

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE RECUPERAÇÃO
DA CERA, BEM COMO DAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS
CERAS NOVAS E RECUPERADAS PARA MICROFUSÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO

Autor: OLY FRANCISCO HENN JÚNIOR

Porto Alegre, Janeiro de 1997

HOMENAGEM PÓSTUMA

Ao Vô ALCINDO e à minha irmã ADRIANA.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Marlos Dhiel pela orientação transmitida para a realização deste trabalho.

Ao Doutorando Ivo Vedana e ao Graduando em Química Giovani, pela colaboração durante o desenvolvimento dos experimentos práticos.

À empresa Amadeo Rossi, representada pelo Sr. Alexandre P. Trindade e o Eng. Marco Antônio Machado pela doação de matéria-prima para a realização dos testes.

Aos meus pais Oly Francisco e Iris Henn, ao meu irmão Adriano Henn, à minha esposa Naira A. Henn, às minhas filhas Ana Biatriz e Camila Adriane Henn e à minha sogra Nelcy Schuch pelo apoio oferecido nas etapas finais deste trabalho.

1 - Introdução	1
2 - Objetivo	2
3 - Revisão Bibliográfica	3
3.1 - Histórico do Processo de Microfusão;	3
3.2 - Descrição do Processo;	6
3.3 - Características Importantes em Ceras para Microfusão e alguns resultados bibliográficos.	10
4 - Procedimento Operacional e Resultados:	13
4.1 - Metodologias e Testes Realizados.	13
4.1.1 - Metodologia de Recuperação da Cera	13
4.1.2 - Expansão/Contração Volumétrica	14
4.1.3 - Contração Linear	15
4.1.4 - Teor de Cinzas	16
4.2 - Resultados	17
4.2.1 - Expansão Volumétrica	17
4.2.2 - Contração Linear	18
4.2.3 - Resultados Comparativos dos Demais Testes	21
5 - Análise de Dados.	21
6 - Conclusões.	23
7 - Bibliografia.	24

RESUMO

O processo de microfusão dito como "Cera Perdida", é um processo em franco desenvolvimento e por isto está investindo-se pesado em técnicas de redução de custos para torná-lo mais competitivo. Uma destas técnicas envolve controle e recuperação da cera após "deceragem".

Neste trabalho foram analisados dois tipos de ceras: uma nova e a outra recuperada. Para isto realizaram-se vários testes, tais como: análise do teor de cinzas, ponto de amolecimento e estabilidade dimensional a fim de caracterizar as duas ceras e comprovar a técnica de recuperação da cera para produtos microfundidos.

1 - INTRODUÇÃO

A cera para microfundido é uma matéria-prima muito importante no processo de microfundição, pois, a partir dos modelos moldados nela serão produzidas as peças em aço. Neste sentido, a reciclagem deste material se faz necessária para que tenha redução de custos do produto final.

Com o objetivo de se obter a cera reciclada com propriedades semelhantes à cera inicial, desenvolveu-se e testou-se uma composição para a cera reciclada, a partir da cera original.

Para avaliação do produto recuperado, realizaram-se testes, baseados em normas técnicas, analisando os resultados comparativos entre a cera virgem e a reciclada, observando os padrões bibliográficos das qualidades da cera.

2 - OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo testar metodologias de avaliação das ceras e comparar propriedades da cera virgem com a cera recuperada, avaliando o procedimento de recuperação da cera.

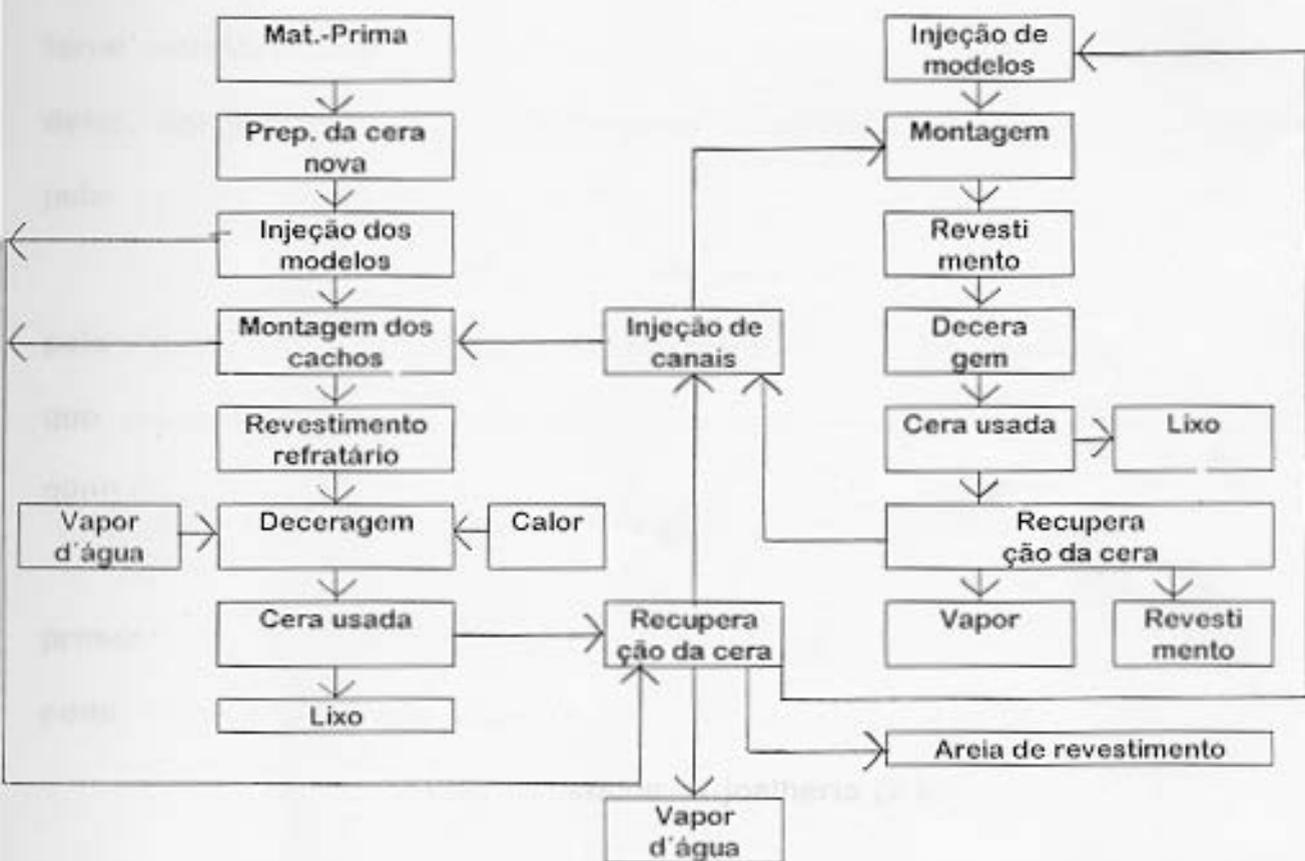


Fig. 2.1 - Fluxograma representativo do ciclo das ceras nova e recuperada.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Histórico: Origem e Evolução do Processo.

O processo de fundição de precisão ou microfusão também conhecido como "processo de cera perdida", consiste na fabricação de modelo em cera ou plástico, o qual é revestido por material refratário apropriado. Posteriormente, com a remoção dos modelos, por aquecimento, procede-se o vazamento com o metal desejado.

As peças obtidas por este processo caracterizam-se pela riqueza de detalhes, precisão dimensional e fino acabamento, o que permite muitas vezes, a eliminação quase completa de subsequentes operações de usinagem.

O processo de cera perdida teve sua origem nos primórdios do desenvolvimento da arte de fundição e sua evolução pode ser caracterizada segundo três fases:

- Trabalhos artísticos e joalheria (2.600 A.C. até o século XV)
- Odontologia (Fim do século XIX até a década de 30)
- Aplicações industriais (Década de 40 até os nossos dias).

Existe bastante evidência de que o processo de fundição por cera perdida apareceu antes da era de Cristo. Objetos

trados em escavações de civilizações egípcias e chinesas, ricos em talhes, conduzem ao fato dos mesmos serem escavados em cera e esta ser usada como modelo. O recobrimento do modelo de cera seria executado com uma mistura argilosa e deixada secar ao sol. Depois desta fase colocariam o conjunto todo em fornos, a fim de permitir a saída da cera, ficando uma cavidade oca que seria preenchida com ligas fundidas na época. A estátua de Pepi II, famoso egípcio da quinta dinastia, que data do ano 2.600 A.C. foi fundida por este processo e pode ser vista no museu do Cairo.

perda -Artesãos chineses da dinastia Shang (1766-1122 AC) criaram objetos de arte em bronze com delicadas filigranas, tão sofisticados como os obtidos por qualquer microfusão da atualidade.

prop A idéia do modelo em cera foi esquecida e redescoberta pelos escultores renascentistas, na criação de estátuas de bronze, como "Perseu e a Cabeça de Medusa", criada pelo escultor italiano Benevenuto Cellini em 1540 D.C. a quem também se atribui a reaplicação do processo na era atual.

No século passado (1897), o dentista americano B.F. Philbrook valeu-se da microfusão para desenvolver a prótese dentária em ouro, cujos princípios vieram constituir os fundamentos para a ampliação do processo na indústria.

Mas o grande desenvolvimento da fundição de precisão em escala industrial ocorreu durante a II Guerra Mundial, quando a repentina e urgente demanda militar sobrecarregou a indústria de máquinas e ferra-

mentas. O processo foi resposta para um problema de produção de peças para armamento e aeronaves, destacando-se palhetas para as turbinas dos, então recém-desenvolvidos, motores a jato. Muitas dessas peças apresentavam problemas de formato complexo associado à necessidade de precisão dimensional e de um bom acabamento superficial em materiais de baixa usinabilidade.

A produção seriada desse tipo de produto foi possível na época, como ainda o é hoje, utilizando-se a técnica milenar da cera perdida com uma diferença básica: os modelos não mais eram manufaturados artesanalmente na cera um a um, mas sim injetados em matrizes por intermédio de máquinas injetoras de cera. A partir daí o processo passou a ter aplicação crescente em inúmeros setores industriais. Desenvolveram-se as técnicas de “molde sólido” e “casca cerâmica”, intensificou-se o uso do vácuo e observa-se, a cada dia, um aumento do tamanho máximo das peças que podem ser produzidas.

DESENVOLVIMENTO NO PAÍS

No Brasil, o desenvolvimento da indústria de fundição de precisão é bastante recente, tendo sido iniciados na década de 60 os esforços concretos para sua implantação no País.

A existência de mercado e as dificuldades na obtenção de peças via importação foram fatores que motivaram essa implantação visando atender a fabricação de máquinas de costura e armamento.

A produção de peças acabadas foi crescente, evoluindo de 81 toneladas em 1968, para 1.138t em 1985, com crescimento médio anual de 14,7% nesse período.

3.2 - Descrição do Processo.

A fundição de precisão caracteriza-se pela produção de modelos em cera, obtidos por injeção em matrizes, para produção de peças.

As principais fases do processo podem ser agrupadas como segue: —

- Preparação dos modelos;
- Revestimento;
- Deceragem e Calcinação;
- Fusão e Vazamento;
- Remoção do Molde e Acabamento.

PREPARAÇÃO DOS MODELOS:

O início dos trabalhos para a fabricação de um produto por fundição de precisão, constitui o próprio projeto da peça e, a partir daí, o projeto da matriz a ser usada nos modelos de cera. No desenho da matriz são introduzidas correções dimensionais que visam compensar as contrações e expansões da cera, do molde cerâmico e do próprio metal.

Para elaboração da cera são utilizados vários materiais, tais como: breu, carnaúba, parafina e resinas plásticas.

As matrizes são fixadas às máquinas injetoras e os modelos injetados sob pressão. Após, estes são montados em torno de hastes de cera formando cachos ou "árvores".

REVESTIMENTO CERÂMICO:

Esta etapa consiste em mergulhar a árvore ou o cacho em um banho cerâmico; retirar do banho; deixar escorrer o excesso e a seguir aplicar sobre esta capa úmida, uma camada de material refratário seco e granulado.

A seguir, o cacho fica repousando para secar em um ambiente com umidade e temperatura controladas, garantindo a reprodutibilidade dimensional das peças.

Esta operação é repetida várias vezes usando, progressivamente, material refratário mais grosseiro, até a obtenção de uma casca com a resistência mecânica desejada. A lama cerâmica é feita à base de um ligante inorgânico (sílica coloidal ou silicato de sódio ou de etila) e de material refratário em pó (zirconita ou mulita). UFRGS -

O revestimento é realizado em um tanque com leite fluidizado, contendo zirconita, mulita ou chapote).

DECERAGEM E CALCINAÇÃO:

Depois de concluída a etapa de revestimento, e com a casca cerâmica completamente seca, os cachos são submetidos a uma operação denominada deceragem, com o objetivo de remover a cera do interior do molde cerâmico. Tal operação é, geralmente, realizada em autoclaves.

O molde já livre da cera é então conduzido a um forno para calcinação em alta temperatura ($\approx 1100^{\circ}\text{C}$), onde seca completamente e adquire resistência para suportar o vazamento do aço líquido e, perde qualquer traço de cera que tenha restado da deceragem.

FUSÃO E VAZAMENTO:

A fusão e obtenção do metal com composição desejada pode ser realizada em forno elétrico, a arco ou em forno de indução e segue o processo metalúrgico normal.

Saindo do forno de calcinação, o molde, ainda quente, recebe o metal líquido.

O vazamento pode ser feito utilizando as seguintes técnicas:

a) Ao ar (convencional): o metal é vazado diretamente no molde, ao ar;

b) No vácuo: para metais e ligas reativas, o metal é fundido e vazado no molde, sob vácuo;

c) Por aspiração: o molde é colocado sobre o banho, dentro de uma câmara, onde é feito o vácuo, obrigando o metal líquido preenchê-lo.

de CARTA FUNDIDA

REMOÇÃO DO MOLDE E ACABAMENTO:

Após a completa solidificação do metal, o molde é quebrado por meio de equipamento vibratório seguido de limpeza com jato de areia ou limpeza química, para a eliminação dos restos do molde.

As peças individuais são removidas do canal central por meio de disco abrasivo ou corte em serra. A região do canal é lixada para eliminar marcas e rebarbas na peça.

O produto microfundido pode ou não receber tratamento térmico para refinar grão e homogeneizar a micro-estrutura, aliviando as tensões de solidificação das peças, melhorando as características de usinagem e as propriedades mecânicas.

As características do processo exigem um intenso acompanhamento e controle de todos os passos:

não, acima de

- controle da cera;

- controle do material de revestimento;

mento;

FRAS - TERMOACABAMENTO - controle metalúrgico;

- controle dimensional dos produtos.

3.3 - Características importantes em ceras para microfundidos:

TEOR DE CINZAS - Os resíduos provenientes dos modelos de cera presentes no molde após a calcinação tendem a provocar o aparecimento de defeitos superficiais nas peças fundidas, quando acima de um determinado limite. A maior parte dos trabalhos publicados estabelece um máximo de cinzas entre 0,05 e 0,08% para queima de cera na temperatura usual de calcinação dos moldes ($\approx 1000^{\circ}\text{C}$).

PONTO DE SOLIDIFICAÇÃO E DE FUSÃO - Na realidade, é difícil medir-se com exatidão os pontos de solidificação e de fusão dessas ceras, que são misturas de polímeros e possuidoras de um intervalo de solidificação. Para efeito de caracterização de ceras, um ensaio bastante simples pode ser utilizado: o ensaio de ponto de solidificação.

As ceras utilizadas em microfundição têm as temperaturas de fusão situadas entre 55 e 85°C , sendo que alguns autores identificam as ceras de baixo ponto de fusão, até 65°C , e de alto ponto de fusão, acima de 80°C .

PLASTICIDADE - É a habilidade que a cera possui de ser deformada e conservar-se sob a nova forma sem apresentar rupturas. Uma certa plasticidade permite que as ceras não sofram trincamentos dentro da matriz, devido às contrações provocadas pelo resfriamento.

EXPANSÃO OU CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA - A variação de volume das ceras na faixa de temperatura de utilização é uma de suas características mais importantes, pois irá influenciar na precisão dimensional das peças fundidas, na possibilidade de trincamento dos moldes durante a secagem da casca ou a deceragem, na distorção dos modelos na matriz e a ocorrência de "rechupes". De uma maneira geral, a cera deve apresentar um mínimo de contração, desde a temperatura em que é injetada na matriz, até a temperatura ambiente. Este mínimo varia entre 4,5% até mais de 10% em volume, sendo considerado um máximo 8,5 e 10%.

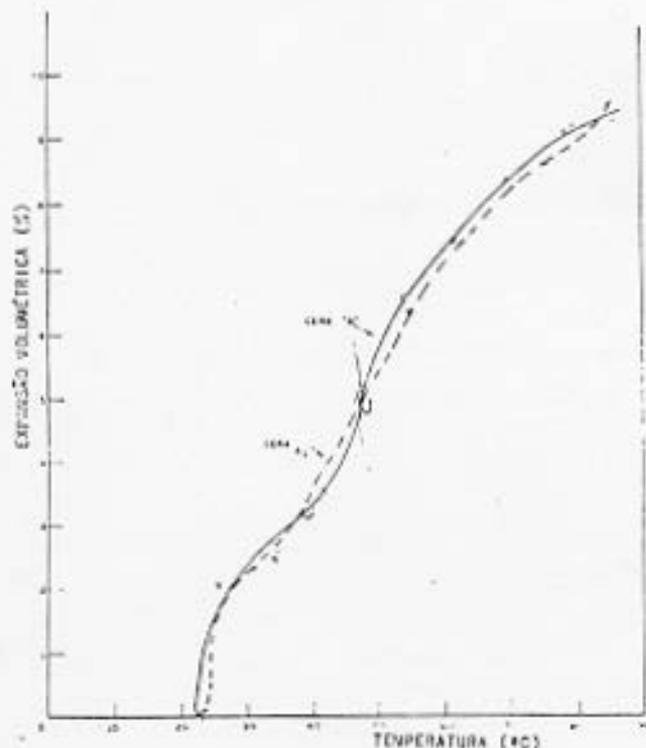


Fig. 3.3 - Curva de expansão volumétrica para uma cera nova(A) e a cera recuperada(B).

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO - Embora não especificada quantitativamente, esta desempenha um papel importante entre as características até o momento estudadas, já que os modelos de cera são extraídos da matriz, manuseados, colocados nos canais e sofrem ainda esforços elevados durante o primeiro revestimento, quando o cacho é mergulhado na lama de alta viscosidade e densidade. Segundo pesquisas do IPT(Instituto de Pesquisas Tecnológicas) a resistência à tração encontra um mínimo em 15kg/cm^2 .

DUREZA - A importância desta característica está ligada aos problemas de extração e manuseio de modelos, sujeitos a riscos e arranhões se não possuírem uma dureza superficial suficiente. Os valores

de dureza devem ficar em torno de 40 "shore D".

VISCOSIDADE - Característica considerada importante por alguns autores e criticada por outros, já que é difícil de ser medida. Sugere-se ensaios de "injetabilidade" de ceras em lugar da viscosidade.

4 - PROCEDIMENTO OPERACIONAL E RESULTADOS:

4.1 - Metodologia e Testes Realizados:

4.1.1 - Metodologia de recuperação da cera:

A cera nova aqui testada é constituída dos elementos e das percentagens que estão relacionadas na tabela abaixo:

COMPONENTES	PERCENTUAIS
<i>Parafina</i>	25
<i>Cera Mineral</i>	20
<i>EVA</i>	2
<i>Breu</i>	4
<i>Carnaúba</i>	5

A cera recuperada foi obtida da deceragem desta primeira, acima citada, que foi submetida a uma metodologia de recuperação de acordo com a seguinte ordem:

- a - Aquecer estas sobras de deceragem à temperaturas próximas a 140° C, sob agitação;
- b - Manter nesta temperatura até a evaporação completa da água.(15 a 18 horas);

c - Regular a temperatura para 80°C - 100°C ;

d - Fazer filtragem final.

4.1.2 - Expansão/Contração Volumétrica:

Para a avaliação desta propriedade utilizou-se a seguinte metodologia:

a - Levantamento da curva de expansão/contração da glicerina, que foi usada posteriormente para observação das curvas para as duas ceras testadas;

b - Levantamento das curvas para os dois tipos de cera.

Os materiais utilizados para a descrição das curvas foram simples e práticos, ou seja, usou-se um recipiente com temperatura controlada para banho-maria, um tubo de vidro com escala graduada de centésimos de milímetro, um termômetro graduado até 100°C e glicerina.

O monitoramento da expansão/contração da cera foi realizado a partir do aquecimento de um volume determinado de cera e um complemento de volume com glicerina(para melhor observação da variação de volume).

A partir das três curvas(da glicerina, da glicerina + cera nova e da glicerina + cera recuperada) pode-se avaliar as variações de volume para os dois tipos de cera.



Fig. 4.1.2 - Esquema do equipamento usado para avaliar a expansão volumétrica.

4.1.3 - Contração Linear:

Esta operação pode ser descrita da seguinte forma:

guinte forma:

a - Inicialmente, a cera a ser avaliada deve ser injetada em uma coquilha com uma cavidade interna de um paralelepípedo retangular com comprimento bem definido. Esta medida de comprimento é a cota a ser considerada.

b - Os corpos de prova injetados devem ser medidos após 24 horas de repouso.

c - É importante observar a temperatura de injeção, pois a contração é função dessa.

d - Os valores de contração são obtidos a partir da seguinte fórmula:

$$\% \text{ de contração linear} = \frac{C - C_1}{C} \times 100$$

C = cota medida da coquiha

C₁ = cota medida nos modelos após 24 horas de descanso.

4.1.4 - Teor de Cinzas:

O procedimento para determinação da quantidade de cinzas na cera pode ser descrito através das seguintes operações:

a - Inicialmente, calcinar um cadinho de porcelana, limpo e seco, em forno mufla a 1000° C por um período de 1 hora.

b - Após, resfriar o cadinho em dessecador durante 2 horas.

c - Pesar o cadinho vazio. Este peso será (P₁).

d - Colocar, no cadinho, uma amostra de cera e repesar. Este peso será (P₂).

e - Colocar o cadinho, com a cera, sob chama fraca de um bico de Bunsen até completar a combustão da cera. Tal operação deve ser realizada em uma capela.

f - Colocar o cadinho com a cera residual em forno mufla a 1000° C por um tempo de 3 horas.

- g - Resfriar em dessecador por 2 horas
- h - Pesar o cadinho com as cinzas. Este peso será (P_3).
- i - O percentual de cinzas será resultante da equação abaixo:

$$\% \text{ de cinzas} = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} \times 100$$

4.2 - Resultados:

4.2.1 - Expansão Volumétrica:

- a - Dados obtidos para a cera recuperada:

Temperatura inicial: 21,0° C.

Volume inicial da cera: 3ml

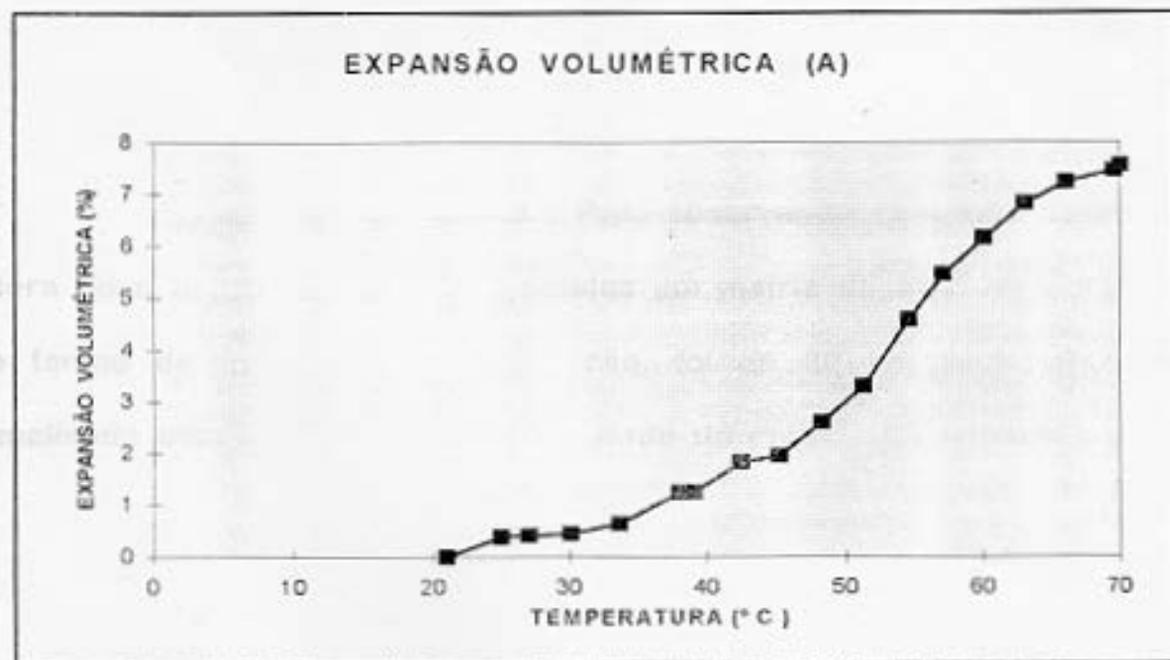


Fig. 4.2.1 - Curva representativa dos valores de expansão volumétrica da cera recuperada.

b - Pontos resultantes da análise da cera

nova:

Temperatura inicial: 22,1° C

Volume inicial de cera: 2,9ml

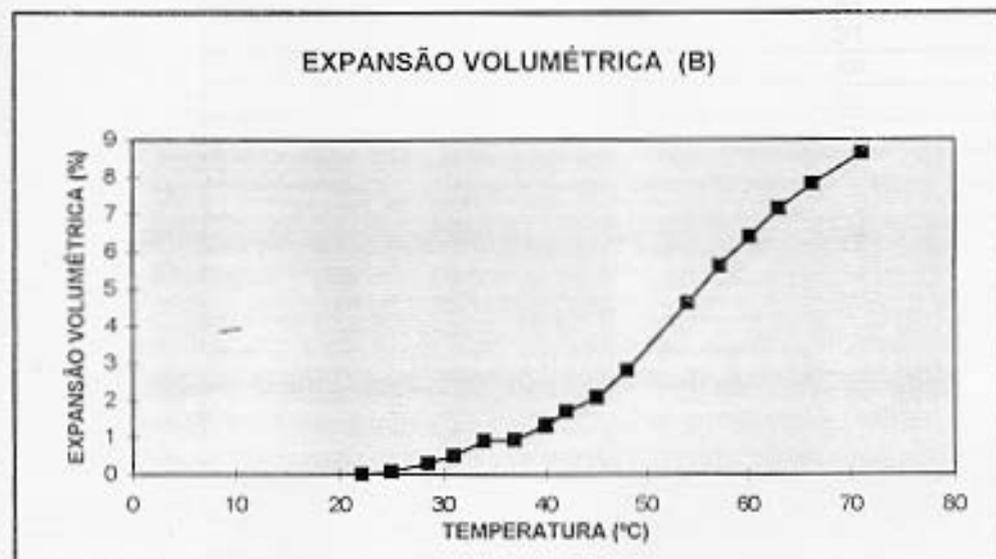


Fig. 4.2.2 - Curva representativa dos valores de expansão volumétrica para a cera nova.

4.2.2 - Contração Linear:

Cota inicial:

Contração:

a - Para observação de dados sobre a cera nova foram injetados 26 modelos em matriz de aço, observando o tempo de injeção que, neste caso, foi de 30 segundos. A cota analisada possuía 144,69mm na cavidade da matriz.

TABELA DE CONTRAÇÃO LINEAR (A)

VALORES MEDIDOS	CONTRAÇÃO LINEAR(%)
142,30	1,65
142,47	1,53
142,44	1,55
142,60	1,44
142,56	1,47
142,80	1,31
142,53	1,49
142,34	1,62
142,53	1,49
142,54	1,49
142,86	1,26
142,43	1,56
142,37	1,60
142,28	1,67
142,42	1,57
142,38	1,60
142,44	1,55
142,40	1,58
142,65	1,41
142,55	1,48
142,79	1,31
142,58	1,46
142,57	1,46
142,37	1,60
142,41	1,58
142,42	1,57

Cota média: 142,485

Contração média: 1,51%

b - Para o caso da cera reciclada,

foram injetados 45 modelos, mantendo o tempo de injeção constante, em 30 segundos.

TABELA DE CONTRAÇÃO LINEAR (B)

VALORES MEDIDOS	CONTRAÇÃO LINEAR
142,85	1,2717
142,75	1,3408
142,72	1,3615
142,62	1,4306
142,77	1,3270
142,90	1,2371
143,01	1,1611
143,01	1,1611
142,85	1,2717
142,73	1,3546
142,85	1,2717
142,88	1,2510
142,75	1,3408
142,56	1,4721
142,65	1,4099
142,73	1,3546
142,57	1,4652
142,34	1,6242
142,83	1,2855
142,78	1,3201
142,83	1,2855
142,78	1,3201
142,72	1,3615
143,05	1,1335
142,64	1,4168
142,70	1,3754
142,80	1,3062
142,86	1,2648
142,84	1,2786
142,91	1,2302
142,90	1,2371
142,81	1,2993
142,71	1,3684
142,67	1,3961
142,67	1,3961
142,17	1,7417
142,67	1,3961
142,74	1,3477
142,61	1,4376
142,64	1,4168
142,81	1,2993
142,82	1,2924
142,87	1,2579
142,42	1,5689
142,79	1,3132
142,75	1,3434

Cota média: 142,75

Contração média: 1,34

tes:

CARACTERÍSTICA ANALISADA	CERA NOVA	CERA RECICLADA
Teor de cinzas	0,033 %	0,083 %
Massa específica a 25° C *	0,945g/ml	1,273g/ml
Viscosidade	14,2	14,8
Temperatura de amolecimento	60 - 64,3° C	61,3 - 64,8° C
Dureza/Esclerômetro **	95,3	94,7
Teste de resistência à flexão **	32g/cm ²	33g/cm ²
Índice de refração *	1,489	1,487

* Os resultados foram obtidos de trabalhos de pesquisa realizados pelo Prof. Ivo Vedana.

** São resultados apenas qualitativos e que não seguirão nenhuma norma técnica específica.

Fig. 4.2.3 - Tabela comparativa das propriedades estudadas a partir dos dois tipos de ceras analisadas.

5 - ANÁLISE DE DADOS:

Iniciaremos esta etapa deste trabalho fazendo uma rápida análise das propriedades avaliadas.

O teor de cinza para ambas as ceras encontra-se dentro dos limites de tolerância apesar da cera reciclada ser duas vezes e meia superior ao da cera nova, o que pode ser explicado pela presença de material refratário residual da deceragem e que não foi removido durante as operações de calcinação.

A expansão volumétrica registrada para os dois foi muito próxima, diferindo apenas 1,1% sendo que a cera nova apresentou o valor superior. Estes resultados indicam uma pequena variação desta propriedade em função da recuperação da cera, garantindo uma estabilidade à altura da cera nova. Porém, não podemos

afirmar quantos ciclos de recuperação podem ser realizados a partir de um determinado volume inicial de cera nova.

Para as propriedades de viscosidade e dureza são apenas valores relativos de comparação e revelam pouca influência da recuperação da cera nestas propriedades.

A contração linear, que é uma propriedade que garante o cálculo da precisão dimensional, apresentou-se fracamente influenciada sendo que a cera nova ficou 0,17 pontos percentuais acima do valor encontrado para a cera recuperada.

A temperatura de amolecimento é quem define a faixa de temperatura para a injeção dos modelos, e, no caso das ceras analisadas, não houve variação nesta propriedade, ou seja, as temperaturas de amolecimento coincidiram.

6 - CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho podemos fazer algumas conclusões, tais como:

- O método de recuperação da cera foi eficaz já que as propriedades que caracterizam a cera se mantiveram praticamente constantes.
- A realização dos testes de avaliação da cera são relativamente fáceis e de boa precisão.
- Como a cera nova é usada regularmente e apresenta boas propriedades e como a cera recuperada apresentou propriedades semelhantes, concluímos que a cera recuperada pode ser utilizada para fabricação de modelos, desde que seja observado o processo de recuperação.

7 - BIBLIOGRAFIA

- 1 - Gouvêa, J.A.: Gaupo, H.P.: Caracterização de Ceras para Modelos de Fundição de Precisão - Metalurgia - Vol. 31 - Nº 215 - Outubro de 1975.
- 2 - Fundição de Precisão - Perfil do Setor, Guia de Projeto e Composição das Ligas - 1986 - ABIFA.
- 3 - Vedana, I.: Ferreira, C.F.: Müller, A., A Cera como Material para Fabricação de Modelos para o Processo de Microfusão.
- 4 - Wax, Binder and Slorry Test Handbook.