro em função do tempo (Bi)	29
Gráfico 5: velocidades de espalhamento em função do tempo para o Sn	30
Gráfico 6: velocidades de espalhamento em função do tempo para o Bi	31

Índice de Tabelas

Tabela 1: densidades do estanho e bismuto para 280°C e 350°C	22
Tabela 2: mostra os ângulos de contato e o diâmetro da gota em diferentes tempos para o Sn	28
Tabela 3: mostra os ângulos de contato e o diâmetro da gota em diferentes tempos para o Bi	29
Tabela 4: tabelas para velocidades de espalhamento do Sn em 280°C e 350°C respectivamente	30
Tabela 5: tabelas para velocidades de espalhamento do Bi em 280°C e 350°C respectivamente	31
Tabela 6: Obtenção da escala E	32

Resumo

O estudo do molhamento e espalhamento de ligas sobre superfícies é importante para estudar e prever comportamentos em processos de junção de materiais, principalmente na brasagem e na soldagem branda.

Neste trabalho serão apresentados resultados de formas de gotas líquidas, de estanho (Sn) e de bismuto (Bi), a partir da variação de diferentes ângulos de contato do líquido com o substrato. Para tal foi empregado o programa SURFACE EVOLVER, que foi desenvolvido para gerar o formato de uma gota líquida através de simulação do formato da gota. Os resultados simulados foram comparados com os obtidos experimentalmente pelo ensaio da gota séssil.

Os resultados mostraram que o programa permite prever os formatos de gotas bem similares aos reais. Da mesma maneira foi possível prever o espalhamento a partir de resultados experimentais.

1) Introdução.

Há varias formas e técnicas de junção de materiais como: uso de rebites ou parafusos, a colagem, a brasagem, a soldagem branda e a soldagem. No entanto somente nos três últimos há interações intermoleculares fortes.

A soldagem, a soldagem branda e a brasagem são os processos de união de materiais (particularmente nos metais) mais importantes do ponto de vista industrial, sendo extensivamente utilizadas na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas. A sua aplicação atinge desde pequenos componentes eletrônicos até grandes estruturas e equipamentos (pontes, navios, vasos de pressão, etc.). A brasagem e a soldagem branda diferem da soldagem pelo fato do metal de base não ser fundido para formação da união, sendo a junta preenchida por capilaridade [1]. A soldagem branda caracteriza-se por utilizar temperaturas relativamente baixas (inferior a 450°C) [2].

Atualmente a soldagem branda é utilizada em diversos segmentos industriais, desde radiadores automotivos, até micro-circuitos usados em sofisticados computadores. Para se ter uma idéia de sua importância, um rádio comum possui cerca de 500 juntas soldadas, um televisor colorido 2000 juntas soldadas e grandes computadores apresentam mais de 100.000 pontos de solda [3]. O grande campo de utilização da soldagem branda na indústria eletrônica se dá pelas diversas vantagens que este tipo de junção apresenta como: as boas características mecânicas e elétricas aliado ao baixo custo das ligas utilizadas, a simplicidade dos equipamentos usados no processo, assim como a grande facilidade de automatização da produção [1]. No entanto o uso da soldagem branda já era utilizado desde

a antiguidade. Os romanos já empregavam ligas de estanho e chumbo para fechar tubos de água.

Como o chumbo causa diversos malefícios à saúde [4], dependendo da concentração inalada ou ingerida, o desenvolvimento de ligas destinadas ao uso na soldagem branda é de fundamental importância tanto para aplicações em alta tecnologia como para o atendimento de legislações ambientais. Por exemplo, ligas que apresentam bons desempenhos operacionais na junção de materiais são as constituídas por chumbo e estanho. Por isso a utilização de ligas de chumbo (altamente tóxica) vem sofrendo restrições, devendo ser totalmente substituído, em um futuro próximo, em muitos países do primeiro mundo. Assim, o avanço de áreas de alta tecnologia a pesquisa de materiais que aliem, simultaneamente, qualidade adequada, custo razoável e baixo impacto ambiental é de fundamental importância para todos.

Para auxiliar no desenvolvimento de novas ligas para soldagem branda são empregados equipamentos que permitem a determinação da energia de superfície líquido/vapor de ligas aplicadas à soldagem branda. O estudo comparativo do molhamento e do espalhamento são parâmetros importantes na substituição de ligas para soldagem branda.

Atualmente existe uma procura para obter métodos que permitam obterem dados como ângulo de contato ou diâmetro da gota com o tempo para avaliar as características de novas ligas para soldagem branda. Assim, tentar-se-á comparar os resultados obtidos com o ensaio da gota séssil e comparado com um método computacional para a forma final de uma gota de metal líquido.

2) Revisão Bibliográfica.

Nos processos de junção de metais que utilizam a brasagem ou a soldagem branda não há a fusão do metal de base e a junta é preenchida por capilaridade. Na brasagem, a temperatura *liquidus* do metal de adição é maior que 450°C, enquanto que na soldagem branda é inferior a 450°C, quando se toma como referência o aço como metal de base [5].

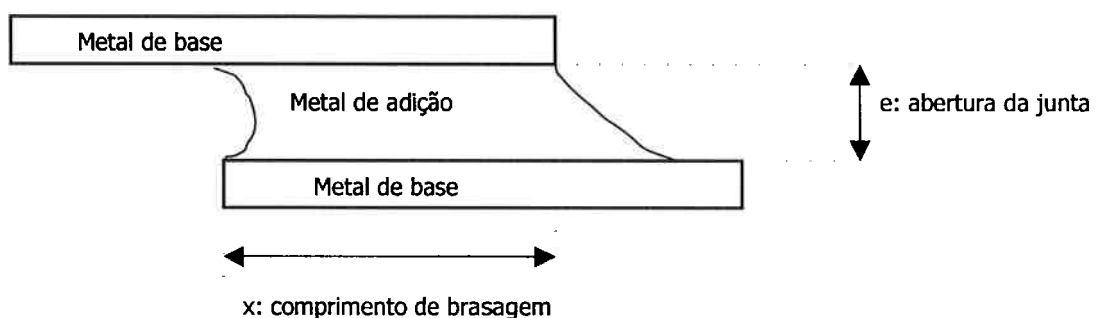


Figura 1: Junta preenchida por capilaridade tanto na brasagem como na soldagem branda.

Alguns cuidados nesses processos devem ser tomados para que ocorra a junção dos materiais pelos métodos descritos acima. Esses cuidados são:

1. O metal de adição deve receber energia através de chama, maçarico, laser ou de outra fonte de calor;
2. A temperatura *liquidus* do metal de base deve ser bem maior que a temperatura *liquidus* do metal de adição;
3. A superfície a sofrer junção deve apresentar-se isenta de óxidos, graxas, rebarbas ou impressões digitais, exigindo o uso de fluxos líquidos ou de atmosferas protetoras.

No estudo da brasabilidade devem ser analisados conjuntamente o processo, o metal base e o metal de adição. Em relação ao processo, deve-se optar entre o uso de fluxo ou de atmosfera protetora, além de se combinar satisfatoriamente o tempo e a temperatura de brasagem. Devem também ser estudadas as possíveis interações entre o metal de adição e o metal de base, pois a formação de intermetálicos poderá induzir a fragilização do material.

Para escolher o metal de base deve-se analisar as seguintes propriedades para a melhor seleção:

1. Boas propriedades mecânicas;
2. Boa resistência à corrosão;
3. Bom desempenho frente a ciclagem térmica;
4. Bom desempenho da junta soldada.

Para o metal de adição é necessário considerar-se a presença de elementos de liga que provoquem a formação de óxidos aderentes ou que elevem a condutividade térmica do sistema, gerando aquecimento adicional e desnecessário do substrato.

O metal de adição deve ser compatível com o metal de base, verificando-se também a resistência mecânica na temperatura e no ambiente de serviço, tenacidade, resistência à corrosão, resistência à fadiga além de propriedades térmicas e elétricas, quando aplicável.

O metal de base não deve possuir superfície rugosa, pois a rugosidade na superfície exige trabalho mecânico adicional durante a movimentação do líquido. Entretanto, não deve ser extremamente polida, para que possa garantir uma área de contato satisfatória entre o sólido e o líquido, favorecendo a interação entre ambos.

Como o fluxo é viscoso no estado líquido, a abertura da junta deve seguir recomendações específicas, pois esta pode influenciar o escoamento do metal de adição, a retenção do fluxo, a porosidade e no efeito do preenchimento da junta por capilaridade.

Tento em vista o exposto anteriormente, verifica-se que o desempenho adequado da junta depende da compatibilização de características específicas dos materiais envolvidos, como os tipos de reticulados cristalinos e as ligações químicas presentes. Essas características estão relacionadas com a molhabilidade das interfaces pelo metal de adição e com o limite de resistência da junta. Normalmente o molhamento de um sólido por um líquido requer a existência de um grau mínimo de afinidade entre ambos, exigindo o contato íntimo entre as superfícies [5].

2.1) Molhamento e espalhamento.

No processo de molhamento de uma superfície sólida por um líquido é necessária a ocorrência de interações específicas entre as energias de superfícies do sólido e do líquido na interface definida por ambos [5]. A energia de superfície está relacionada com as energias de ligações interatômicas ou intermoleculares e com a energia de vaporização.

Durante a soldagem branda, há basicamente três fases:

1. A fase sólida (substrato);
2. A fase líquida (metal de adição);
3. O fluxo (gasoso ou fluxo liquefeito).

Devido a essas três fases definem-se as seguintes três classes de energias de superfície:

1. γ_{SL} : energia de superfície ou tensão superficial sólido/líquido.

2. γ_{LV} : energia de superfície ou tensão superficial líquido/vapor (ou fluxo liquefeito quando aplicável).
3. γ_{SV} : energia de superfície ou tensão superficial sólido/vapor (ou fluxo liquefeito quando aplicável).

As tensões superficiais são tensores e não vetores, supondo que o fluxo seja gasoso, e o ângulo θ definido entre os “tensores” relacionados com as três energias de superfície nas interfaces líquido/vapor, sólido/vapor e sólido/líquido é denominado de ângulo de contato.

O molhamento ou não do substrato pela gota líquida é definido de acordo com os valores assumidos por θ na situação de equilíbrio. O perfil da gota revela o θ que define:

1. $\theta = 0^\circ$: o molhamento é ideal;
2. $0^\circ < \theta < 90^\circ$: o líquido molha o substrato sólido;
3. $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$: o líquido não molha o substrato sólido.

As figuras 2 e 3 ilustram, respectivamente, os casos de molhamento e não-molhamento, descritos anteriormente.

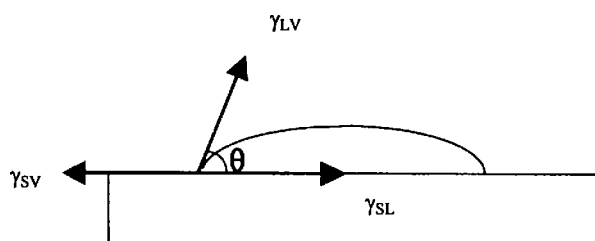


Figura 2: Líquido molhando o substrato sólido: $\theta < 90^\circ$

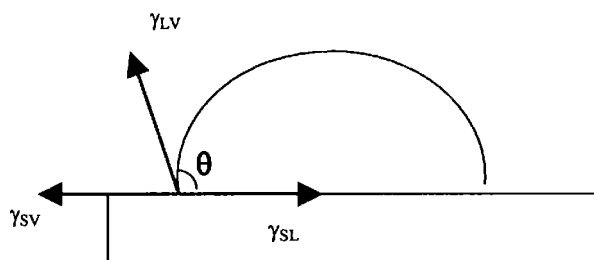


Figura 3: Líquido não molhando o substrato sólido: $\theta > 90^\circ$

Young descreveu em 1805 [6] a situação de equilíbrio, na qual é observada uma configuração de mínima energia, através da equação (1):

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

Uma junta de boa qualidade está relacionada com um bom molhamento da fase sólida pela fase líquida. Este bom molhamento é definido fundamentalmente por um baixo ângulo de contato determinado pelas fases sólida e líquida.

A utilização da equação de Young está condicionada à determinação das energias de superfície citadas na referida expressão. O ensaio da gota séssil possibilita a determinação experimental da energia de superfície líquido/vapor. As medidas do ângulo de contato e da energia de superfície sólido/vapor permitem calcular a energia de superfície sólido/líquido [5]. Por isso o estudo físico-químico de interfaces é um pré-requisito para a análise do comportamento de juntas obtidas pelo processo de brasagem.

2.2) Tensão superficial e energia de superfície.

O trabalho $d\tau$ realizado por uma força constante $\vec{F} = F\vec{i}$ no deslocamento $d\vec{x} = dx\vec{i}$ de uma interface plana móvel é dado por:

$$d\tau = \vec{F} \cdot d\vec{x} = F\vec{i} \cdot dx\vec{i} = F \cdot dx \quad (2)$$

A tensão superficial γ é definida como força por unidade de comprimento, ou seja:

$$F = \gamma \cdot l \quad (3)$$

Implicando em:

$$d\tau = \gamma \cdot l \cdot dx \quad (4)$$

No entanto, o produto $l \cdot dx$ equivale à variação de área dA que ocorre na superfície plana, ou seja, pode-se escrever:

$$d\tau = \gamma \cdot dA \quad \Rightarrow \quad \gamma = \frac{d\tau}{dA} \quad (5)$$

Portanto a unidade de γ pode é dada por J/m^2 (Joule por metro quadrado) ou por N/m (Newton por metro). Assim, o parâmetro γ pode ser denominado tanto de energia de superfície por unidade de área como de tensão superficial.

O termo tensão superficial pode sugerir, erroneamente, que a superfície do líquido, em contato com um gás, é constituída por uma espécie de “película” capaz de expandir-se. Já o termo energia de superfície implica que é preciso a realização de trabalho para a

formação de área superficial mais extensa, ou seja, é necessária a transferência de energia para trazer moléculas situadas no interior da fase para a região superficial.

2.3) Equacionamento da energia de superfície.

Suponha que uma superfície tridimensional, cujos raios de curvatura principais sejam R_1 e R_2 , sofra expansão infinitesimal.

Durante à expansão, haverá uma diferença de pressão ΔP através da superfície que atuará na superfície. Desse modo, obtém-se a equação de Young-Laplace [5]:

$$\Delta P = \gamma \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (6)$$

Como se trata de variação de pressão hidrostática aplica-se a lei de Stevin, e obtém-se a equação [1,2]:

$$\Delta P = \Delta \rho \cdot g \cdot h + \frac{2 \cdot \gamma}{b} \quad (7)$$

Onde: $\Delta \rho$ representa a diferença de densidade entre o líquido e o gás, g representa a aceleração da gravidade local, h corresponde à altura da gota e b é uma constante correspondente ao ponto de máximo da curva.

Substituindo a expressão (7) na expressão (6), obtém-se:

$$\Delta \rho \cdot g \cdot h + \frac{2 \cdot \gamma}{b} = \gamma \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (8)$$

Como matematicamente, uma curva contida no plano cartesiano xOy, tem raios de curvaturas dados por (9) e (10) e considerando-se que a superfície corresponda a uma calota esférica, por isso R_1 e R_2 iguais. Aplicando-se (9) e (10) em (8), obtém-se a equação (11).

$$\frac{1}{R_1} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{3/2}} \quad (9)$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{\frac{dy}{dx}}{x \cdot \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{1/2}} \quad (10)$$

$$\gamma_{LV} = \gamma = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot h}{2 \cdot \left(\frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{3/2}} - \frac{1}{b} \right)} \quad (11)$$

Com a equação (11) é possível determinar a tensão superficial através do ensaio da gota séssil.

2.4) Composição da liga metálica e molhamento.

A energia de superfície líquido/vapor é função da composição química da liga metálica que define o metal de adição [4]. A análise do diagrama de fases da liga indica alterações de composições e temperatura de trabalho a serem adotadas.

Cada ponto do diagrama de fases define uma composição e uma temperatura que correspondem a um ponto de mínima energia. Destes pontos, nos diagramas de fase eutéticos, o eutético é um ponto de especial interesse no projeto de uma nova liga. Uma liga de composição eutética é a que apresenta ponto de fusão mais baixo e menor viscosidade em função da temperatura, favorecendo o molhamento e o espalhamento.

Caso ocorra uma solidificação não isotérmica, o intervalo de solidificação está relacionado com a eficiência no preenchimento da junta. Quanto maior for o intervalo de solidificação, maior será a dificuldade no preenchimento da folga pelo metal de adição. Além disso, a extensão do intervalo de solidificação indica uma tendência da liga em apresentar microporosidade pela contração de solidificação, que se refletirá no comportamento mecânico da junta em serviço.

2.5) Ensaio gota séssil.

O ensaio da gota séssil consiste em estudar o comportamento de uma gota de líquido em um sólido horizontal. Este ensaio permite medir a tensão superficial líquido/vapor, quando o líquido não molha o substrato. ou o ângulo de contato e a

cinética do espalhamento, quando o líquido molha o substrato. No caso de não molhamento emprega-se a equação (11) para determinar a tensão superficial. A figura 4 mostra esquematicamente o ensaio da gota séssil.

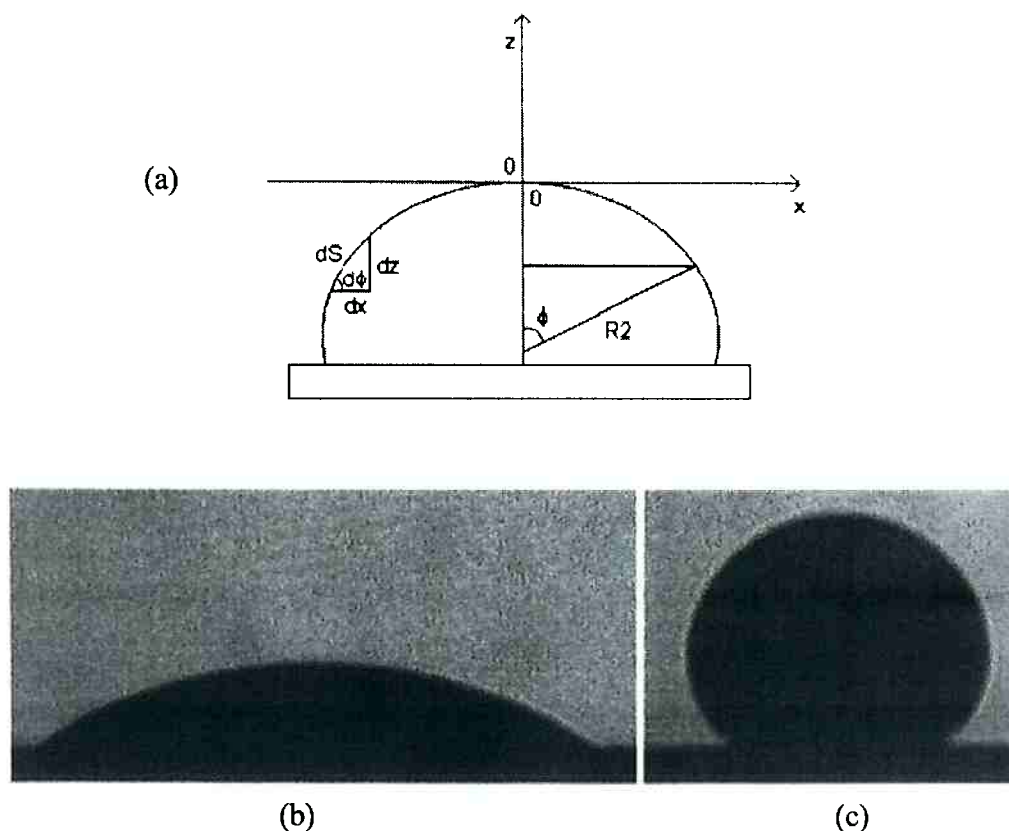


Figura 4 – (a) Esquema do ensaio da gota séssil; (b) Gota de líquido que molha o sólido e (c) gota de líquido que não molha o sólido [4, 7, 8].

Alguns autores propuseram outros métodos analíticos para a medida da tensão superficial líquido/vapor baseados na forma elíptica de uma gota séssil [4,7,8] ou na medida de pontos específicos da mesma. A partir de década de 1980, com a popularização do uso de microcomputadores e sistemas de aquisição de dados, γ_{LV} pôde ser calculado pela análise de todo o perfil da gota séssil. Esta análise pode ser dada pelo

ajuste do melhor perfil da gota teórica, obtida pela resolução numérica, pelo método de Runge-Gutha da equação diferencial de Laplace ou pelo método de Basforth e Adams.

2.6) Programa computacional Surface Evolver.

O programa computacional utilizado nesse trabalho é o Surface Evolver desenvolvido por Brakke [9]. Trata-se de um programa para o estudo da evolução de superfícies sujeitas a forças tais como: tensão superficial, forças elásticas, pressão, etc, tendo como saída um gráfico desenhado pelo resultado das interações dessas forças.

2.6.1) Conceitos usados pelo programa.

O programa Surface Evolver utiliza elementos geométricos básicos para representar uma superfície. Esses elementos básicos são: vértices, bordas, faces e corpos. Os vértices são pontos no espaço. As bordas são segmentos de linha reta que juntam pares dos vértices. As faces são triângulos lisos limitados por três bordas. Uma superfície é uma união das faces. Um corpo é definido pela limitação das faces. Não há nenhuma limitação em quantas bordas podem compartilhar de um vértice nem em quantas faces pode compartilhar de uma borda. Assim as topologias arbitrárias são possíveis, incluindo as junções triplas das superfícies características de películas do sabão.

As bordas e as faces são orientadas para finalidades da contabilidade, mas não há nenhuma limitação na orientação de faces vizinhas. As superfícies desorientadas são assim

possíveis. Cada superfície é julgada para ter uma energia total, levantando-se da tensão de superfície, da energia gravitacional, e possivelmente das outras fontes. É esta energia que o Evolver minimiza. Nenhuma unidade de medida particular é usada. O programa trata somente dos valores numéricos. Se você desejar relacionar os valores de programa ao mundo real, a seguir todos os valores devem estar dentro de um sistema consistente, tal como o sistema internacional (MKS) ou o sistema inglês (CGS) de unidades.

O 'datafile' do programa possui uma linha de texto que especifica a superfície inicial e que pode ser modificada. A operação básica do Evolver é ler dentro uns comandos 'datafile' de acordo com a tomada do usuário. O alerta de comando principal é *'Enter comand'*.

Os comandos mais comuns são uma letra, às vezes com um parâmetro numérico. Os comandos o mais freqüentemente usados são:

1. **g n** : para fazer n interações desejadas('g' do inglês 'go');
2. **r** : para refinar a superfície segundo sua energia(do inglês 'refine')
3. **s** : para plotar a superfície formada(do inglês 'show')
4. **P** : para opções de saída da figura plotada(do inglês 'plot')
5. **q** : para sair do programa(do inglês 'quit')

Há também uma linguagem de comando mais elaborada. O Evolver lê somente linhas completas. Cada iteração é uma etapa da evolução. Para cada etapa do refinamento é calculada a força em cada vértice pelo gradiente da energia total da superfície em função da

posição desse vértice. A força dá o sentido do movimento. Depois é feita uma movimentação para equilibrar as forças em cada vértice.

2.6.2) Gota com gravidade.

Este modelo é uma gota de líquido que está sobre uma superfície com ação ou não da gravidade. O ângulo do contato entre a superfície da gota e a superfície é ajustável, simulando os graus diferentes molhamentos em o líquido molham a superfície.

A gota começa como um cubo com uma face (face 6 do exemplo do cubo) na superfície, no plano $z = 0$. Deve-se declarar o ângulo do contato entre a mesa e a face 6, que permanecer sobre a superfície. Isso para dar-lhe uma tensão de superfície diferente do que o valor inicial, mostrado na figura 5. Assim que o ângulo do contato é inserido preferivelmente omite-se a face 6 e às bordas em torno da mesma. Desse modo integrando a energia das superfícies deve resultar na mesma energia na mesma energia inicial com a face 6. Se nós deixarmos a densidade da energia da relação para a face 6 ser T , a seguir nós queremos um vetor de orientação \mathbf{w} tal que:

$$|T \mathbf{k} \cdot d\mathbf{S}| = \mathbf{w} \cdot d\mathbf{l} \quad \text{/face 6/corpo com a face 6/}$$

Pelo Teorema de Green torna-se necessário somente $\mathbf{w} = T \mathbf{k}$, assim orientando temos $\mathbf{w} = -T y \mathbf{i}$, onde $\mathbf{i} \mathbf{j} \mathbf{k}$ são os vetores padrão da base da unidade. Na prática, escreve-se apenas uma integral de linha que some acima das tiras da superfície.

Basicamente o programa gera superfícies triangulares e calcula as energias dessas a partir de suas áreas, orientando-as matematicamente. Essas faces são sucessivamente geradas com o comando para o refinamento (r). A partir do teorema de Green descrito acima, esses valores são convertidos em uma integral de linha, onde cada borda terá diferentes tensões superficiais, o que causa um gradiente de tensões nos vértices, que a partir das interações no programa tenta minimizá-las com a movimentação desses vértices (comando g).

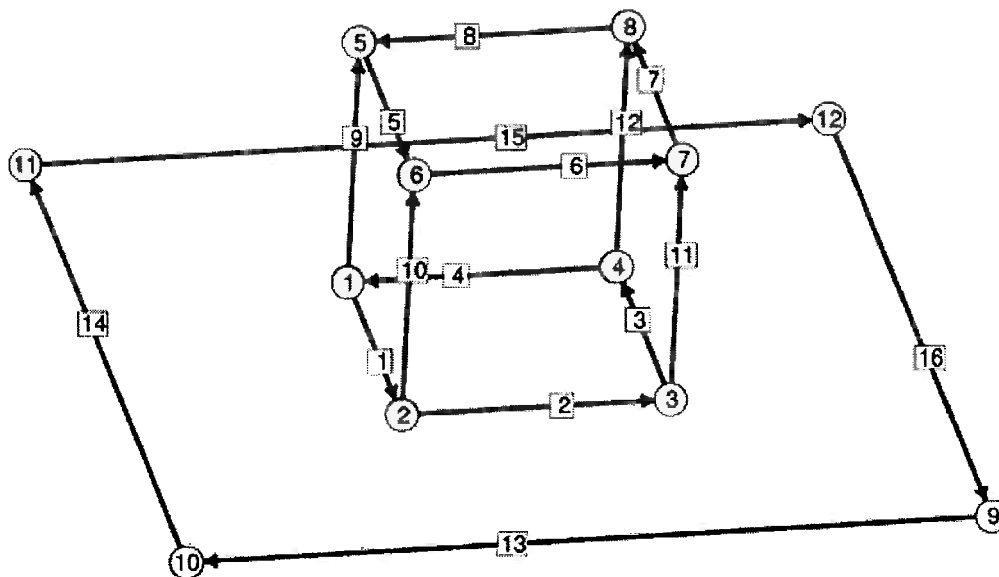


Fig. 5 Esqueleto inicial da gota sobre uma superfície, com vértices e bordas numerados.

A título de ilustração é apresentado o 'datafile' do programa para simular uma gota de líquido sobre um sólido:

```
// mound.fe
// Evolver data para prescrever a gota em cima do plano com
// gravidade.
// Angulo de contato com o plano pode ser variado.

PARAMETER angle = 90 // angulo inferior entre a face e a
superfície, graus
```

```

gravity_constant 0 // começa com gravidade zero.

#define WALLT(-cos(angle*pi/180))// tensão superficial da face no
plano /

constraint 1 /* para a superfície */
formula: x3 = 0
energy: // contante para o angulo
e1: -(WALLT*y)
e2: 0
e3: 0

vértices
1 0.0 0.0 0.0 constraint 1 /* 4 vértices no plano */
2 1.0 0.0 0.0 constraint 1
3 1.0 1.0 0.0 constraint 1
4 0.0 1.0 0.0 constraint 1
5 0.0 0.0 1.0
6 1.0 0.0 1.0
7 1.0 1.0 1.0
8 0.0 1.0 1.0
9 2.0 2.0 0.0 fixed /* para a superfície */
10 2.0 -1.0 0.0 fixed
11 -1.0 -1.0 0.0 fixed
12 -1.0 2.0 0.0 fixed

bordas /* given by endpoints and attribute */
1 1 2 constraint 1 /* 4 bordas sobre o plano */
2 2 3 constraint 1
3 3 4 constraint 1
4 4 1 constraint 1
5 5 6
6 6 7
7 7 8
8 8 5
9 1 5
10 2 6
11 3 7
12 4 8
13 9 10 fixo /* para superfície */
14 10 11 fixo
15 11 12 fixo
16 12 9 fixo

faces /* orientador de bordas */
1 1 10 -5 -9
2 2 11 -6 -10
3 3 12 -7 -11
4 4 9 -8 -12
5 5 6 7 8
7 13 14 15 16 densidade 0 fixada /* para a gota na superfície
*/

corpos /* um corpo definido com sua face orientada */
1 1 2 3 4 5 volume 1 density 1

lê-se

```

re := refina bordas onde a _constraint 1

A utilização deste programa, a partir de dados experimentais pode ser uma ferramenta par estudar tanto o molhamento como o espalhamento de um líquido sobre um sólido.

3) Objetivos.

Os objetivos desse trabalho são:

- Usar um programa computacional para gerar imagens de gotas de Sn e Bi líquidos, com diferentes ângulos de contato obtidos experimentalmente.
- Medir o diâmetro da calota esférica para diferentes ângulos de contados, obtidos experimentalmente, para diferentes velocidades de espalhamento em diferentes temperaturas.
- Comparar os resultados obtidos por simulação do espalhamento para os metais estanho (Sn) e bismuto (Bi) com resultados experimentais.

4) Materiais e métodos

Para este trabalho foi usado um programa computacional, Surface Evolver desenvolvido pelo Prof. Dr. Brakke [7], no qual a partir de interações matemáticas que minimiza a energia da gota para diferentes ângulos de contato, obtêm-se sucessivas figuras geométricas.

Também foi utilizado o programa gerador de imagens, Glut win 32, o qual captura os dados matemáticos e o transforma em um resultado geométrico (figura).

Com a finalidade de normalizar os testes a seguinte seqüência de comandos foi tomada como entrada no programa numérico:

Entrar no datafile mound.fe

angle := /comando para ângulo de entrada/

set_density := /comando para densidade/

G 0 /definindo gravidade igual a zero/

re /primeiro refinamento de bordas/

g 10 /primeira fase de dez interações /

r /primeiro refinamento de faces/

re /segundo refinamento de bordas/

g 10 /segunda fase de dez interações/

r /segundo refinamento de faces/

re /segundo refinamento de bordas/

g 10 /terceira fase de dez interações/

r /terceiro refinamento de faces

re /terceiro refinamento de bordas/

hessian /interações final máximo/

s /plotar a figura final/

Como descrito nos comandos acima é necessário entrar com as densidades, dessa forma foram usadas as densidades da tabela abaixo:

Material	Temperatura °C	Densidade g/cm ³
Sn	280	6.971
	350	6.928
Bi	280	10.056
	350	9.963

Tabela 1: densidades do estanho e bismuto para 280°C e 350°C.

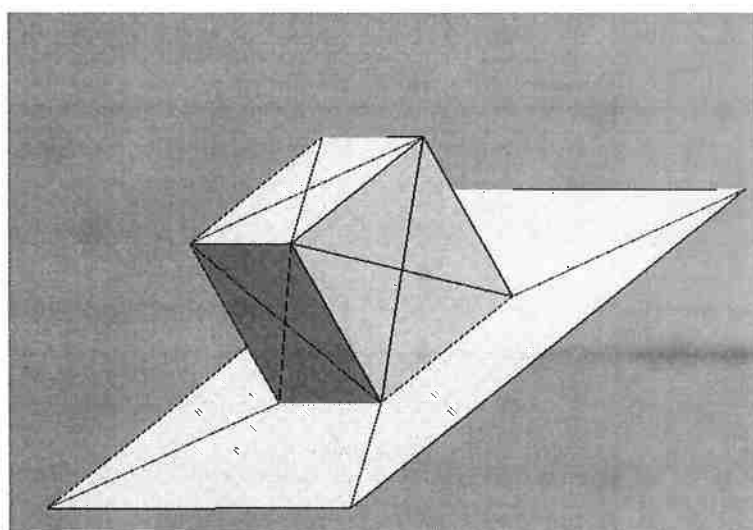
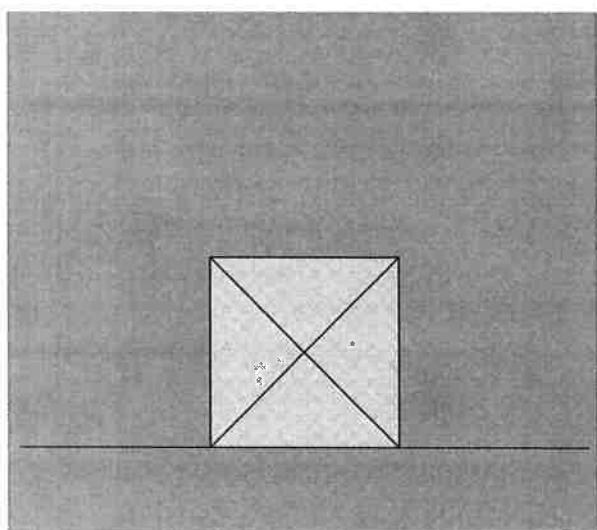
Após o programa gerar a imagem da gota, usou-se para medição do diâmetro da mesma uma régua com precisão milimétrica.

Os dados obtidos foram inseridos no programa Microsoft Excel para desenhar gráficos a partir desses dados para que os mesmos fossem analisados.

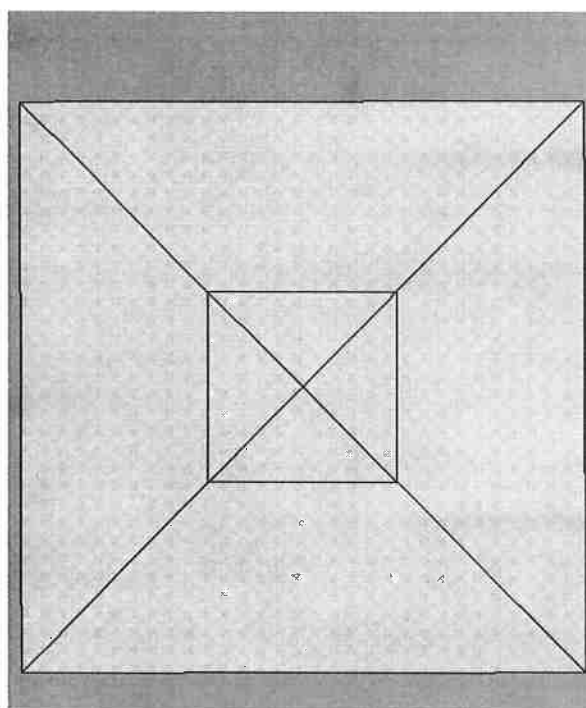
5) Resultados e discussões

O programa computacional usado (Surface Evolver) nesse trabalho tem como saída resultados matemáticos, que a partir do programa Glut-win32 gera uma imagem tridimensional. Dessa forma algumas perspectivas da mesma figura estão demonstradas abaixo como exemplos.

Cubo gerado pelo Surface Evolver para gerar a gota inicial:



No sentido horário temos respectivamente: vista horizontal, vista em perspectiva e a vista vertical do cubo.

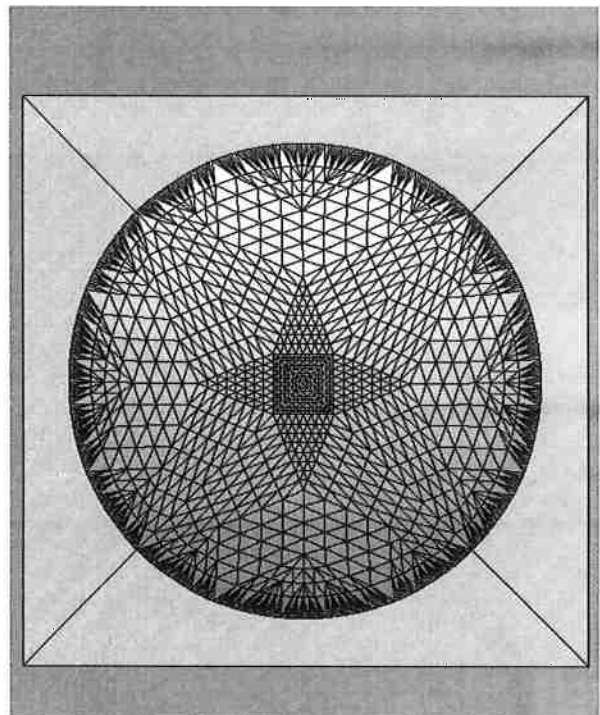
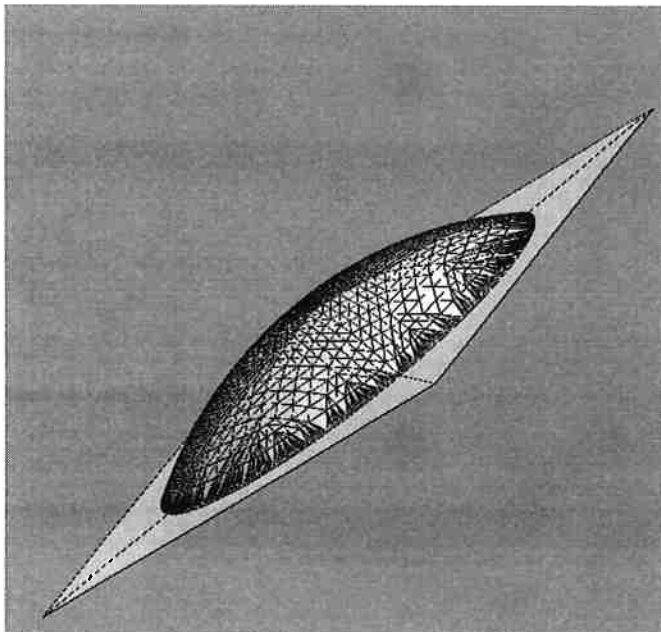
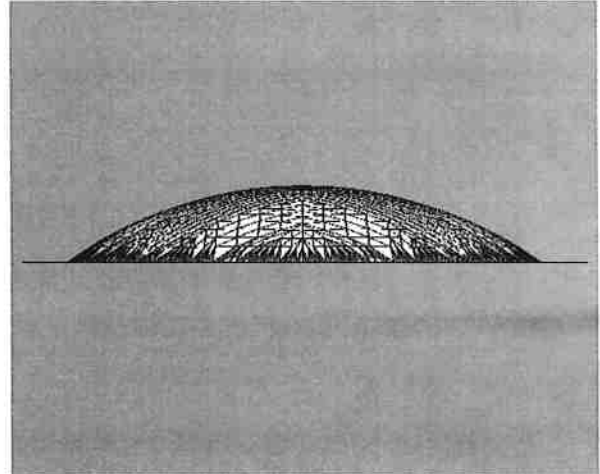


Saída para a gota de estanho a 280°C com densidade 6,971 g/cm³, ângulo teórico = 34,9° e diâmetro teórico = 7,58mm

```

Edges refined: 64
Enter command: g 10
10 area: 14.0679664740861 energy: 1.39284347008136 scale: 0.227123
9 area: 14.0676946375927 energy: 1.39131007442289 scale: 0.178608
8 area: 14.0667478647118 energy: 1.39056454376429 scale: 0.230398
7 area: 14.0698012526538 energy: 1.39067444437566 scale: 0.183074
6 area: 14.0714454804413 energy: 1.38968305088047 scale: 0.234459
5 area: 14.0727477396908 energy: 1.38933930600732 scale: 0.183373
4 area: 14.0745435659376 energy: 1.38902273115494 scale: 0.232997
3 area: 14.0759316678518 energy: 1.38872363466759 scale: 0.182979
2 area: 14.0777958137648 energy: 1.38843799854710 scale: 0.231736
1 area: 14.0792337433478 energy: 1.38816295566848 scale: 0.182249
Enter command: r
Vertices: 1158 Edges: 3208 Facets: 2052 Bodies: 1 Facetedges: 6156
Element memory: 946168
Total data memory: 1340498 bytes.
Enter command: re
Edges refined: 256
Enter command: hessian
1 area: 14.4109434325251 energy: 1.37241002152277
Enter command: v
body target volume actual volume pressure
1 1 1.00800572532345 0.912367068888902
Enter command: s

```



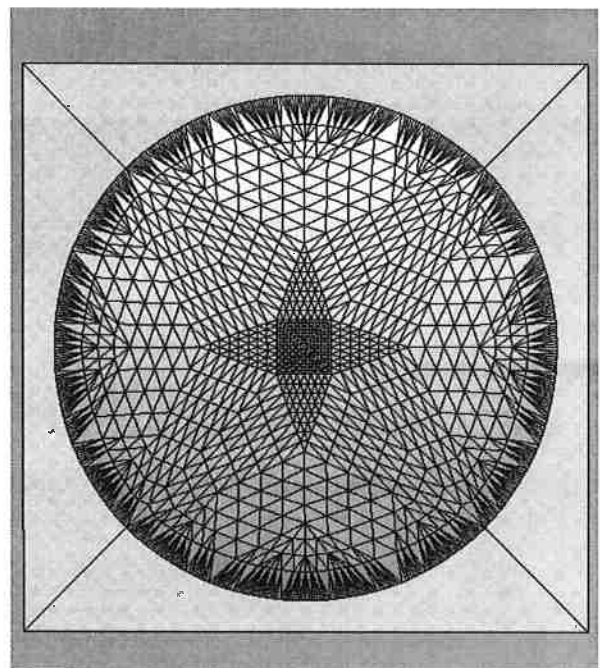
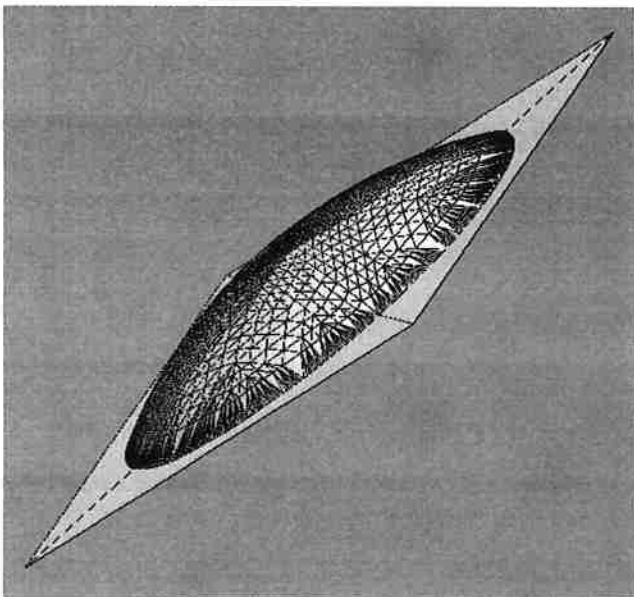
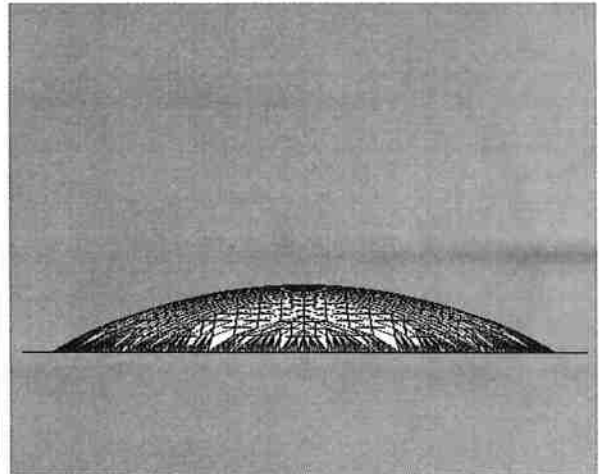
Saída para a gota de estanho a 350°C com densidade 6,928g/cm³, ângulo teórico = 29,1° e diâmetro teórico = 8,04mm

```

10. area: 14.3763967212909 energy: 1.12304770676064 scale: 0.224926
8. area: 14.3770477797389 energy: 1.12153358829056 scale: 0.164623
6. area: 14.3793538647238 energy: 1.12071421380503 scale: 0.226631
7. area: 14.3811790943839 energy: 1.12012031997730 scale: 0.167821
6. area: 14.3840133560928 energy: 1.11961772836815 scale: 0.228629
5. area: 14.386055880925 energy: 1.11916178177673 scale: 0.167766
4. area: 14.3890233619426 energy: 1.11873425452366 scale: 0.227337
3. area: 14.3911425558856 energy: 1.11832553113989 scale: 0.167360
2. area: 14.3941685113165 energy: 1.11793166200763 scale: 0.226438
1. area: 14.3963310884158 energy: 1.11754953218742 scale: 0.167261
Enter command: r
Vertices: 1158 Edges: 3208 Facets: 2052 Bodies: 1 Facetedged: 6156
Element memory: 946168
Total data memory: 1340498 bytes
Enter command: re
Edges refined: 256
Enter command: hessian
WARNING 1825: Hessian not positive definite. Index: 2

1 area: 14.9904204571105 energy: 1.09140706936356
Enter command: v
Body target volume actual volume pressure
1 1 1.00002010216958 0.723226827264716
Enter command: a

```

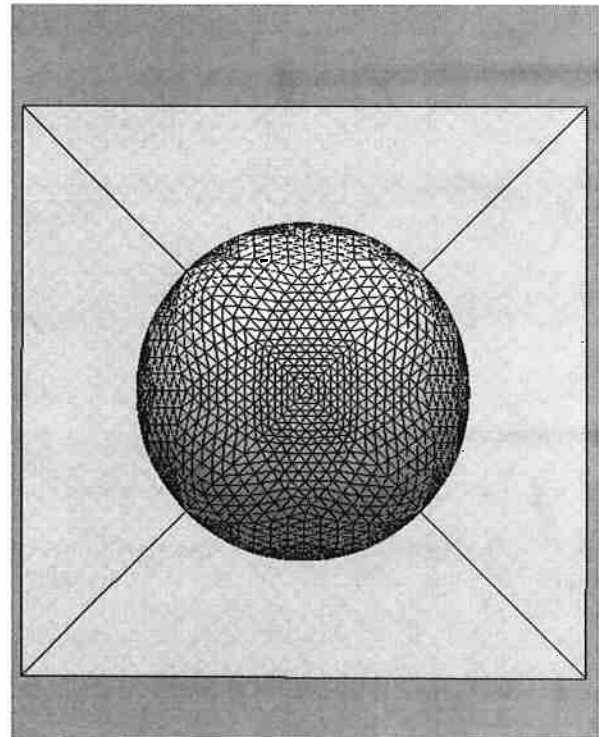
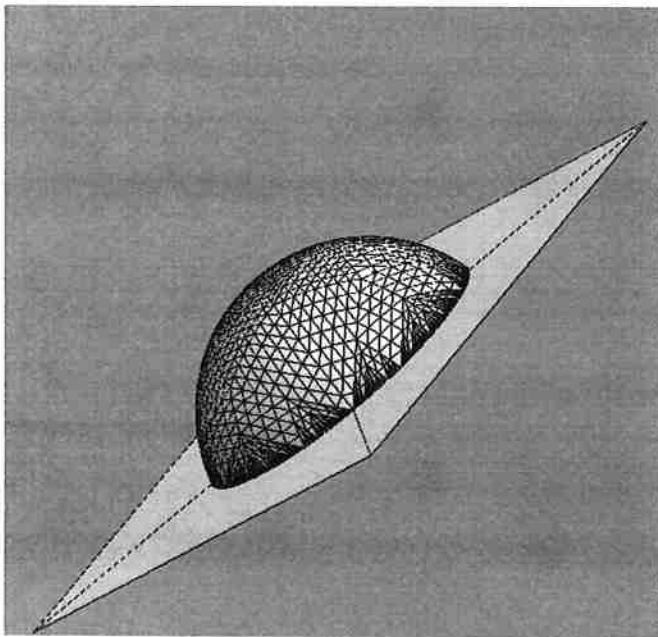
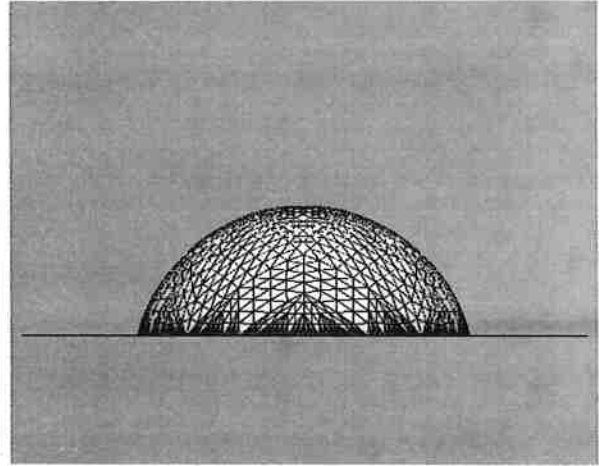


Saída para a gota de bismuto a 280°C com densidade 10,056g/cm³, ângulo teórico = 75,2° e diâmetro teórico = 4,35mm

```

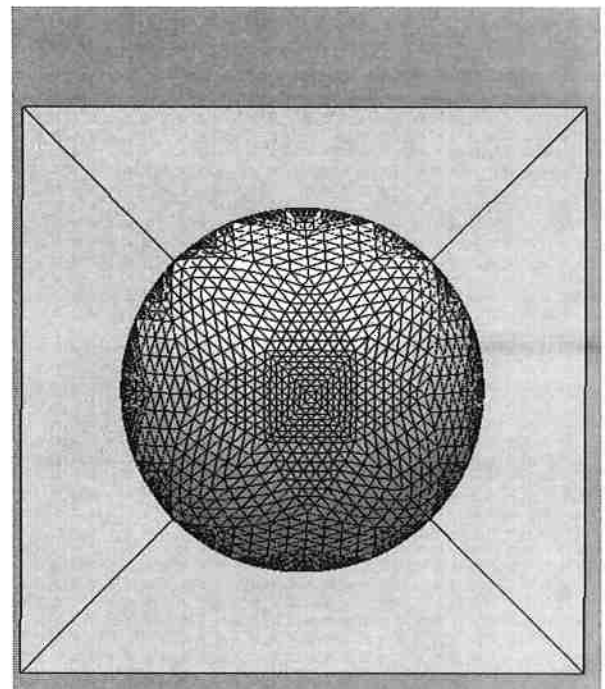
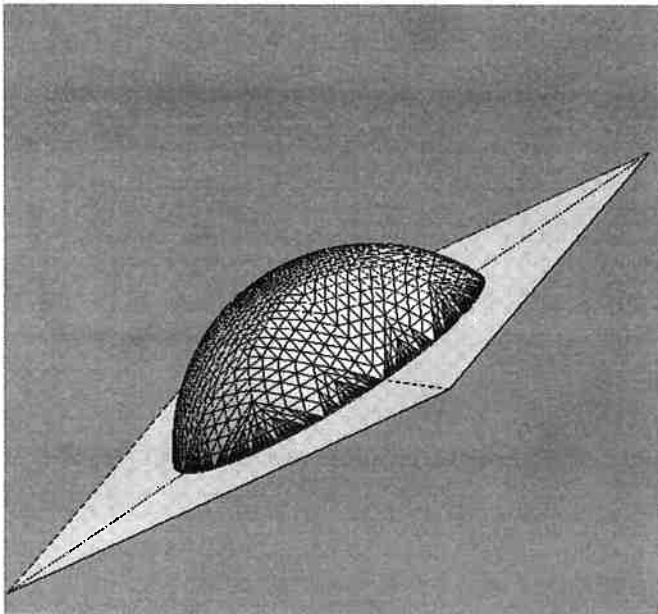
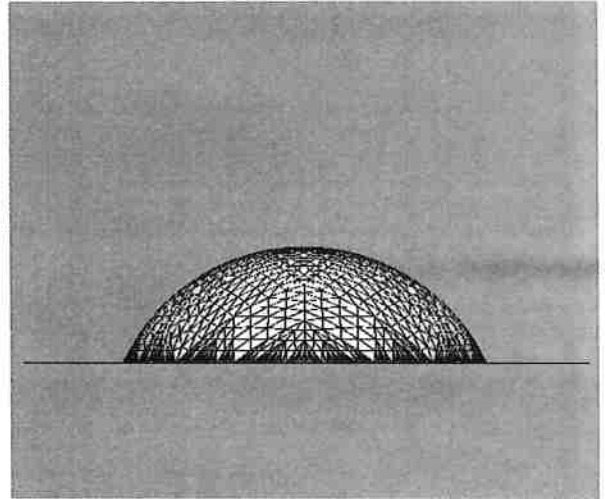
edges refined: 101
inter command: g 10
10 area: 12.9153710554183 energy 3.29273733749213 scale: 0.233634
9 area: 12.9132539509443 energy 3.29094510379426 scale: 0.217261
8 area: 12.9125701025275 energy 3.29048591751594 scale: 0.221487
7 area: 12.9121945390426 energy 3.29027026194462 scale: 0.195458
6 area: 12.9119197416345 energy 3.29012552604905 scale: 0.210312
5 area: 12.9117026373093 energy 3.29000943872310 scale: 0.189779
4 area: 12.9115151326973 energy 3.28991093142595 scale: 0.209332
3 area: 12.9113611266476 energy 3.28982345225916 scale: 0.188000
2 area: 12.9112219423450 energy 3.28974478665898 scale: 0.210520
1 area: 12.9111076329173 energy 3.28967251094650 scale: 0.187424
inter command: r
vertices: 1158 Edges: 3208 Facets: 2052 Bodies: 1 Facetedges: 6156
element memory: 946168
total data memory: 1340498 bytes.
inter command: re
edges refined: 256
inter command: hessian
1 area: 12.9110216240296 energy 3.28376533386448
inter command: v
body target volume actual volume pressure
1 1 1.00000002185759 2.1886967154265
inter command: c
rabbits command:

```



Saída para a gota de bismuto a 350°C com densidade 9.963g/cm³, ângulo teórico = 64,5°
e diâmetro teórico = 4,75mm

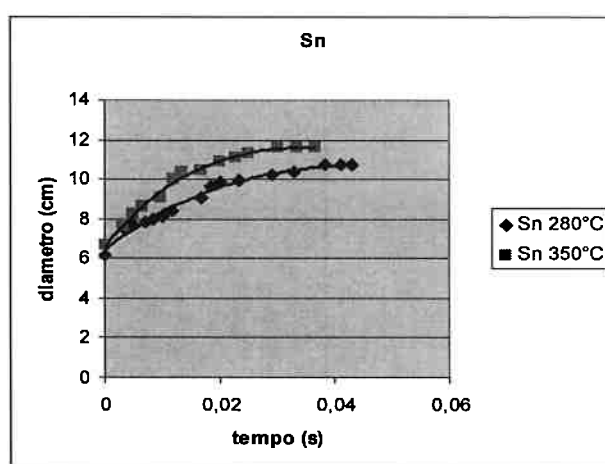
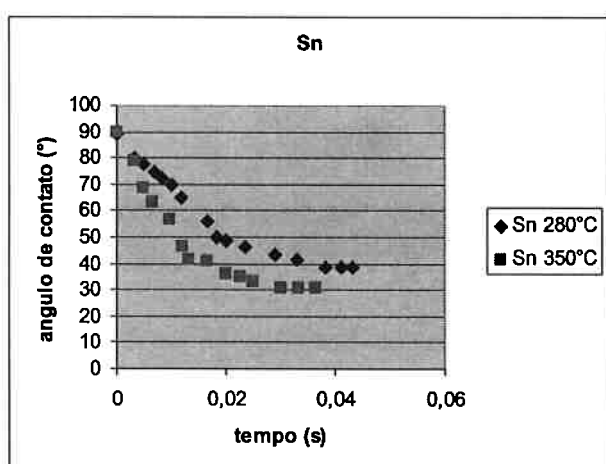
```
Edges refined: 64
Enter command: g 10
10. area: 13.0593506424157 energy: 2.82473976411003 scale: 0.233613
9. area: 13.0570790952025 energy: 2.82289363883631 scale: 0.222549
8. area: 13.0562279851347 energy: 2.82234775843457 scale: 0.255548
7. area: 13.0557719761756 energy: 2.82208535423431 scale: 0.249866
6. area: 13.0554656145724 energy: 2.82190348841836 scale: 0.269097
5. area: 13.0552423603459 energy: 2.82175712635534 scale: 0.244011
4. area: 13.0550875106446 energy: 2.82163453019725 scale: 0.256586
3. area: 13.0549696586759 energy: 2.82152650021476 scale: 0.233418
2. area: 13.0548964666809 energy: 2.82143047728071 scale: 0.244929
1. area: 13.0548465746920 energy: 2.82134314805780 scale: 0.224551
Enter command: r
Vertices: 1158 Edges: 3208 Facets: 2052 Bodies: 1 Facetedges: 6156
Element memory: 946168
Total data memory: 1341802 bytes.
Enter command: re
Edges refined: 256
Enter command: heccian
1. area: 13.0688296101631 energy: 2.81569909173709
Enter command: v
Body target volume actual volume pressure
1 1.00000005709677 1.67662662551053
Enter command: s
```



A tabela abaixo mostra os resultados obtidos para o estanho (Sn). Os ângulos de contato foram obtidos pelo ensaio da gota séssil (4) e os diâmetros das gotas foram obtidos pela medição das figuras de saída geradas pelo programa Surface Evolver.

Tabela 2: mostra os ângulos de contato e o diâmetro da gota em diferentes tempos para o Sn .

Sn 280�C			Sn 350�C		
tempo	ângulo	diâmetro	tempo	ângulo	diâmetro
0	89	6,2	0	90	6,65
0,0033	80,00	7,55	0,0033	78,7	7,6
0,005	77,50	7,70	0,005	68,4	8,25
0,007	75,00	7,80	0,0066	63,2	8,6
0,0084	72,50	7,95	0,0099	56,5	9,1
0,01	70,00	8,15	0,012	46,2	9,99
0,0117	65,00	8,45	0,0133	41,6	10,35
0,0167	56,00	9,05	0,0166	40,8	10,45
0,0184	50,00	9,65	0,02	36,2	10,9
0,02	48,50	9,85	0,0228	35	11,1
0,0234	46,50	9,95	0,025	33,2	11,3
0,029	43,20	10,20	0,03	31	11,6
0,033	41,70	10,35	0,0333	31	11,6
0,0383	38,40	10,70	0,0366	31	11,6
0,041	38,40	10,70			
0,043	38,40	10,70			



Gráfico 1:  ngulo de contato em função do tempo (Sn). **Gráfico 2:** diâmetro em função do tempo (Sn).

Para o bismuto temos:

Tabela 3: mostra os ângulos de contato e o diâmetro da gota em diferentes tempos para o Bi.

Bi 280°C			Bi 350°C		
tempo	ângulo	diâmetro	tempo	ângulo	diâmetro
0	90	6,7	0	90	6,85
0,0033	87,6	7,05	0,0033	86	7,15
0,0066	86	7,15	0,005	84	7,3
0,0099	83,4	7,35	0,0066	82,8	7,55
0,0132	82,6	7,4	0,0087	80,2	7,6
0,0166	80,5	7,5	0,0166	78,5	7,85
0,02	75	7,85	0,023	75,6	8,05
0,0233	73,4	7,9	0,026	73,4	8,15
0,0266	73	8	0,028	71,2	8,3
0,0299	72,8	8,05	0,031	70	8,45
0,033	72	8,1	0,035	69,3	8,65
0,035	71	8,2	0,039	69	8,8
0,042	70,5	8,25	0,042	68,9	8,95
0,052	70	8,35	0,048	68	9,05
0,06	69,3	8,35	0,055	67,3	9,1
0,066	69,2	8,35	0,06	66,9	9,1

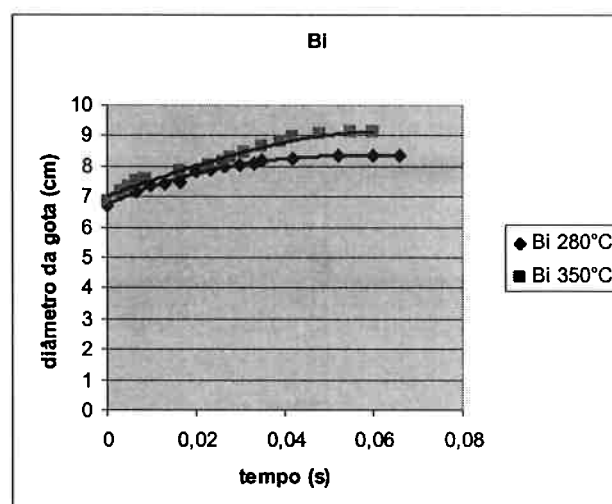
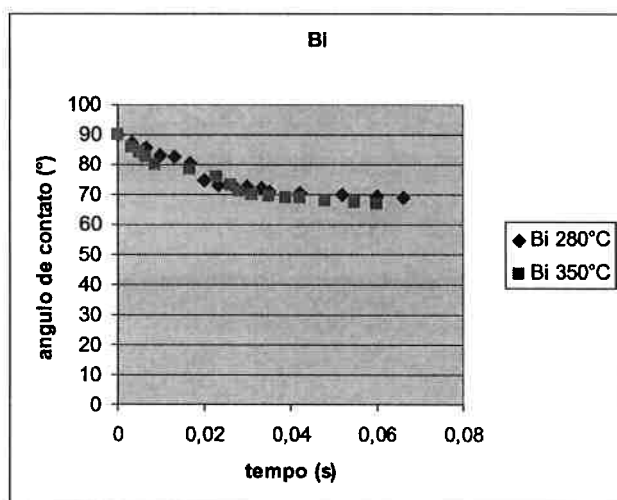


Gráfico 3: ângulo de contato em função do tempo (Bi). Gráfico 4: diâmetro em função do tempo (Bi).

Com os dados obtidos nas tabelas 1 e 2 podemos calcular as velocidades de espalhamento da gota no substrato. As tabelas 3 e 4 mostram essas velocidades para estanho (Sn).

Tabela 4: tabelas para velocidades de espalhamento do Sn em 280°C e 350°C respectivamente.

tempo	veloc. Espalhamento Sn 280°C	tempo	veloc Espalhamento Sn 350°C
0	227,27	0	287,88
0,0033	88,23	0,0033	382,35
0,005	50	0,005	218,75
0,007	107,14	0,0066	242,42
0,0084	125	0,0099	280,95
0,01	176,47	0,012	276,92
0,0117	200	0,0133	30,30
0,0167	117	0,0166	132,35
0,0184	125	0,02	71,43
0,02	29,41	0,0228	90,91
0,0234	44,64	0,025	60,00
0,029	37,5	0,03	0,00
0,033	66,03	0,0333	0,00
0,0383	0	0,0366	
0,041	0		
0,043			

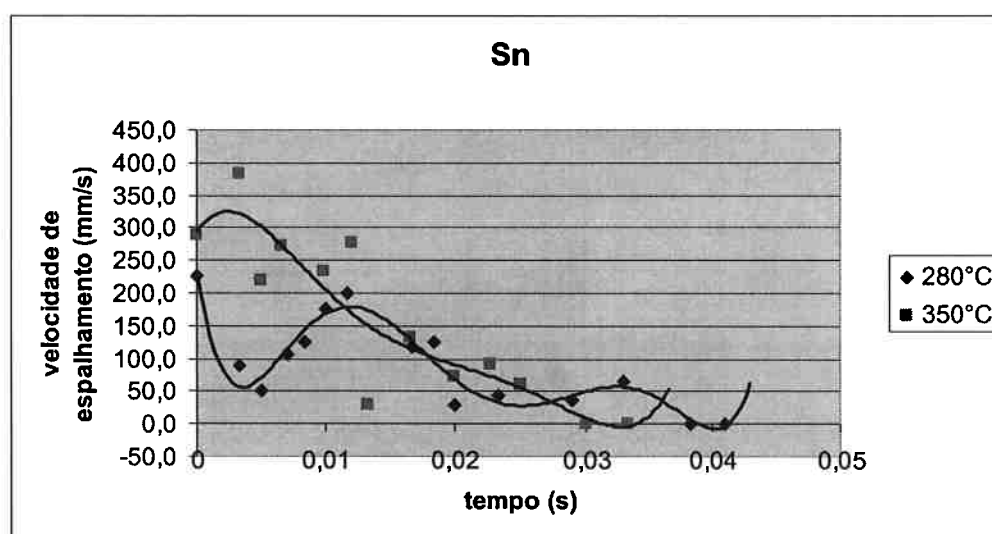


Gráfico 5: velocidades de espalhamento em função do tempo para o Sn.

Abaixo estão as velocidades de espalhamento em cada tempo para o bismuto (Bi), assim como os gráficos desses dados, analogamente aos feitos para o estanho.

Tabela 5: tabelas para velocidades de espalhamento do Bi em 280°C e 350°C respectivamente.

tempo	veloc espalhamento Bi 280°C	tempo	veloc espalhamento Bi 350°C
0	106,1	0	90,9
0,0033	30,3	0,0033	88,2
0,0066	60,6	0,005	156,3
0,0099	15,2	0,0066	23,8
0,0132	29,4	0,0087	31,6
0,0166	102,9	0,0166	31,3
0,02	15,2	0,023	33,3
0,0233	30,3	0,026	75,0
0,0266	15,2	0,028	50,0
0,0299	16,1	0,031	50,0
0,033	50,0	0,035	37,5
0,035	7,1	0,039	50,0
0,042	10,0	0,042	16,7
0,052	0,0	0,048	7,1
0,06	0,0	0,055	0,0
0,066		0,06	151,7

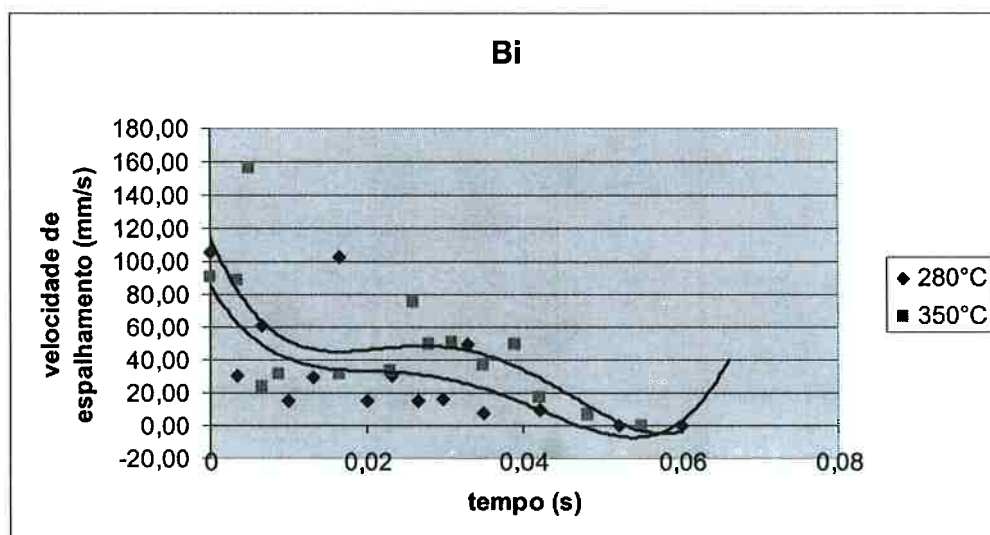


Gráfico 6: velocidades de espalhamento em função do tempo para o Bi.

Com esses resultados vemos que há uma escala entre a velocidade de espalhamento e a variação do ângulo corrigido do ângulo com o tempo. Assim é necessário saber o diâmetro real da gota (obtido pelo ensaio da gota séssil), para obter K, e assim sabermos a escala (E), para convertermos o diâmetro obtido pelo programa computacional Surface Evolver e o diâmetro real (gota séssil). Como mostra a tabela 6 abaixo:

Tabela 6: obtenção escala E.

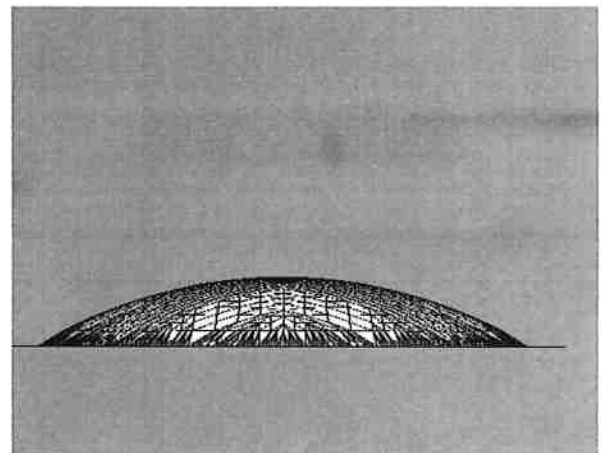
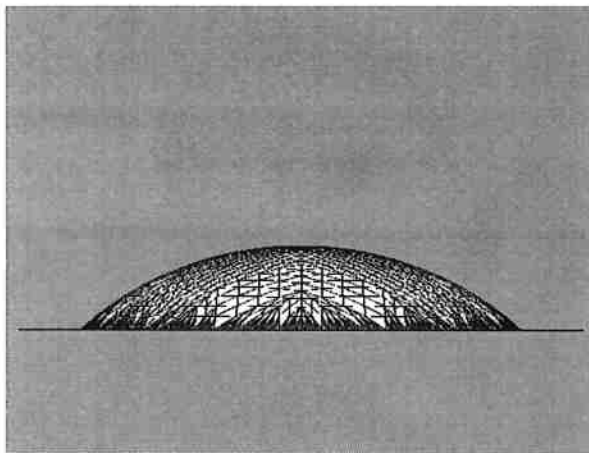
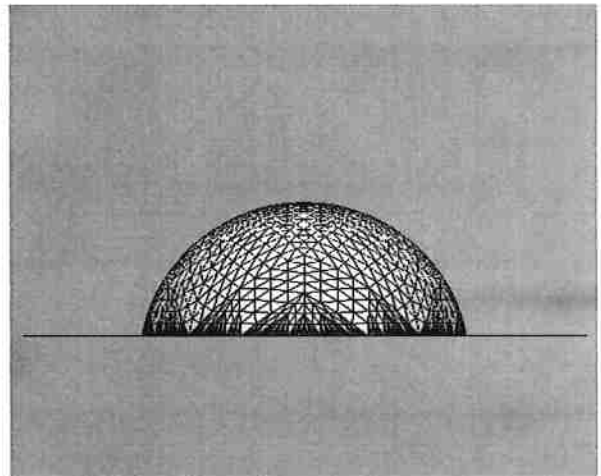
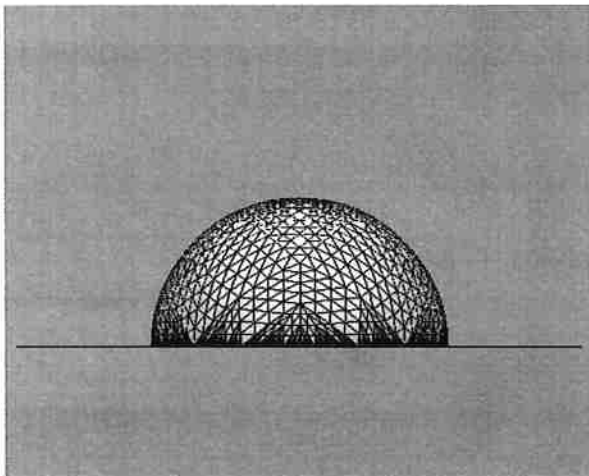
$\Delta d / \Delta t$	$(\Delta d / K) / \Delta t$	E
409,1	175,87	2,3261
88,2	37,93	2,3261
50,0	21,50	2,3261
107,1	46,06	2,3261
125,0	53,74	2,3261
176,5	75,87	2,3261
120,0	51,59	2,3261
352,9	151,73	2,3261
125,0	53,74	2,3261
29,4	12,64	2,3261
44,6	19,19	2,3261
37,5	16,12	2,3261
66,0	28,39	2,3261
0,0	0,00	
0,0	0,00	

Onde $K = (\text{diâmetro medido pelo Surface} / \text{diâmetro medido pelo ensaio gota séssil})$ e E é a divisão da velocidade de espalhamento pela velocidade de espalhamento com o diâmetro corrigido.

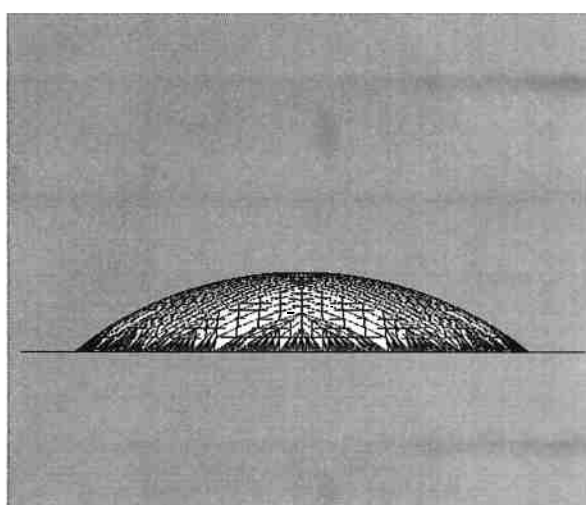
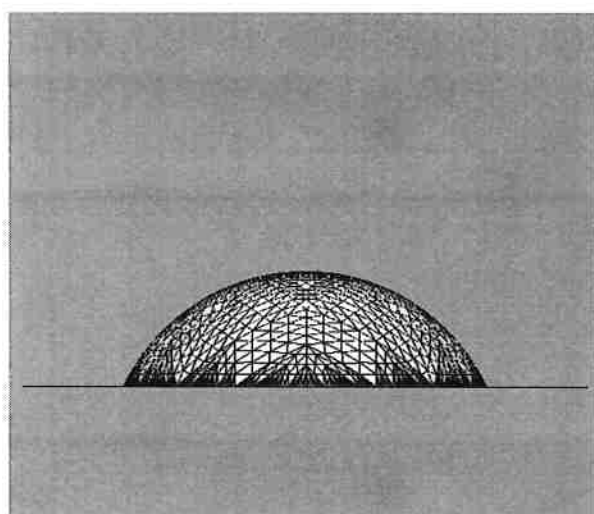
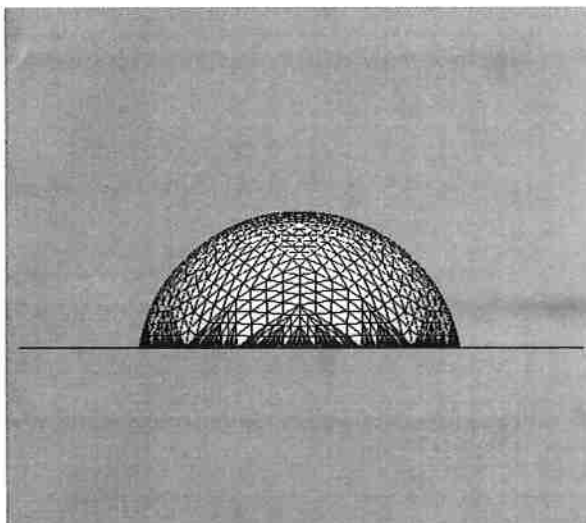
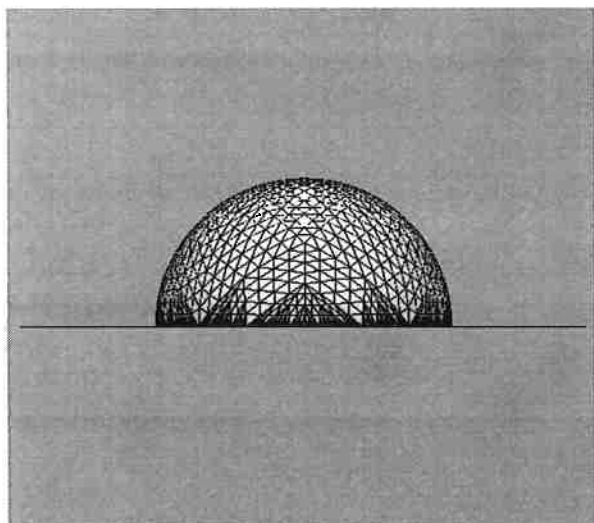
Dessa forma percebemos que, quando se sabe o diâmetro da gota séssil, pode achar K e assim calcular E para achar o diâmetro da gota em diferentes tempos (prever sua velocidade de espalhamento).

A seguir temos algumas evoluções geradas pelo Surface Evolver, simulando o espalhamento da gota de Sn e Bi, os diferentes diâmetros são resultados dos diferentes ângulos de contato obtido por Xang [4] em função do tempo, sendo essas figuras resultados parciais demonstrados nas tabelas 2 e 3:

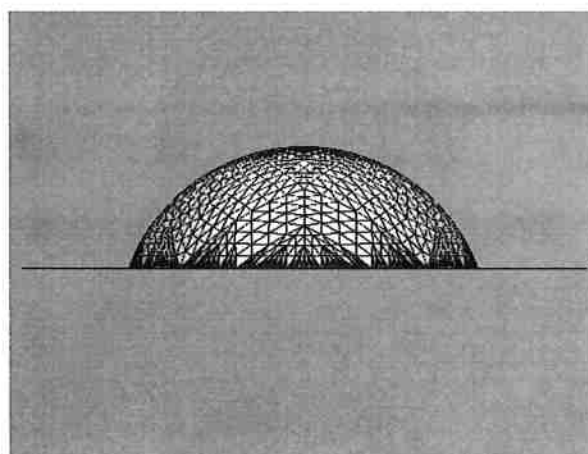
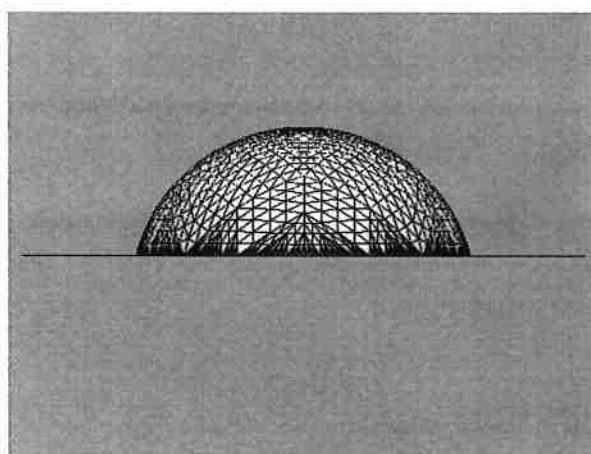
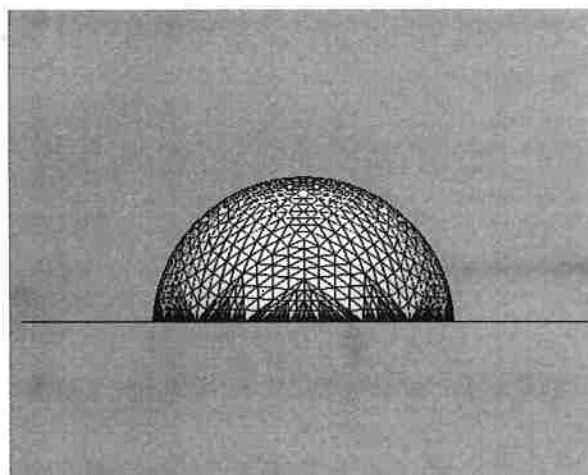
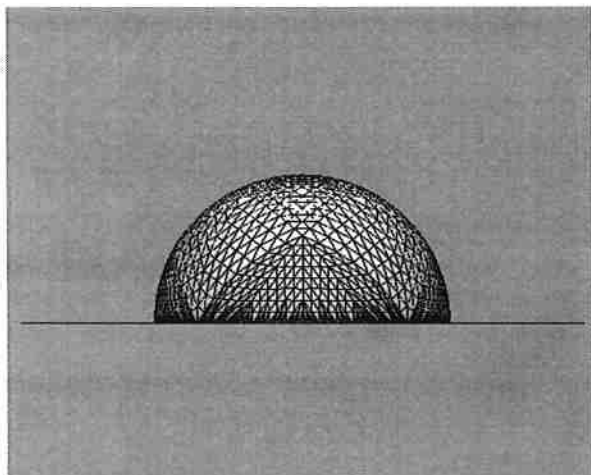
Sn a 350°C com densidade 6.928 g/cm³. Evolução com 90°- 78.7°- 41.6°- 31° respectivamente no sentido horário.



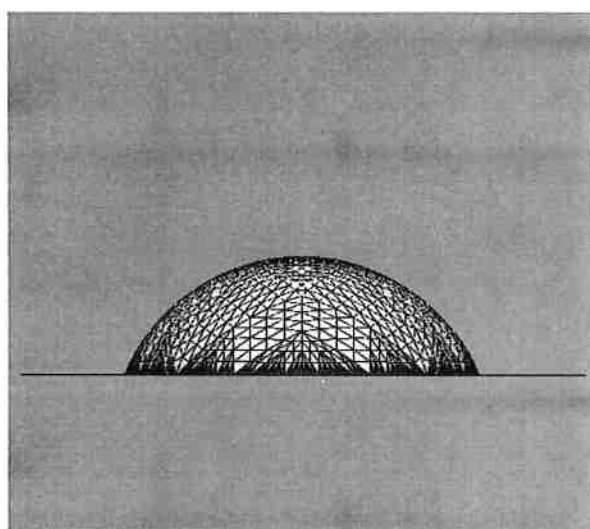
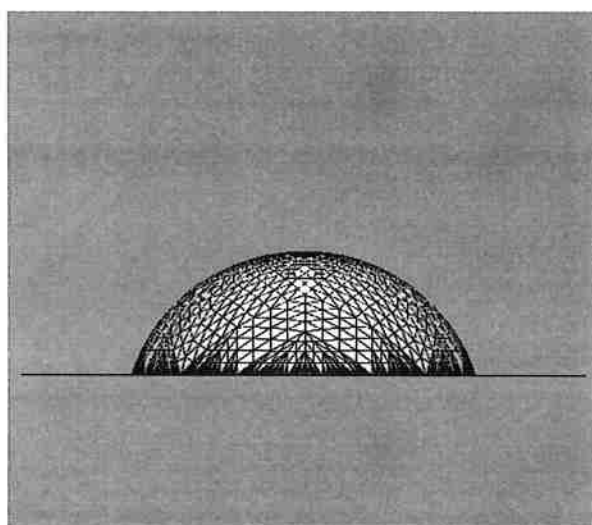
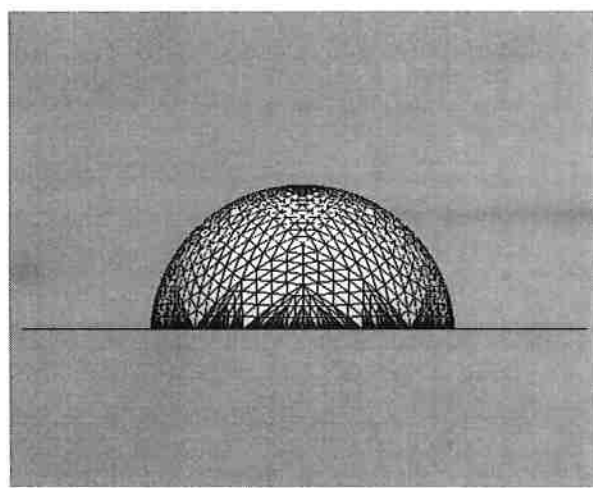
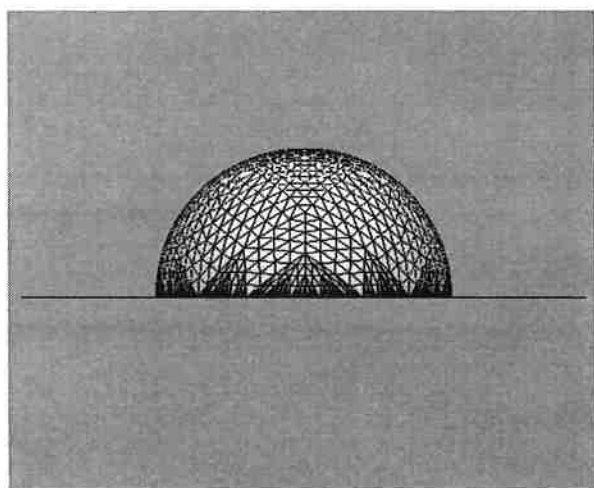
Sn a 280°C com densidade 6.9271g/cm³. Evolução com 90°- 80°- 65°- 38.4°
respectivamente no sentido horário.



Bi a 280°C com densidade de 10,056 g/cm³. Evolução com 89,5° - 87,6° - 75 - 69,3°
respectivamente no sentido horário.



Bi a 350°C com densidade 9.963 g/cm³. Evolução com 90°- 86°- 71.2° - 66.9°
respectivamente no sentido horário.



6) Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo obter e verificar a fidelidade entre os dados obtidos experimentalmente do diâmetro da gota, através de um sistema computacional Surface Evolver e os dados obtidos através do método convencional (ensaio da gota sésil). Os resultados teóricos obtidos do diâmetro da gota tiveram um comportamento semelhante aos resultados experimentais. No entanto, verificou-se uma deficiência desse modo computacional por necessitar de um dado real (determinação de K) para poder obter resultados coerentes com os reais. Após a obtenção da escala (E) o programa mostra-se capaz de calcular dados coerentes com os experimentais. Entretanto, independente da escala, os resultados possuem proporcionalidade com os obtidos pelo ensaio da gota sésil. O datafile do programa não foi modificado, o que talvez pudesse resolver o problema de determinação da escala. Com os valores dos diâmetros foi possível calcular as velocidades de espalhamento, que ficaram com comportamentos e valores próximos dos experimentais.

7) Referências bibliográficas

1. Manual of MUST system II (Solderability test system for surface mount and conventional components)
2. Boniface, E.R., "Welding Engineering", McGraw-Hill Book Company, Inc, p.264-318, 1954, New York, Toronto, London.
3. Wassik, R.J K, " Soldering in eletronics" Electrchemical Publications Limited.1989
4. Shang Xiaogang, "Determinação da dinâmica de espalhamento e ângulo de contato de ligas para soldagem branda utilizadas na indústria eletrônica. Tese Doutorado. PMT-EPUSP, São Paulo, 2005.
5. BRANDI, S. D. "Molhamento e espalhamento de ligas Ag-Cu-In-Ti, Ag-Cu-Ti e Ag-Cu-Nb sobre nitreto de silício". Tese (Livre Docência), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995
6. YOUNG, T. "An essay on cohesion of fluids". Phil. Trans. Roy Soc. v. 95, London, 1805.
7. Manoel Carreira Neto, "Energias de superfície de ligas utilizadas por indústrias eletrônicas na soldagem branda", Tese de doutoramento, PMT-EPUSP, São Paulo, 2001.
8. Christiane Lauricella Mazur "Análise matemática e modelamento do perfil da gota obtida pelo ensaio da gota sésil", Tese de doutoramento, PMT-EPUSP, São Paulo, 2005.
9. Brakke, K. www.susqu.edu/brakke/evolver consultado em 15/08/2005.