



AUTORES AUTHORS	PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS	AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY
	CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS COEFICIENTES DE ARRASTO E EMPUXO COEFICIENTES DE PRESSÃO	M. R. Dias Múcio Roberto Dias Diretor ETE

AUTOR RESPONSÁVEL RESPONSIBLE AUTHOR	DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION	REVISADA POR / REVISED BY
O. A. Campos Otávio A. A. Campos	<input type="checkbox"/> INTERNA / INTERNAL <input checked="" type="checkbox"/> EXTERNA / EXTERNAL <input type="checkbox"/> RESTRITA / RESTRICTED	W. C. C. da Silva Wilson C.C.da Silva

CDU/UDC	DATA / DATE
629.7.015	Novembro 1990

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO	ORIGEM ORIGIN								
	INPE-5185-PRE/1653	DEM								
AUTORES/AUTHORSHIP	ANÁLISE DE MÉTODOS PARA O CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS DE MODELOS DE SATÉLITES ARTIFICIAIS REENTRÁVEIS	PROJETO PROJECT								
		MACESP/VEIREC								
	Otávio Augusto de Azevedo Campos Hans-Ulrich Pilchowski	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">Nº DE PAG. NO OF PAGES</td> <td style="text-align: center;">ULTIMA PAG. LAST PAGE</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">16</td> <td style="text-align: center;">15</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">VERSÃO VERSION</td> <td style="text-align: center;">Nº DE MAPAS NO OF MAPS</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Nº DE PAG. NO OF PAGES	ULTIMA PAG. LAST PAGE	16	15	VERSÃO VERSION	Nº DE MAPAS NO OF MAPS		
Nº DE PAG. NO OF PAGES	ULTIMA PAG. LAST PAGE									
16	15									
VERSÃO VERSION	Nº DE MAPAS NO OF MAPS									

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES
<p>É feito um estudo comparativo de métodos utilizados no cálculo de coeficientes aerodinâmicos de corpos sujeitos a um escoamento supersônico, como é o caso dos satélites artificiais reentráveis. A geometria de interesse é a dos corpos cônicos com ponta rombuda ou do tipo ogiva, que são axi-simétricos. Os métodos de Newton e Belotserkovskii são utilizados e são feitas comparações com valores experimentais, obtidos em túnel de vento.</p>

OBSERVAÇÕES / REMARKS
This paper has been presented to the 1 st Brazilian Symposium of Aerospace Technology - 1º BSAT, Aeronautics Technology Institute - ITA, São José dos Campos, 27-31 August, 1990.

**ANÁLISE DE MÉTODOS PARA O CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS
AERODINÂMICAS DE MODELOS DE SATÉLITES ARTIFICIAIS REENTRÁVEIS**

**Otávio Augusto de Azevedo Campos
Hans-Ulrich Pilchowski**

**INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais
CP 515 - São José dos Campos - SP - CEP 12201 - Brasil
Telex 123-3530 - INPE BR - Fax 0123 218743**

RESUMO

É feito um estudo comparativo de métodos utilizados no cálculo de coeficientes aerodinâmicos de corpos sujeitos a um escoamento supersônico, como é o caso dos satélites artificiais reentráveis. A geometria de interesse é a dos corpos cônicos com ponta rombuda ou do tipo ogiva, que são axi-simétricos. Os métodos de Newton e Belotserkovskii são utilizados e são feitas comparações com valores experimentais, obtidos em túnel de vento.

1. Introdução

Neste trabalho são feitas comparações entre métodos empregados no cálculo de características aerodinâmicas e dados experimentais obtidos em túnel de vento. Estas comparações têm a finalidade de determinar o método que melhor se adapta ao cálculo de cada uma das características aerodinâmicas a serem utilizadas na análise de satélites reentráveis nas camadas densas da atmosfera terrestre.

A geometria dos corpos utilizados neste estudo tem como características gerais a ponta rombuda de formato esférico e o corpo passível de ser representado por um cone ou pela composição de cones sucessivos, como é exemplificado na Figura 1. Nestes casos, surge uma onda de choque destacada do corpo, de modo que existe uma camada

finita de fluido entre a superfície do corpo e a onda de choque.

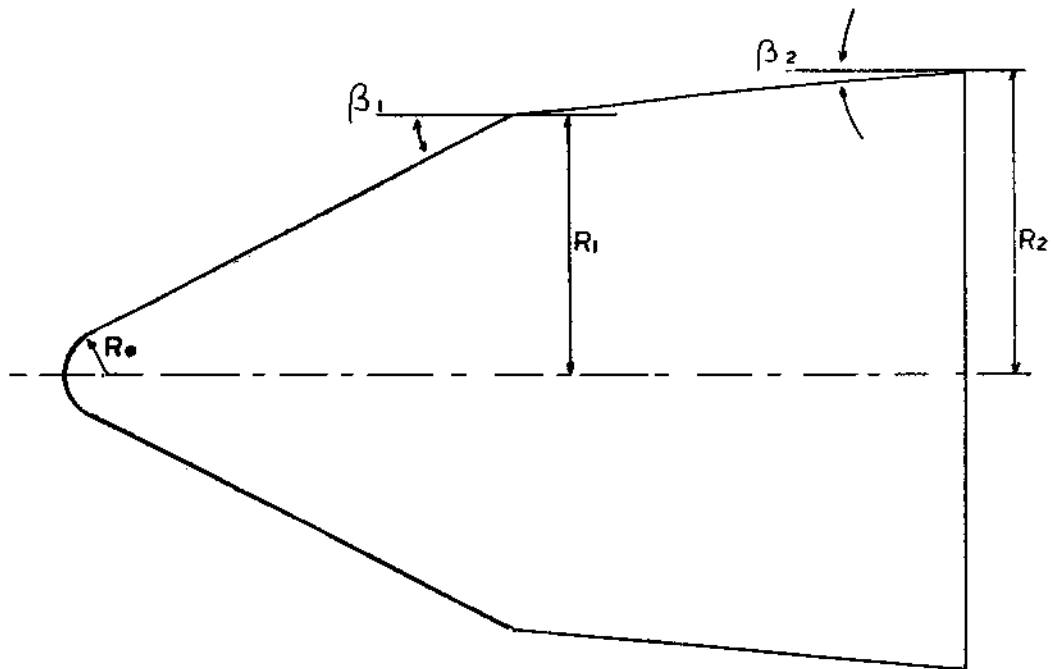


Fig. 1 - Exemplo de formato para satélites reentráveis.

2. Métodos utilizados

O primeiro método a ser utilizado foi o método de Newton (Krasnov, 1971 e Chernyi & Probstein, 1961). Este é um método empírico para calcular os coeficientes aerodinâmicos em função do ângulo de ataque em escoamentos supersônicos. O método considera a onda de choque coincidente com a superfície do corpo, o que constitui uma grande limitação teórica.

Assim, o método de Newton permite o cálculo analítico da distribuição de coeficientes de pressão na superfície de satélites, e, conseqüentemente, de seus coeficientes aerodinâmicos. Os coeficientes de pressão locais dependem apenas da orientação do elemento de área no ponto em relação ao fluxo incidente, ou seja, independem da geometria do satélite como um todo.

Um programa computacional foi implementado para calcular os coeficientes aerodinâmicos e a posição do centro de pressão em função do ângulo de ataque, dos parâmetros do escoamento e da geometria dos satélites artificiais axi-simétricos reentráveis.

O segundo método a ser utilizado foi o método integral de

Belotserkovskii (Traugott, 1960 e South Jr., 1968). Este é um método teórico que utiliza as equações do escoamento entre a onda de choque destacada e a superfície do corpo. Estas equações são então integradas ao longo da superfície do satélite reentrável, fornecendo assim a distribuição de pressão na superfície. Conseqüentemente, os coeficientes aerodinâmicos podem ser calculados.

O método de Belotserkovskii tem como principal limitação o fato de supor ângulo de ataque nulo. Porém, esta hipótese pode muitas vezes ser utilizada no caso de satélites reentráveis.

Um programa computacional foi implementado para calcular o coeficiente de arrasto e as distribuições de pressão e velocidade na superfície de satélites axi-simétricos reentráveis, além de determinar a forma da onda de choque destacada.

Variações dos dois métodos citados foram ainda utilizadas, denominadas método de Newton Modificado e de Belotserkovskii Modificado. Estes diferem dos métodos anteriores no cálculo do coeficiente de pressão no ponto de estagnação, na parte posterior do satélite.

Em todos os métodos estudados os efeitos viscosos não são considerados. O fluido é sempre um gás perfeito, em escoamento permanente, e os efeitos de transferência de calor são também desprezados.

3. Testes e resultados

Foram efetuadas diversas baterias de testes que são descritas a seguir:

a) A primeira bateria de testes foi feita para dois modelos de satélites. O formato de cada um deles é o de um cone de nariz esférico e abertura angular $\beta=60^\circ$, como mostra a Figura 2, diferindo apenas pela razão R_a/R_b , do raio esférico R_a da ponta arredondada e do raio da base R_b do corpo cônico. Para um dos modelos esta razão é 0,25 (modelo 1), enquanto que para o outro é 0,02 (modelo 2). Os dois

modelos foram testados para velocidades correspondentes a $M=2,96$ e $M=4,63$. Assim, estes testes, além de permitirem uma comparação de métodos, apontam a influência da razão R_a/R_b e do número de Mach nos coeficientes de pressão.

Nestes testes são utilizados apenas os métodos de Newton e Belotserkovskii para o cálculo dos coeficientes de pressão normalizados (em relação ao valor no ponto de estagnação, C_p^*) ao longo da superfície dos corpos de testes, e os resultados comparados com dados experimentais obtidos em túnel de vento (South Jr., 1968). As Figuras 3 a 6 mostram em forma de gráficos estes resultados.

É evidente a superioridade do método de Belotserkovskii sobre o de Newton, para este caso. Os erros do método de Belotserkovskii em nenhum dos casos ultrapassaram a 2%. Já os erros no caso do método de Newton chegaram a até aproximadamente 20% nos pontos de junção do cone com o nariz esférico. Porém, deve-se notar que no caso de corpos constituídos de cones sucessivos o método de Belotserkovskii não é aplicável, enquanto que o de Newton o é.

Das Figuras 3 a 6 pode-se ainda concluir que os resultados apresentados pelo método de Newton melhoram à medida que a razão R_a/R_b aumenta, ou seja, quando o satélite é arredondado na ponta, como é o caso do modelo 2. Já o número de Mach influencia pouco nos valores dos coeficientes de pressão.

b) Como os métodos de Belotserkovskii e de Belotserkovskii Modificado são utilizáveis apenas para ângulos de ataque nulos ($\alpha = 0$), fez-se a segunda bateria de testes comparando os coeficientes de arrasto para esta condição. Foram comparados os resultados obtidos pelos métodos de Belotserkovskii, Belotserkovskii Modificado, Newton e Newton Modificado com dados experimentais (South Jr., 1968).

Cinco modelos de teste foram utilizados a uma velocidade correspondente a $M=4,63$. A geometria destes modelos é do tipo mostrado na Figura 2, sendo que a razão R_a/R_b é a mesma para todos eles (igual a 0,1). Os modelos diferem apenas pela abertura angular do cone β , que varia de 60° a 90° .

Os resultados destes testes são mostrados na Figura 7.

No cálculo dos coeficientes de arrasto para $\alpha=0$, os resultados demonstraram que os métodos de Belotserkovskii e Belotserkovskii Modificado são utilizáveis apenas para ângulos de abertura do cone maiores que 60° . Para $60^\circ < \beta < 70^\circ$ o método de Belotserkovskii é equivalente ao de Newton, e o de Belotserkovskii Modificado ao de Newton Modificado, sendo que estes últimos apresentaram melhores resultados. Para ângulos próximos a 75° ou maiores o método de Belotserkovskii se apresenta como sendo o melhor. Nota-se ainda que para $70^\circ < \beta < 75^\circ$ os métodos de Belotserkovskii e Belotserkovskii Modificado se sucedem em melhor precisão com o crescimento da abertura do cone, respectivamente, embora o método de Newton Modificado tenha um bom comportamento nesse intervalo.

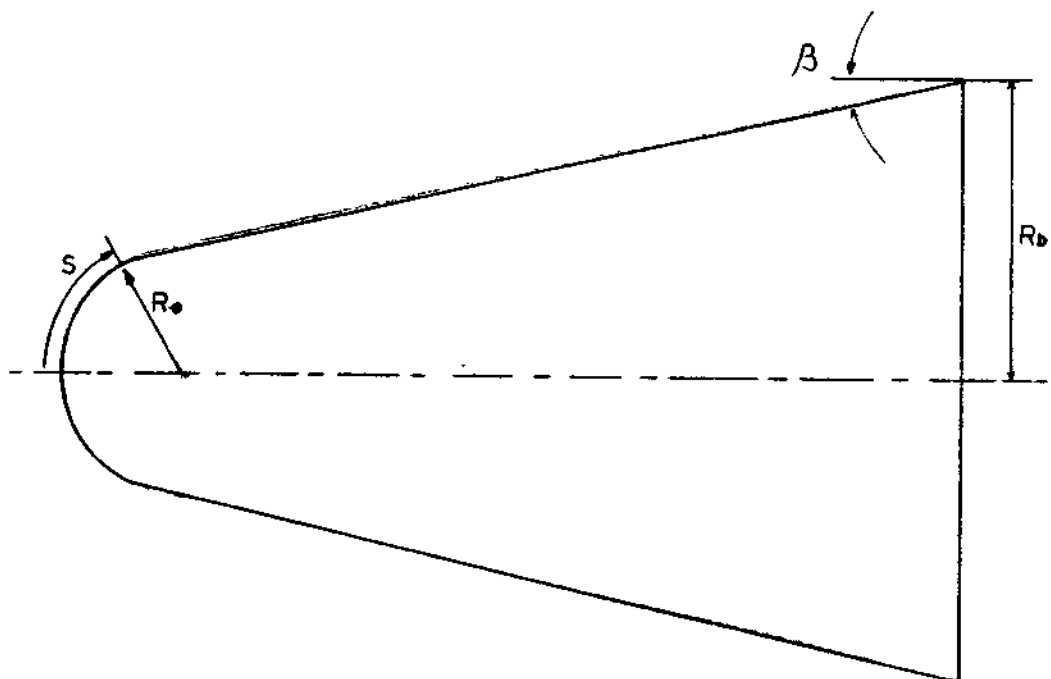


Fig. 2 - Formato dos modelos utilizados no cálculo dos coeficientes aerodinâmicos e de arrasto para $\alpha=0$.

c) Pelo mesmo motivo apresentado no item anterior, na terceira bateria de testes apenas os métodos de Newton e Newton Modificado foram utilizados. Foram calculados os coeficientes de arrasto, sustentação e momento de arfagem em função do ângulo de ataque, para uma velocidade correspondente a $M=6,8$, e os resultados foram comparados com dados experimentais obtidos em túnel de vento (Penland, 1967). Três modelos foram utilizados, sendo que dois deles têm o formato

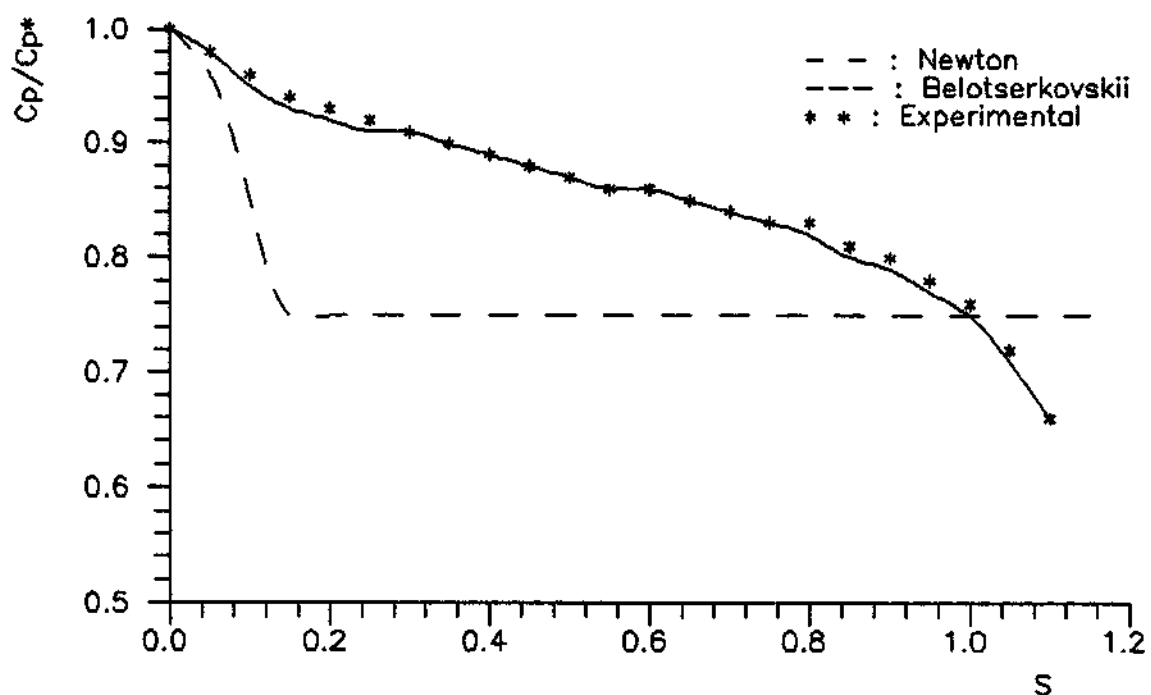


Fig. 3 - Coeficientes de pressão para o modelo 1, com Mach = 4.63.

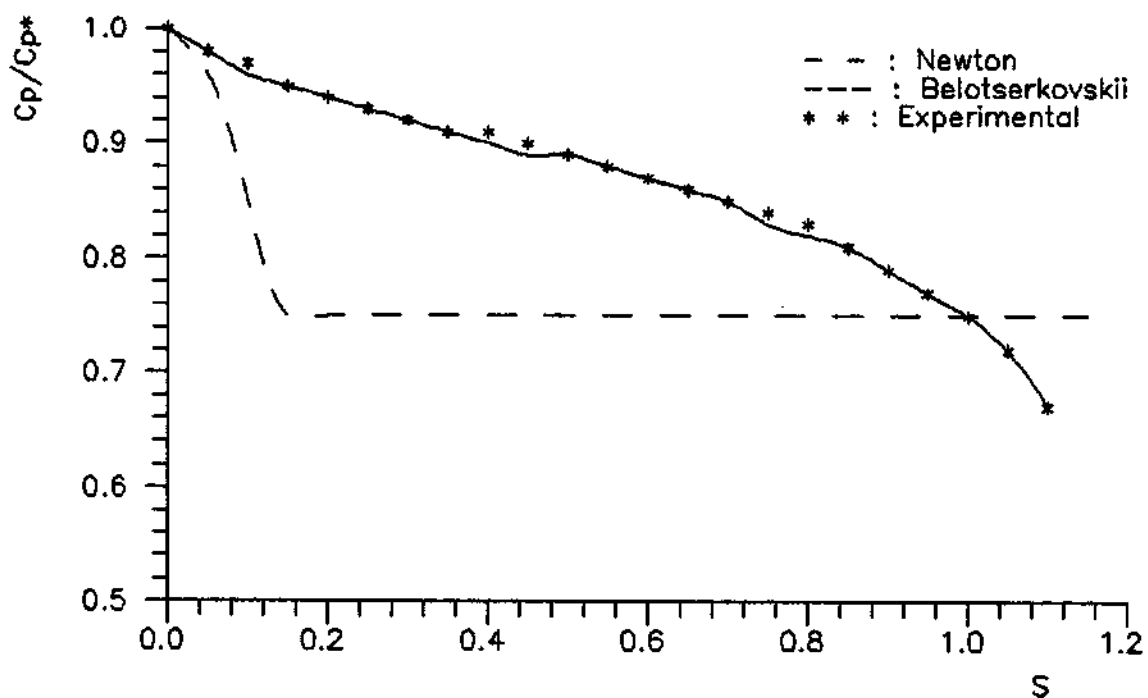


Fig. 4 - Coeficientes de pressão para o modelo 1, com Mach = 2.96.

mostrado na Figura 1. Estes são os modelos 3 ($\beta_1=15,07^\circ$, $\beta_2=11,3^\circ$, $R_e=0,00254m$, $R_1=0,01906m$, $R_2=0,03175m$) e 4 ($\beta_1=15,07^\circ$, $\beta_2=4,75^\circ$, $R_e=0,003175m$, $R_1=0,02384m$, $R_2=0,03175m$). O modelo 5 tem a geometria indicada na Figura 8, com comprimento igual a $0,1292m$ e raio da base $0,02794m$. O centro de massa dos três modelos está localizado a 62% da corda geométrica dos corpos, medida a partir de seus bordos de ataque.

As Figuras 9 a 17 mostram em forma de gráficos os resultados obtidos para diversos ângulos de ataque.

Na comparação dos coeficientes de arrasto em função do ângulo de ataque, o método de Newton se mostrou superior ao de Newton Modificado, porém os gráficos mostram que a diferença é aproximadamente constante. O erro máximo para o modelo apresentado na Figura 8 foi de aproximadamente 16% para o método de Newton e 25% para o de Newton Modificado (Fig. 15). Já nos outros dois modelos o erro máximo apresentado pelo método de Newton foi de aproximadamente 8%, e pelo de Newton Modificado em torno de 16% (Figs. 9 e 12).

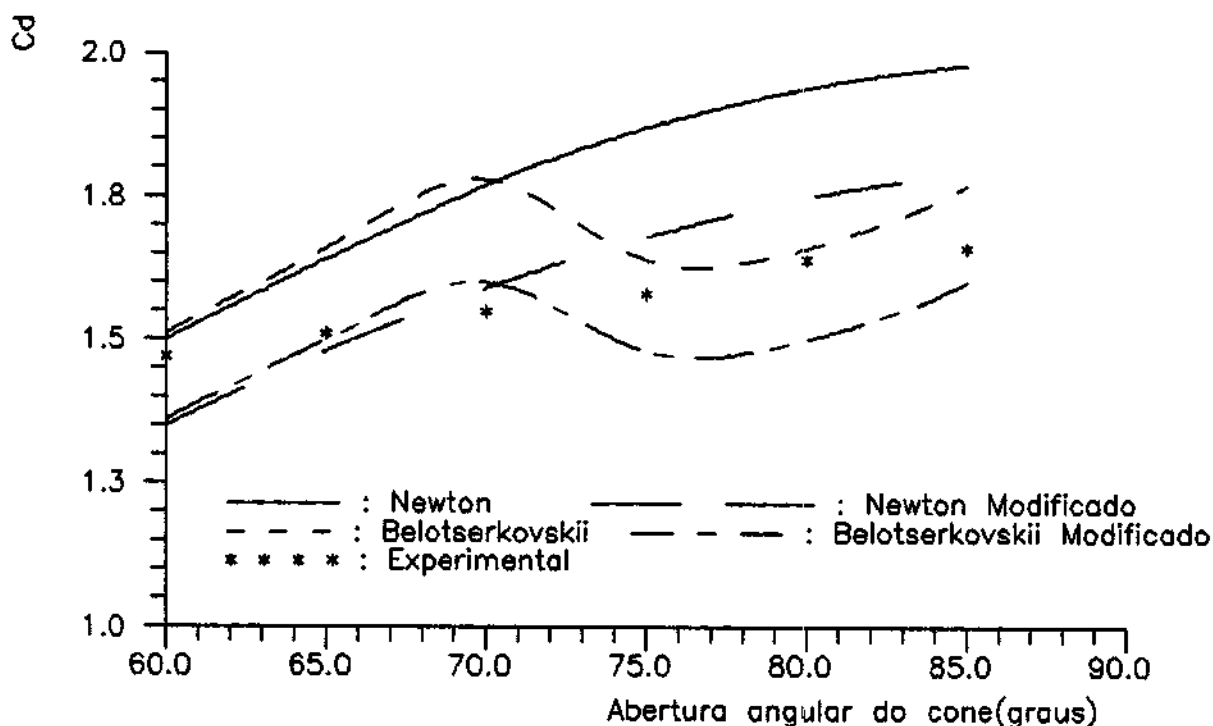


Fig. 7 - Coeficientes de arrasto por diversos métodos.

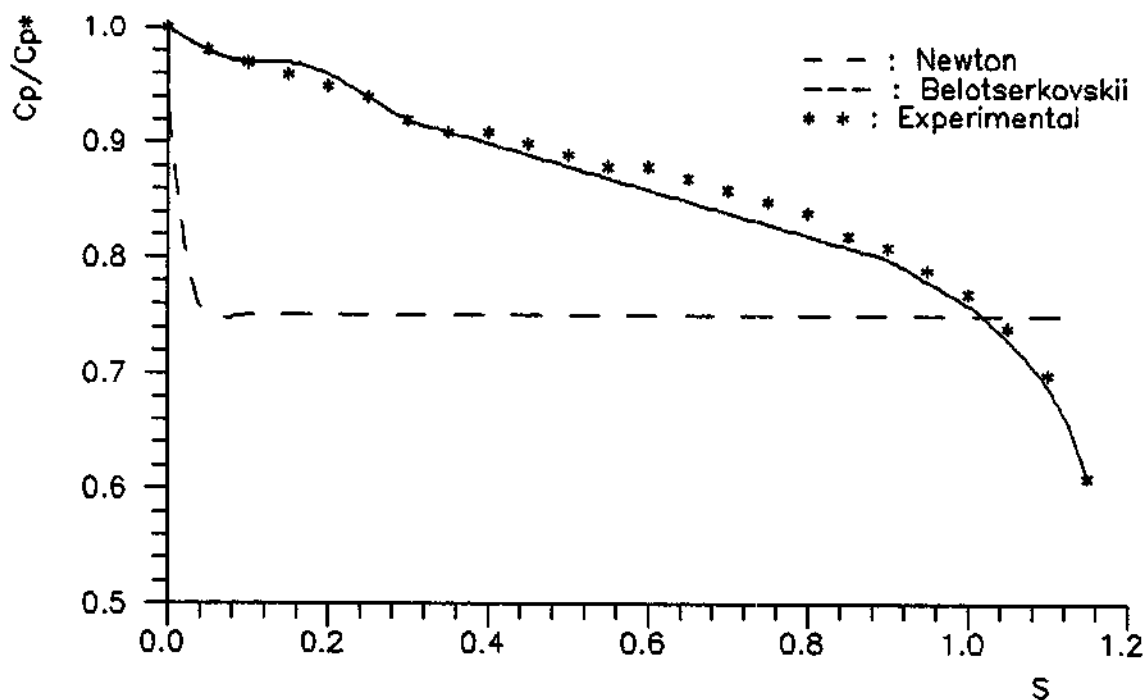


Fig. 5 - Coeficientes de pressão para o modelo 2, com Mach = 4.63.

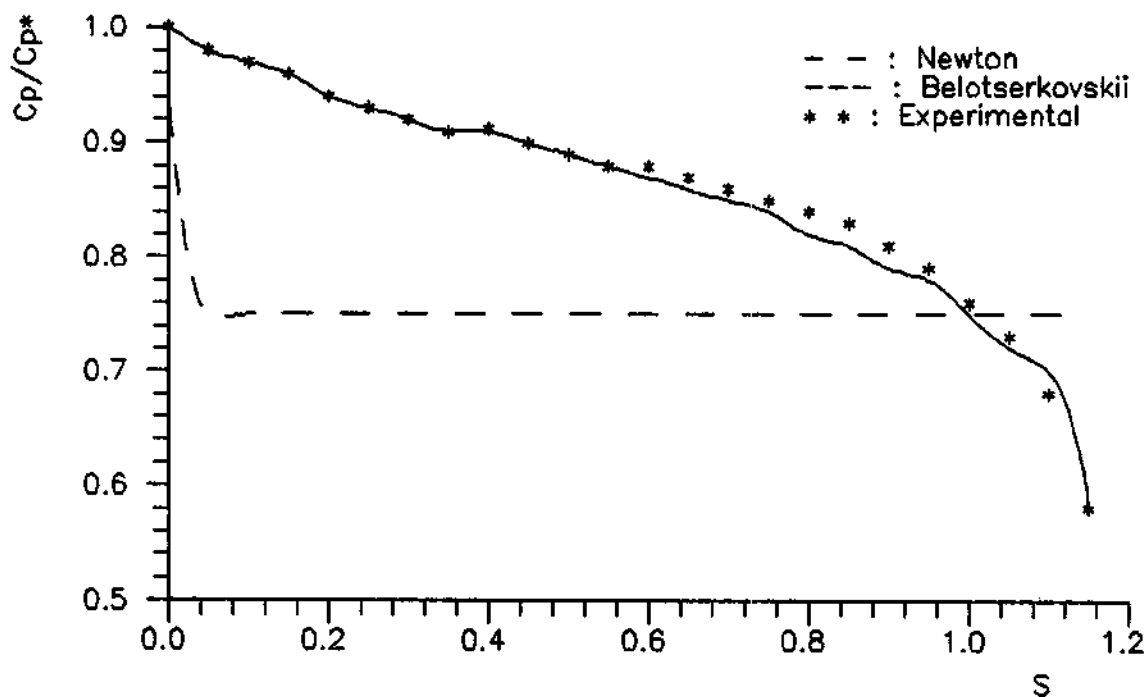


Fig. 6 - Coeficientes de pressão para o modelo 2, com Mach = 2.96.

No caso dos coeficientes de sustentação os resultados obtidos pelos métodos de Newton e Newton Modificado praticamente coincidiram com os valores experimentais, para ângulos de ataque menores que 5° . À medida que o ângulo de ataque aumenta, o método de Newton Modificado passa a apresentar resultados melhores que o de Newton. Este último chega a erros de aproximadamente 12% para ângulos de ataque em torno de 16° , enquanto o método de Newton Modificado se mantém praticamente coincidente com os resultados experimentais à medida que o ângulo de ataque aumenta.

Também no cálculo dos coeficientes de momento de arfagem, os métodos de Newton e Newton Modificado apresentaram excelentes resultados para ângulos de ataque menores que 5° . Para ângulos de ataque maiores que este valor, os erros aumentaram chegando até a um erro máximo de aproximadamente 20% para o método de Newton (no modelo 3), e a 23% para o de Newton Modificado (no modelo 4). Para o modelo 4 o método de Newton se mostrou mais eficiente, enquanto que para os outros dois o método de Newton Modificado apresentou melhores resultados. Em todos os casos, os erros aumentaram à medida que o ângulo de ataque aumentou.

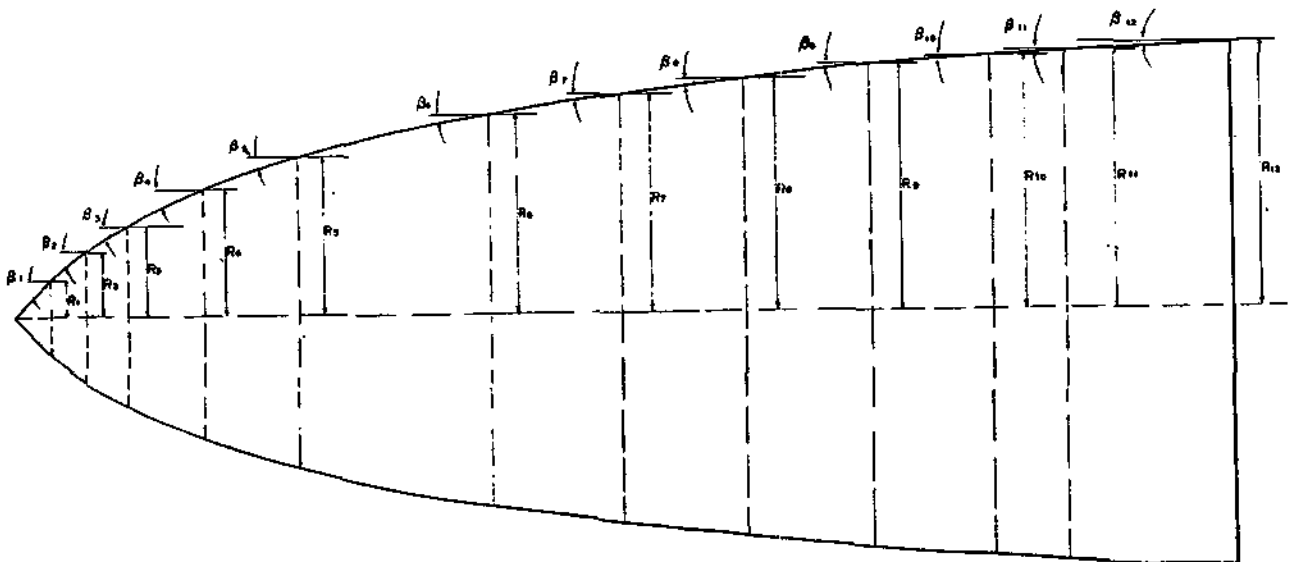


Fig. 8 - Modelo 5, com superfície contínua, aproximado por cones sucessivos para fins de cálculo, utilizado nos testes de coeficientes aerodinâmicos em função do ângulo de ataque.

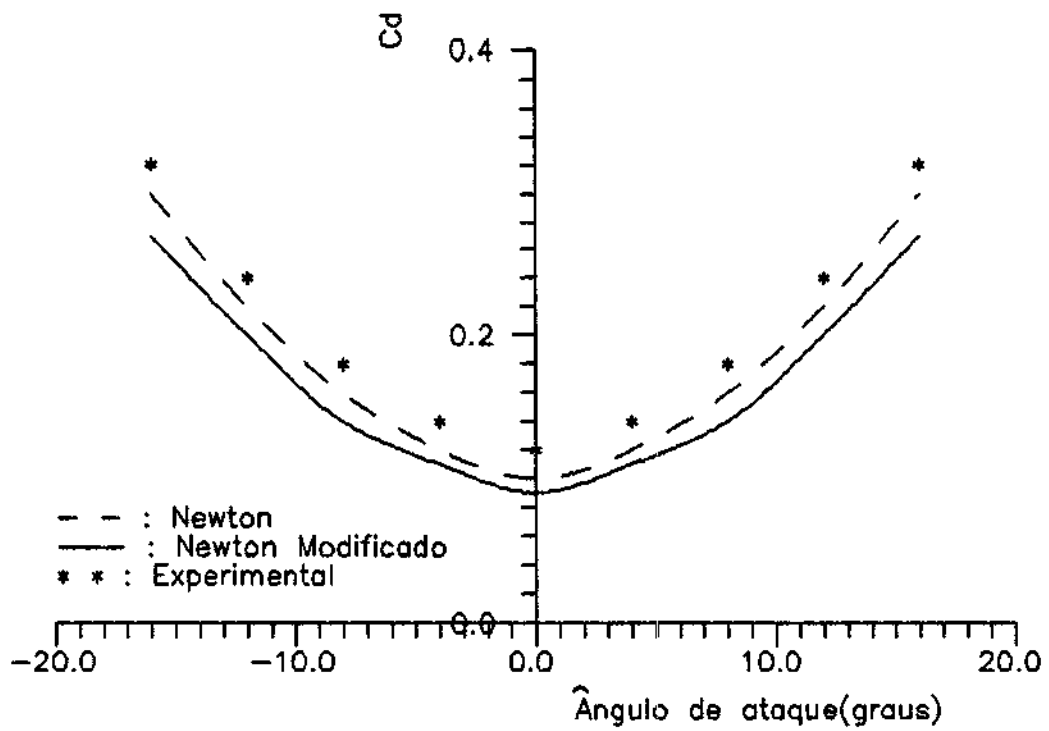


Fig. 9 - Coeficientes de arrasto do modelo 3.

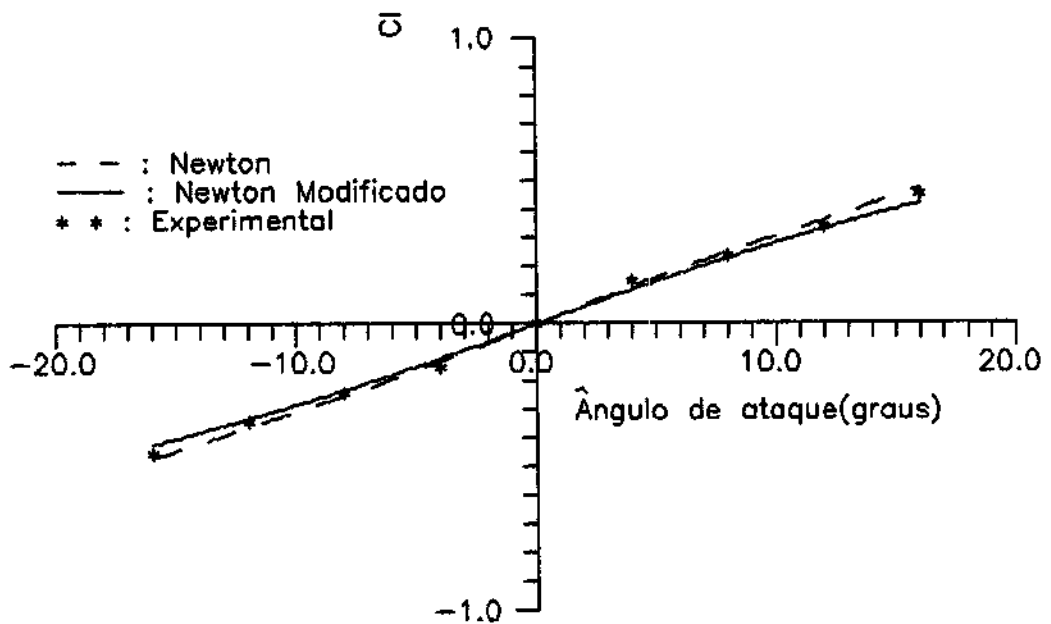


Fig. 10 - Coeficientes de sustentação do modelo 3.

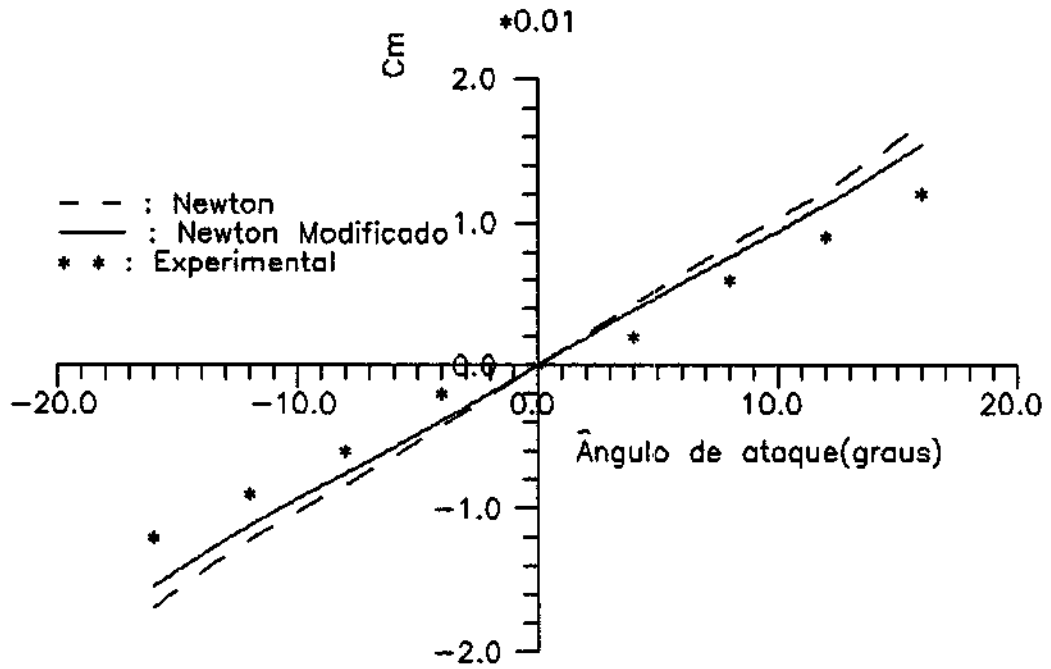


Fig. 11 - Coeficientes de momento de arfagem do modelo 3.

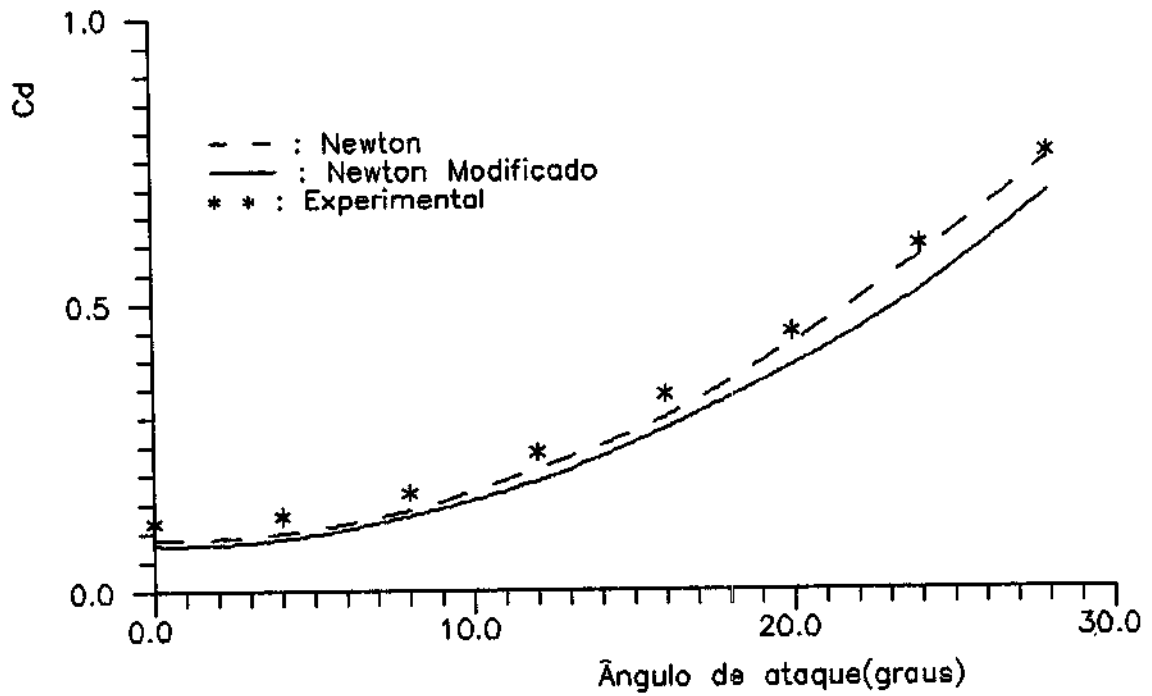


Fig. 12 - Coeficientes de arrasto do modelo 4.

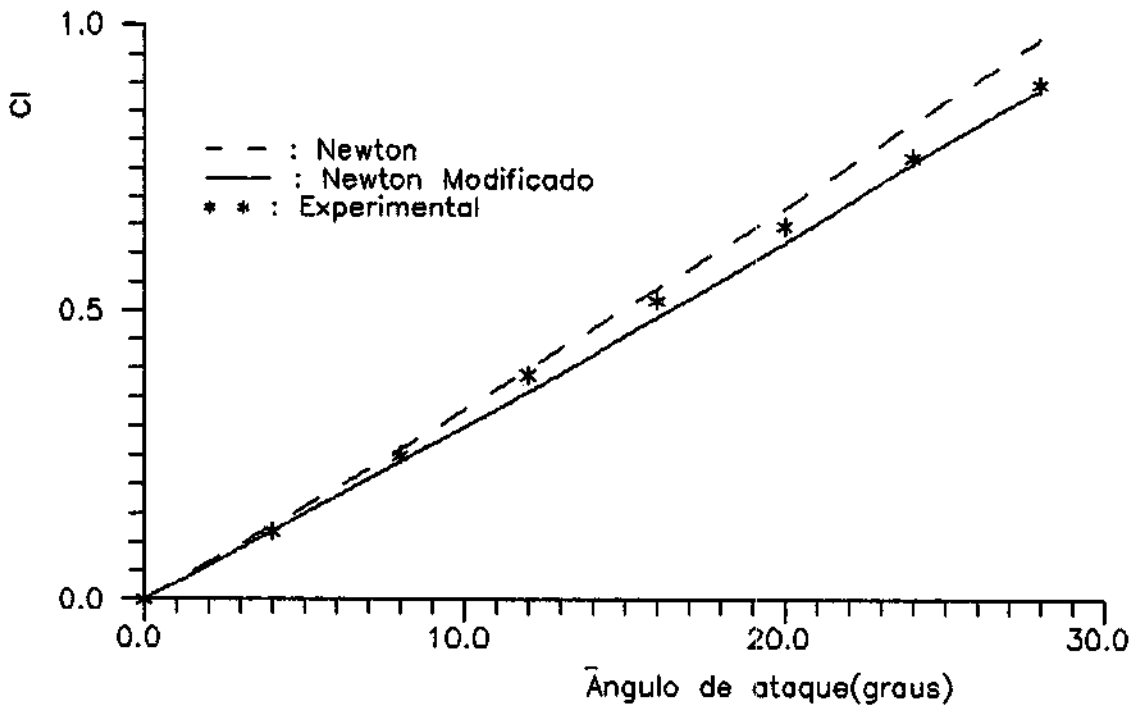


Fig. 13 - Coeficientes de sustentação do modelo 4.

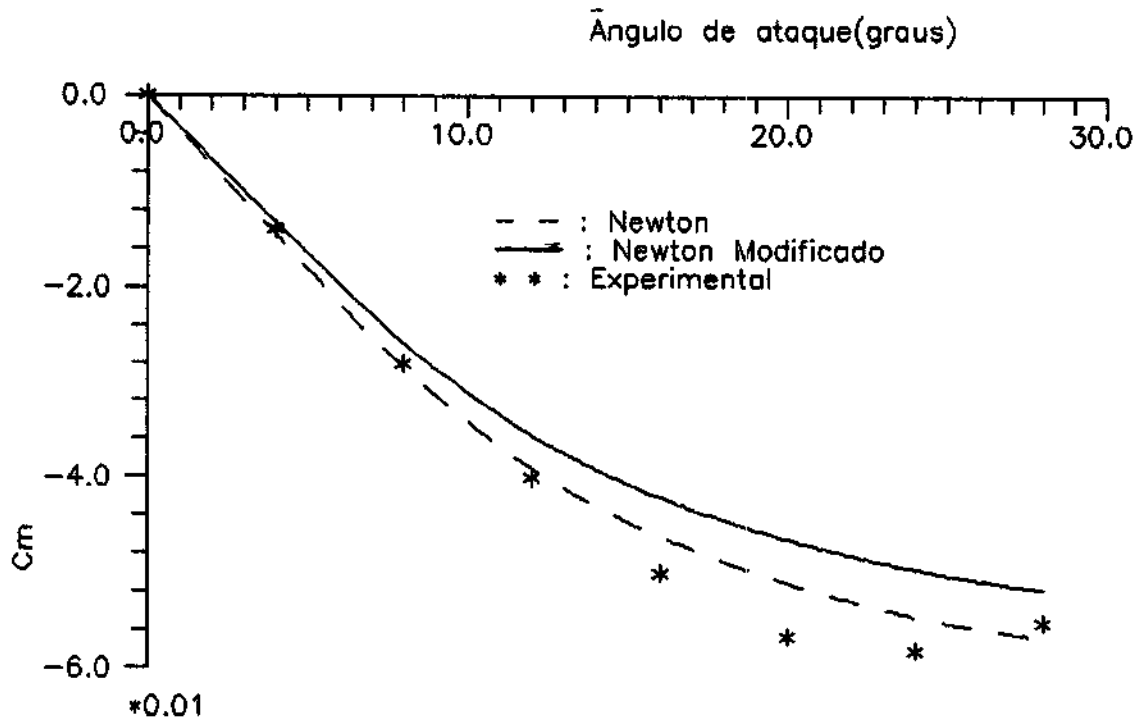


Fig. 14 - Coeficientes de momento de arfagem do modelo 4.

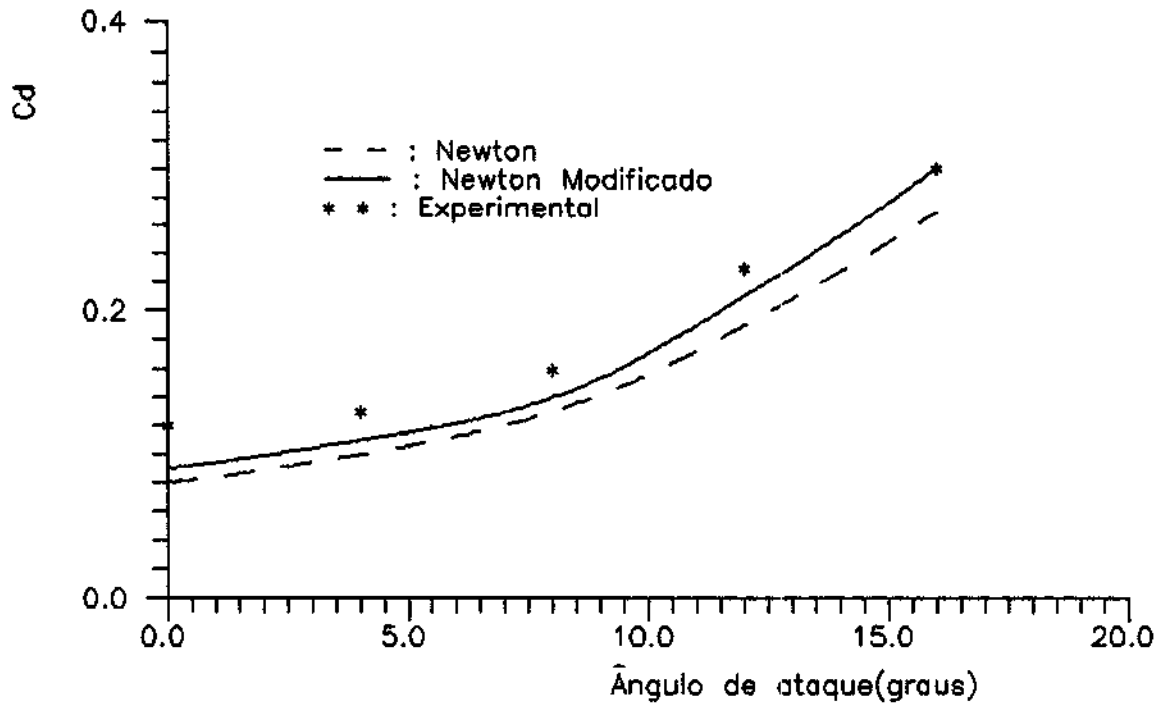


Fig. 15 - Coeficientes de arrasto do modelo 5.

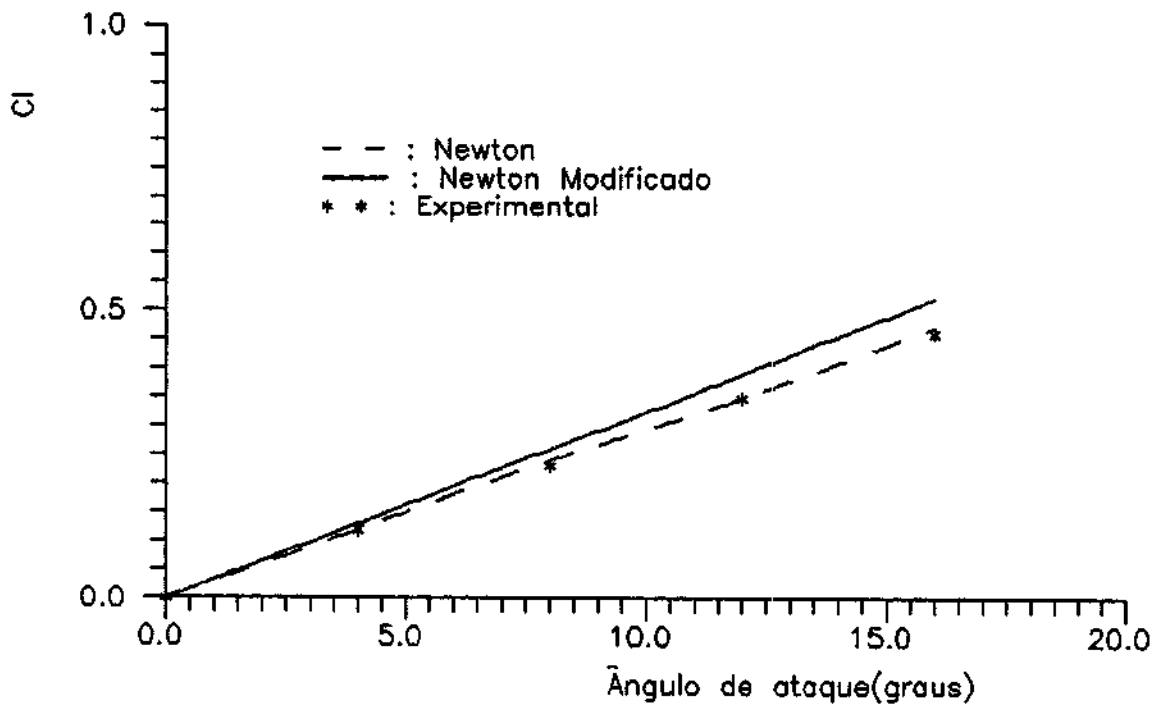


Fig. 16 - Coeficientes de sustentação do modelo 5.

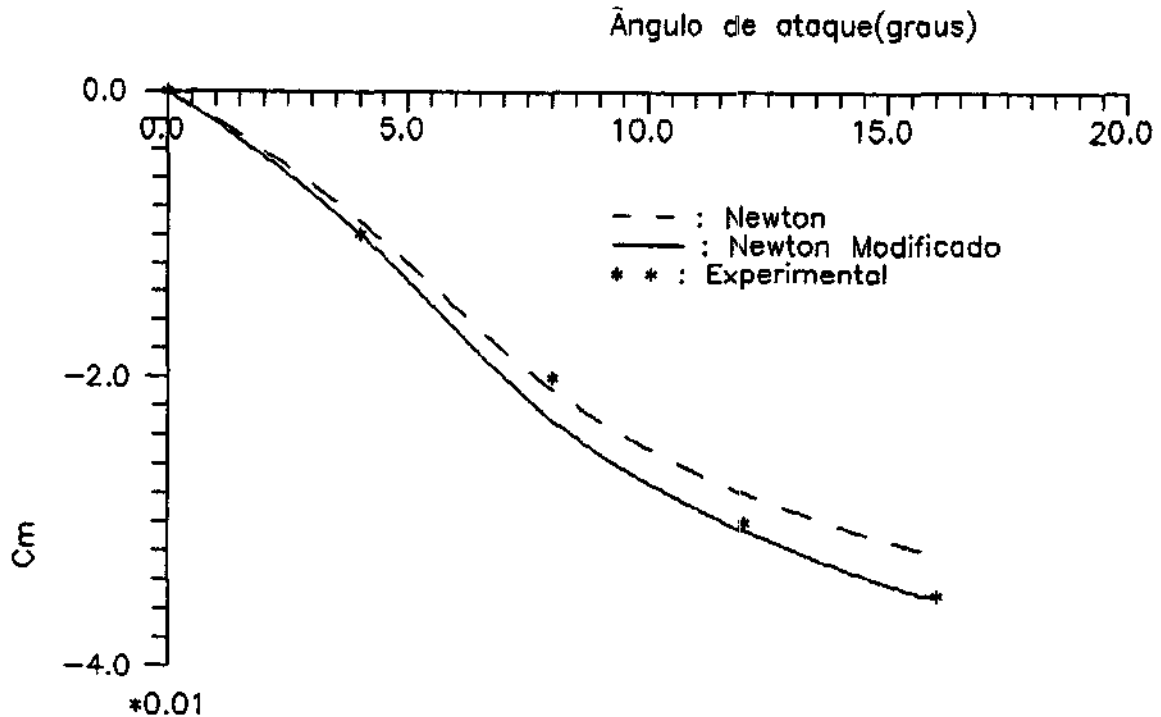


Fig. 17 - Coeficientes de momento de arfagem do modelo 5.

4. Conclusões e comentários

Os resultados obtidos mostram que o método de Newton (e o de Newton Modificado) fornece valores razoáveis para os coeficientes aerodinâmicos. Para ângulos de ataque e ângulos de abertura do cone pequenos estes valores podem ser considerados bons. Este método é simples e rápido, e tem como principal vantagem o fato de funcionar para quaisquer valores do ângulo de ataque e de abertura do cone. Porém, este método apenas calcula o coeficiente de pressão na superfície do satélite, desprezando a forma da onda de choque gerada e não fornecendo a distribuição de velocidades na superfície.

Já o método de Belotserkovskii (e o de Belotserkovskii Modificado) é aplicável apenas para ângulos de ataque nulos e grandes aberturas angulares do cone. Nestes casos, porém, o método fornece não apenas a distribuição de coeficientes de pressão na superfície, mas também a forma da onda de choque e a distribuição de velocidades na superfície do satélite.

Assim, conclue-se que a escolha de qual seria o método mais adequado para uma certa aplicação depende das características geométricas e aerodinâmicas, devendo esta ser feita de acordo com os objetivos desejados em cada caso.

Referências bibliográficas:

¹Chernyi, G. C. & Probstein, R. F. - Introduction to hypersonic flow - USA, 1961.

²Krasnov, N. F. - Aerodynamics - Moscow, 1971.

³Penland, J. A. & Bernot, P. T. - Aerodynamic characteristics of three axisymmetric low-fineness-ratio reentry shapes at Mach 6.9 - NASA TN - D - 4122, 1967.

⁴South Jr., J. C. - Calculation of axisymmetric supersonic flow past blunt-bodies with sonic corners, including a program description and listing - NASA TN - D - 4563, 1968.

⁵Traugott, S. C. - An approximate solution of the direct supersonic blunt-body problem for arbitrary axisymmetric shapes - J. Aerosp. Sci., Vol. 27, n^o5, May 1960, pp. 361-370.



PROPOSTA PARA PUBLICAÇÃO

DATA
set/90

IDENTIFICAÇÃO	TÍTULO	
	ANÁLISE DE MÉTODOS PARA O CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS DE MODELOS DE SATÉLITES ARTIFICIAIS REENTRÁVEIS	
	AUTORIA	PROJETO/PROGRAMA
	Otávio Augusto de Azevedo Campos Hans-Ulrich Pilchowski	MACESP/VEIREC
	DIVISÃO	
	VDO	
	DEPARTAMENTO	
	DEM	
DIVULGAÇÃO <input checked="" type="checkbox"/> EXTERNA <input type="checkbox"/> INTERNA MEIO: 1º BSAT		

REVISÃO TÉCNICA	REVISOR TÉCNICO	APROVADO: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/> VER VERSO		APROVAÇÕES
	RECEBI EM: 24/09/90 REVISADO EM: 24/09/90 OBSERVAÇÕES: <input checked="" type="checkbox"/> NÃO HÁ <input type="checkbox"/> VER VERSO DEVOLVI EM: 25/09/90	DATA CHEFE DIVISÃO DATA CHEFE DEPARTAMENTO		
	ASSINATURA			

REVISÃO DE LINGUAGEM	Nº: _____	PRIORIDADE: _____	DATILOGRAFIA
	DATA: _____		
	REVISADO <input type="checkbox"/> COM <input type="checkbox"/> SEM <input type="checkbox"/> VER VERSO	CORREÇÕES <input type="checkbox"/> VER VERSO	
	POR: _____		
	DATA	ASSINATURA	

PARECER	
FAVORÁVEL: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	<input type="checkbox"/> VER VERSO
DATA	RESPONSÁVEL/PROGRAMA

EM CONDIÇÕES DE PUBLICAÇÃO EM: _____	AUTOR RESPONSÁVEL
--------------------------------------	-------------------

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	
DIVULGAÇÃO <input type="checkbox"/> INTERNA <input type="checkbox"/> EXTERNA MEIO: _____	
OBSERVAÇÕES: _____	
DATA	DIRETOR

SEC	PUBLICAÇÃO: _____	PÁGINAS: _____	ÚLTIMA PÁGINA: _____
	CÓPIAS: _____	TIPO: _____	PREÇO: _____