

# PREVISÃO DOS ASSENTAMENTOS E RESULTADOS DA MONITORIZAÇÃO DA PISTA E DOS CAMINHOS DE CIRCULAÇÃO NA ILHA ARTIFICIAL DO AEROPORTO INTERNATIONAL DE MACAU

Prediction and monitoring of the runway and taxiways of the artificial island of the Macau International Airport

ANTÓNIO DIOGO PINTO\*

RESUMO - A pista e os caminhos de circulação do Aeroporto Internacional de Macau foram construídos numa ilha artificial de 130 hectares ao largo da Ilha da Taipa. A natureza geológica das formações subjacentes era particularmente difícil para suportar o aterro e muito especialmente para acomodar as fundações de uma pista e caminhos de circulação que se queriam capazes de servir todo o tipo de aeronaves existentes. O período de tempo disponível para a construção do empreendimento era particularmente curto pelo que não era possível aceitar o espaço de tempo requerido para uma prolongada consolidação dos aterros.

O presente artigo descreve sumariamente os estudos que foram feitos para a previsão dos assentamentos e consequente dimensionamento e tratamento das fundações da pista e dos caminhos de circulação no caso de se optar por uma solução alternativa em aterro. Os resultados desses estudos e as consequentes alterações de projecto permitiram a aceitação dessa alternativa pelos bancos e pelos accionistas e foram decisivos para a viabilidade do projecto.

Este artigo descreve também o plano de monitorização dos aterros, os cuidados tidos na execução dos mesmos, os primeiros resultados de assentamentos obtidos, a comparação com as previsões oportunamente feitas, a explicação dos desvios verificados e as recomendações para o futuro. Com base nos resultados obtidos concluiu-se que não será necessária uma correcção longitudinal do pavimento da pista antes do ano 2015

SYNOPSIS - This paper presents the Macau International Airport as well as the geologic conditions of the runway and taxiways site. It reports the estimated settlements without and with treatments and why and how they were calculated. It is also presented how the forecasted information about sand fill and settlements influenced the design of the runway and taxiway foundations in order to meet airfield specifications. This information has been important for the banks to decide to support the whole project.

The land fill was subject to an extensive monitoring plan that was designed and is being executed in order to measure the field settlements. This paper also present the results obtained to date and compares them with the forecasted settlements. Furthermore this paper shows that the measured settlements follows the forecasted trend. Based on that it concludes that repavement may not be necessary before the year 2015.

## 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 - Localização

A pista do Aeroporto Internacional de Macau tem 3360 m de comprimento e 60 m de largura e está situada "offshore", numa ilha artificial com 130 hectares de superfície,

---

\* Professor, Instituto Superior Técnico

construída em pleno delta do rio das Pérolas, a Leste das Ilhas da Taipa e de Coloane. A zona do terminal assenta parcialmente sobre uma área em aterro no extremo Este da Ilha da Taipa, distando de cerca de 700 m do eixo da pista. A ligação da ilha artificial ao terminal é feita por dois caminhos de circulação em ponte, um a Sul com 1620m e outro a Norte com 700m.

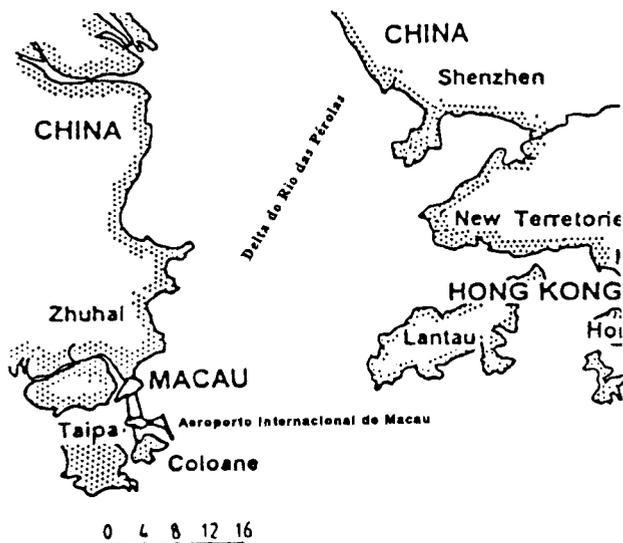


Fig. 1 – Plano de localização do Aeroporto Internacional de Macau

## 1.2 - Razões da escolha da localização

Vários estudos para a localização do Aeroporto culminaram com a escolha referida no ponto anterior como sendo a localização que melhor pondera os diferentes factores em presença, nomeadamente, a escassez de espaços “onshore”, a topografia das Ilhas, as implicações ecológicas (incluindo o ruído), os ventos predominantes e a extensão desejável da pista.

## 1.3 - Geologia geral na área de implantação das infra-estruturas

As zonas emersas são essencialmente constituídas por formações graníticas com granitos de grão grosseiro mais ou menos meteorizados. A meteorização diferencial ao longo das diaclases e fracturas fez-se sentir intensa e profundamente dando origem à formação de zonas meteorizadas pouco consistentes envolvendo blocos sãos com consistência rochosa.

As zonas imersas são bastante mais diversificadas, sendo no essencial constituídas por quatro tipos de formações geológicas:

- sedimentos recentes de aspecto lodoso e consistência muito fraca (“marine mud”), a profundidades variando de -2 a -30 metros;
- sedimentos mais antigos, formados por areias, argilas e siltes, de consistência média (“alluvium”), a profundidades variando de -30 a -60 metros;
- formações graníticas meteorizadas (granito meteorizado), resultantes da alteração do granito subjacente, as quais incluem de maneira dispersa e errática blocos de granito são, a profundidades que variam de -60 a - 80 metros, e,
- formações graníticas (granito) constituídas por granito são, semelhante ao que aflora na parte emersa.

A Sul da ilha artificial, na zona compreendida entre os 3000 e os 3200 metros, a contar do topo Norte, os dados sísmicos indicaram a presença de uma caixa de falha com cerca de 200 metros de espessura, em que o “bed rock” está provavelmente a mais de 200 metros de profundidade.

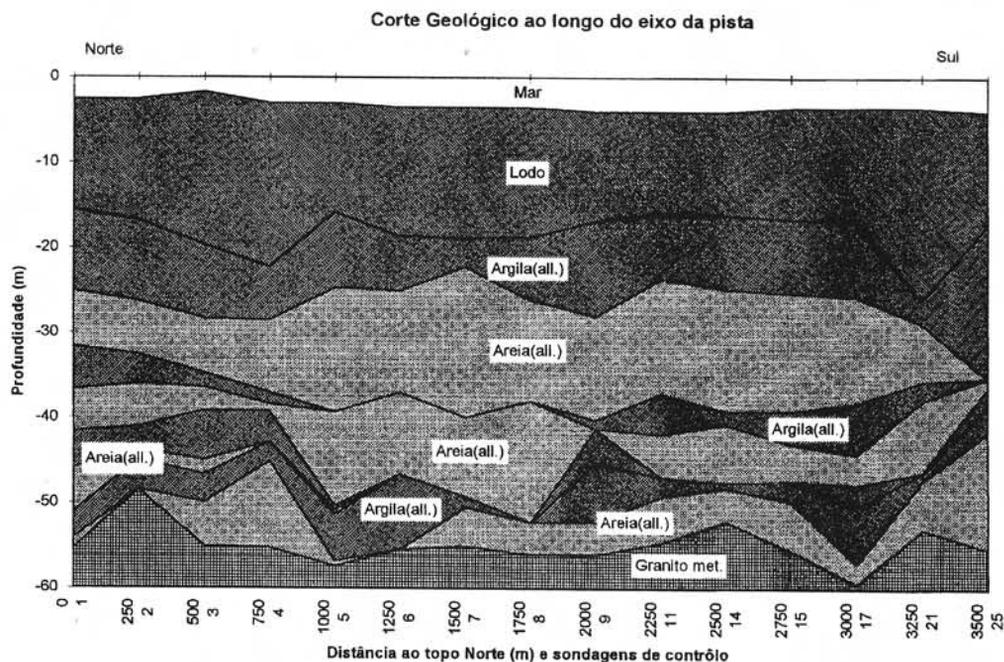


Fig. 2 - Corte esquemático da Geologia da ilha artificial ao longo do eixo da pista

#### 1.4 - Tipos de fundações consideradas para as diferentes obras do Aeroporto

As fundações previstas para as diferentes obras do Aeroporto variaram com a natureza de cada obra e com a Geologia das formações existentes no local onde a mesma foi implantada.

De todas as fundações mereceram especial atenção e discussão as fundações para o pavimento da pista e dos caminhos de circulação na ilha artificial, as fundações para o pavimento da placa e as fundações para os caminhos de circulação em ponte. Com efeito, as elevadas exigências de nivelamento destas infra-estruturas eram incompatíveis com assentamentos totais importantes e sobretudo com assentamentos diferenciais intoleráveis face às especificações internacionais, recomendadas para um aeroporto de categoria 9 da ICAO - “International Civil Aviation Organization”, como é o caso do Aeroporto Internacional de Macau. Daí que, por razões de segurança e de prazo se tenha inicialmente projectado a construção dos pavimentos da pista e dos caminhos de circulação sobre estacas moldadas de grande diâmetro (1,90 a 2,00 metros) as quais por sua vez descarregariam directamente sobre o granito são.

## 2 - REVISÃO DO PROJECTO DE FUNDAÇÕES DA PISTA E CAMINHOS DE CIRCULAÇÃO

### 2.1 - Razões para a revisão

Em fins de 1991 foi decidido promover a revisão do projecto de fundações dos pavimentos da pista e dos caminhos de circulação na ilha artificial, que nessa data se previa serem executadas em estacas moldadas de grande diâmetro (1,9 a 2,0m ) assentes a cerca de 80m de profundidade, directamente sobre o granito são.

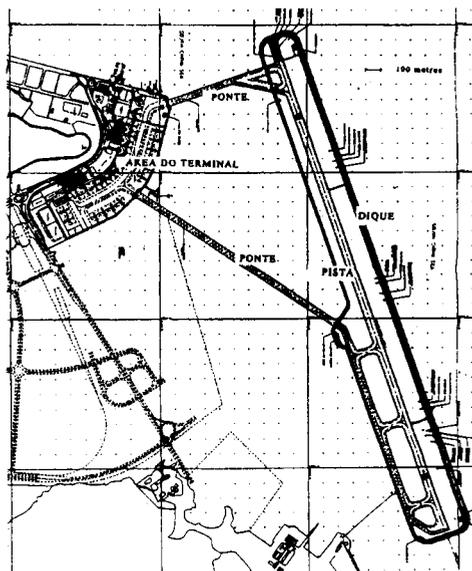


Fig. 3 - Planta geral das instalações do Aeroporto

Foram três os tipos de razões que conduziram à revisão do projecto das fundações da pista e dos caminhos de circulação:

- Razões técnicas - relacionadas com dificuldades em trabalhar com uma solução que exigia especificações de execução ao nível das tecnologias de ponta, ao alcance de apenas um reduzido número de empreiteiros internacionais.

- Razões económicas - relacionadas com os riscos inerentes a uma solução inovadora para uma obra de grandes dimensões exigindo meios materiais e humanos muito onerosos. Cumulativamente existia a dúvida sobre como atravessar a zona entre os 3000 e os 3200 metros correspondente à caixa de falha acima referida, sendo certo que não seria possível estender a essa zona o mesmo tipo de fundação.

- Razões financeiras - relacionadas com a indisponibilidade dos bancos para financiar um projecto cujas soluções técnicas não eram recomendadas pelos seus consultores, como consequência das razões técnicas e económicas acima referidas.

O acréscimo de custos e os atrasos verificados na nova ponte Macau-Taipa, onde algumas estacas do mesmo tipo foram usadas, davam credibilidade aos receios apontados. A nível internacional, os problemas surgidos no túnel sob a Mancha, estavam presentes no espírito dos consultores financeiros, o que desencorajava a incorrer em riscos desnecessários, em projectos desta natureza.

As dificuldades técnicas e financeiras experimentadas pelo Aeroporto de Kansai, em Osaka, também "offshore" como o de Macau, eram também referidas e temidas.

Por todas estas razões, o problema das fundações da pista e dos caminhos de circulação do Aeroporto de Macau, mantinha-se um assunto em discussão, e sem solução à vista, o que bloqueava o avanço do empreendimento.

## 2.2 - As soluções técnicas alternativas

Face a esta situação considerou-se necessário estudar soluções técnicas alternativas, que fossem aceites pelos bancos a fim de que pudesse ser viabilizada a execução do empreendimento.

A alternativa mais razoável parecia ser a construção de uma fundação em aterro, dado ser uma técnica bem conhecida, e existirem na região, a tecnologia e os meios materiais e humanos capazes de levar por diante a execução do empreendimento com sucesso. Acontecia porém que esta solução já tinha sido anteriormente considerada e abandonada, porque os respectivos estudos conduzidos por consultores do dono da obra desaconselhavam tal solução.

Com efeito, com base nesses estudos, a solução das fundações em aterro tinha contra si dois grandes argumentos:

- O cumprimento dos prazos do empreendimento, bastante curto por razões de natureza social e política, seria incompatível com o período de tempo necessário para obter uma consolidação adequada do aterro, e, muito especialmente obter uma redução dos assentamentos diferenciais para níveis que permitissem a manutenção dos pavimentos dentro dos parâmetros operacionais exigíveis a um aeroporto com a categoria 9 da ICAO, conforme já foi referido.

- O volume da obra, nomeadamente o volume de dragagens (20 milhões de m<sup>3</sup>), o volume de areias necessárias para o aterro (36 milhões de m<sup>3</sup>) e a extensão de drenos verticais (mais de 8000km), eram muito elevados e por consequência difíceis de executar no período de 48 meses inicialmente programado para a obra.

Estes dois problemas foram retomados e estudados e foi demonstrado como poderiam ser resolvidos.

A presente nota apresenta os estudos que conduziram à solução do primeiro problema, ou seja dos assentamentos previstos e dos tratamentos necessários para compatibilizar esses assentamentos com os prazos impostos para a obra. Em nota separada será apresentado o modo como foi resolvido o segundo problema, ou seja, a preparação e organização do trabalho que permitiu o desmonte, movimentação e a deposição de tão grandes volumes de materiais em tão curto espaço de tempo.

## 3 - FUNDAÇÃO DOS PAVIMENTOS DA PISTA E DOS CAMINHOS DE CIRCULAÇÃO, EM ATERRO

### 3.1 - Estudo dos assentamentos

Os assentamentos previsíveis, no ambiente geológico apresentado, foram estudados recorrendo às teorias clássicas de cálculo dos assentamentos. O sumário dessa teoria é apresentado no anexo A.

Com base nos dados sísmicos e geológicos e nos parâmetros geomecânicos medidos e/ou estimados foram calculados, em função do tempo, os perfis de assentamento, na vertical de um furo tipo e, os perfis de consolidação total, ao longo do eixo da pista, ao longo da zona de segurança e segundo perfis transversais à ilha artificial. Para o efeito foram usados dados colhidos em sondagens nas quais se recolheram testemunhos para a execução de estudos e ensaios dos materiais das formações.

Os resultados desses estudos foram usados no projecto de tratamento das formações e correspondente cálculo dos assentamentos. À hipótese de base da figura seguinte corresponde o assentamento provável compatível com as especificações e os prazos fixados. Além desta

curva são apresentadas mais duas curvas de máximo e mínimo correspondentes a valores que à data desses estudos se estimou poderem representar as situações mais pessimista (sem tratamentos) e mais optimista (tratamento intensivo).

Destes estudos de previsão e do tempo requerido para os assentamentos concluiu-se que a execução de um aterro directamente sobre as formações existentes exigiria tempos de consolidação muito longos, não dando por conseguinte garantias de cumprimento dos prazos. Consequentemente foram estudados os processos de tratamento do aterro e das formações subjacentes e elaborados os respectivos projectos de execução. Com os mesmos pretendeu-se encurtar esses prazos e, tanto quanto possível, e por essa via de tratamento, controlar os assentamentos totais e diferenciais e geri-los.

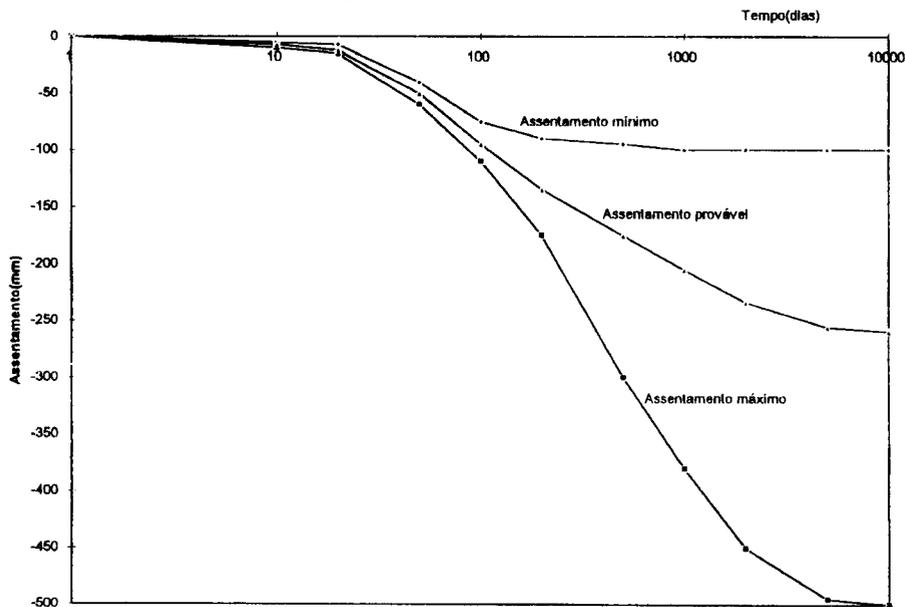


Fig. 4 - Assentamentos previstos num furo tipo (Bs 23)

### 3.2 - Estudo e tratamento do aterro e das formações subjacentes

Os estudos de tratamento do aterro e das formações subjacentes foram de natureza numérica e abordaram sequencialmente os seguintes processos:

- a) a dragagem dos lodos e formações incoerentes;
- b) o uso de areia calibrada para o enchimento dos volumes dragados;
- c) a instalação de drenos verticais;
- d) a criação temporária de uma sobrecarga; e,
- e) o uso da vibrocompactação dos volumes aterrados.

### 3.3 - Metodologia do tratamento das fundações

Dos resultados dos estudos sobre os assentamentos, concluiu-se que, de entre as alternativas de tratamento possível, aquela que optimizaria os resultados, seria constituída no essencial pelas operações que a seguir se apresentam:

- dragagem de todos os lodos em toda a área da ilha artificial até à cota de -5m;
- dragagem de todos os sedimentos menos consolidados, com SPT <10, (correspondendo grosseiramente às formações superficiais tipo "marine mud"), por debaixo das áreas de implantação da pista e dos caminhos de circulação na ilha artificial ( entre -5m e -20 a -30m);

- enchimento de todo o volume dragado com areia calibrada, sucessivamente por aterro mecânico (barcaças com descarga de fundo e barcaças com descarga frontal) seguido de aterro hidráulico até à cota de +3.5m;

- instalação de drenos verticais, espaçados de 1,5 a 2,0m até à profundidade de penetração da lança (-30 a -42m), o que sucedia com frequência nas argilas superiores do “alluvium”;

- continuação do aterro hidráulico até à cota de sobrecarga (+12 a +14m);

- compactação por vibroflutuação até à base do aterro;

- manutenção da sobrecarga, durante 2 a 4 meses, de modo a absorver 90 a 95 % da consolidação primária;

- remoção da sobrecarga até à cota de projecto da sub base da pista (7 m);

- construção do pavimento.

A metodologia de execução acima referida foi verificada por vários consultores alguns dos quais confirmaram a sua exequibilidade.

O projecto destas fundações obedeceu a critérios de estabilidade do aterro de modo a evitar movimentos rotacionais das formações adjacentes e evitar a criação de bolsas de materiais argilosos em zonas de acumulação preferenciais.

### 3.4 - Assentamentos previstos, sobrecargas e tempos

Conforme foi referido nos pontos anteriores, a previsão dos assentamentos foi fundamental para a decisão sobre a natureza das fundações da pista e dos caminhos de circulação. A magnitude dos assentamentos totais previstos durante e após a construção é apresentada na tabela seguinte.

Tabela 1 - Valores calculados para os assentamentos médios previstos

Tipo de obra	Assentamento total (inicial) (mm)	Assentamento residual (após a construção)	
		Só consolidação primária (mm)	Incluindo consolid. secundária (mm)
Pista	800 - 2000	0 - 100	70 - 200
Caminhos de circulação	600 - 1500	0 - 150	50 - 250
Áreas de segurança	1200 - 4000	200 - 550	-
Diques de protecção	400 - 1200	100 - 700	-

Tendo em consideração estes assentamentos previstos e a sua evolução em função do tempo foram calculadas as sobrecargas.

As sobrecargas calculadas para dar satisfação às exigências de prazo do empreendimento variaram de área para área em função da espessura do aterro e da composição das formações subjacentes. A altura dessas sobrecargas foi genericamente da ordem dos 5 metros a Norte até 7 metros a Sul. Estes valores foram contados acima da cota onde assenta a sub-base do pavimento da pista cujo valor de projecto é de +7 metros.

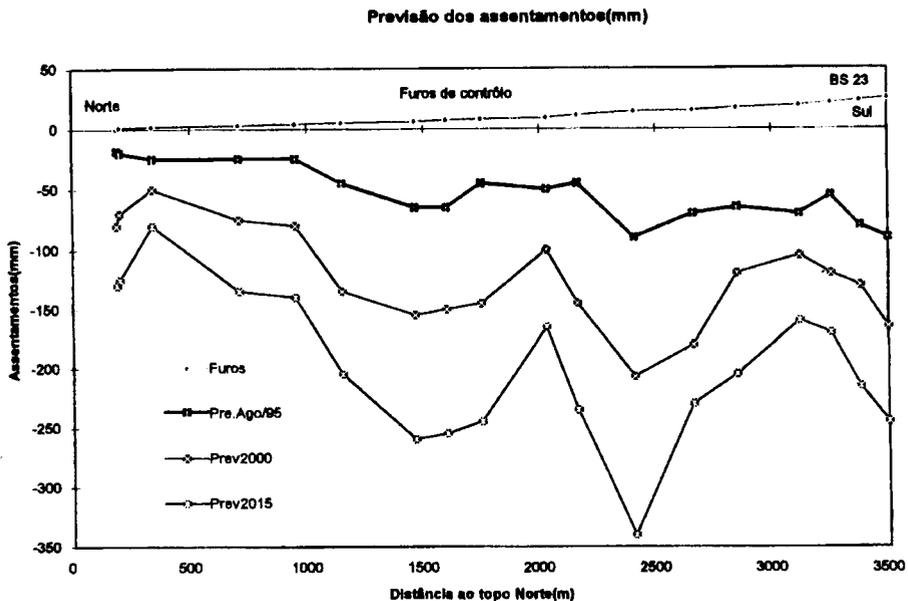


Fig. 5 - Assentamentos previstos ao longo do eixo da pista

Foi ainda prestada especial atenção aos gradientes longitudinais previsíveis em função do tempo. O Anexo 14 da ICAO recomenda um gradiente longitudinal máximo de 1/3000. Quando, ao longo da vida da pista se projectarem valores superiores aos aí definidos será necessário programar os consequentes trabalhos de reperfilamento da pista. Como pode ser visto na figura seguinte, tal não se prevê ser necessário até ao ano 2015.

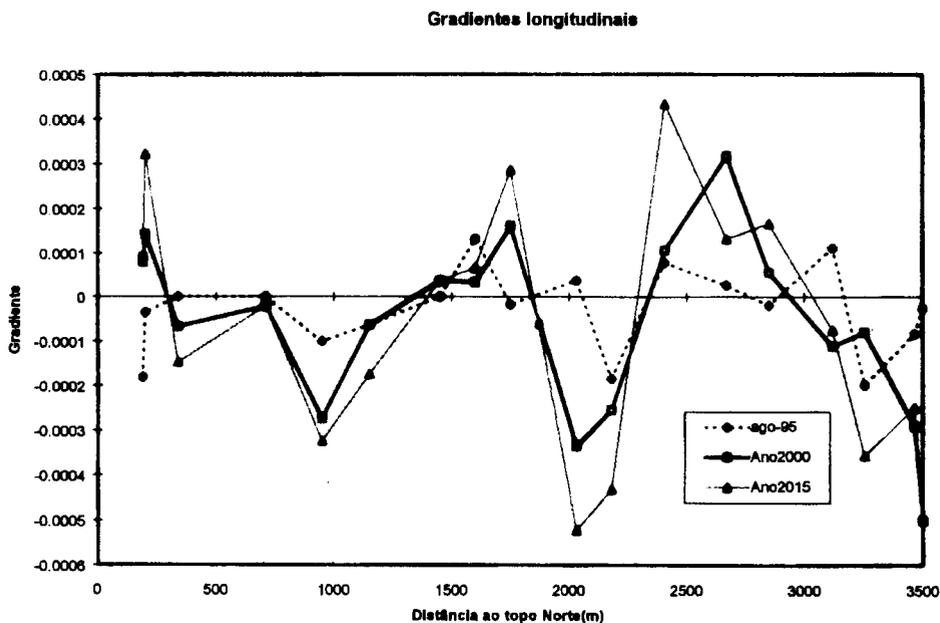


Fig. 6 - Gradientes previstos ao longo do eixo da pista

O perfil transversal à pista tem declives de projecto e construção no valor de 1,4%. Tais declives são necessários para que o escoamento da água das chuvas seja fácil e rápido, no sentido de minimizar os efeitos nocivos do “aquaplaning”. Prevê-se que os assentamentos diferenciais não acentuem muito este declive.

### 3.5 - Assentamentos dos diques e das áreas de segurança

Conforme se viu na Tabela 1 para os diques estão previstos assentamentos semelhantes aos que são esperados para a pista e caminhos de circulação. A dragagem nessa área é semelhante à que foi feita sob a pista e caminhos de circulação, deve no entanto referir-se que o enchimento de areia sob a base do dique não foi compactado nem atravessado por drenos verticais.

As áreas de segurança foram dragadas até - 5m, conforme já referido, e a formação “marine mud” foi completamente atravessada por drenos verticais. Por este facto prevêem-se nas áreas de segurança assentamentos importantes e um tempo de consolidação mais longo. Tais assentamentos poderão ter efeitos mais ou menos importantes sobre as bermas da pista.

### 3.6 - Monitorização dos assentamentos

No sentido de conhecer e controlar os assentamentos foi montada uma extensa e complexa rede de equipamentos de monitorização.

O trabalho de monitorização iniciou-se durante a fase de construção com a finalidade de verificar a estabilidade das obras e os assentamentos iniciais. O esforço de monitorização foi redobrado e concentrado na medição dos assentamentos ao longo da pista e caminhos de circulação por estes serem considerados cruciais para o êxito do aeroporto. Estes assentamentos assim como os que ocorrem nas áreas de segurança têm estado a ser registados periodicamente por meio de instrumentação adequada. Para o efeito têm sido usadas placas de assentamento metálicas de 1 m<sup>2</sup> de base, ligadas à superfície por um tubo vertical exibindo uma marca de referência para medida dos assentamentos. Para a monitorização dos diques foram construídos provisoriamente blocos de betão, substituídos posteriormente por pontos de referência (marcas) fixados no próprio maciço dos diques.

Equipamentos especiais de monitorização foram colocados em áreas críticas onde era requerida uma observação mais completa. Nestas áreas além das placas de assentamento foram também colocadas placas de assentamento diferenciais, piezómetros e inclinómetros. As placas de assentamento diferenciais são do tipo anel magnético com tubo interior por onde se desce um torpedo para medição dos assentamentos das diferentes camadas, até um máximo de oito níveis. Os piezómetros são do tipo pneumático e destinam-se a medir as pressões de poro nas argilas do “alluvium”, e também, nas zonas não dragadas da formação “marine mud”, assim como no material de aterro sob a pista e caminhos de circulação. Os inclinómetros são tubulares do tipo convencional.

O número de instrumentos, suas características, localizações e espaçamentos estão indicados na tabela seguinte.

Tabela 2 – Instrumentos e suas características

Localização	Instrumentos e espaçamento	Nº
Diques	2 blocos de assentamento cada 100m, durante a construção, substituídos por,	150
	- 1 marca de superfície por cada 100m, após a construção,	75
	- 6 inclinómetros junto à parede do dique em pontos previamente determinados.	6
Pista e caminhos de circulação	placas de assentamento, cada 100 m, ao longo do eixo da pista ,	92
	3 marcas de superfície, por cada 40 m de pavimento,	400
	3 marcas de superfície, por cada 200 m, ao longo das bermas.	78
Áreas de segurança	placas de assentamento, cada 200 m, ao longo da ilha artificial.	45

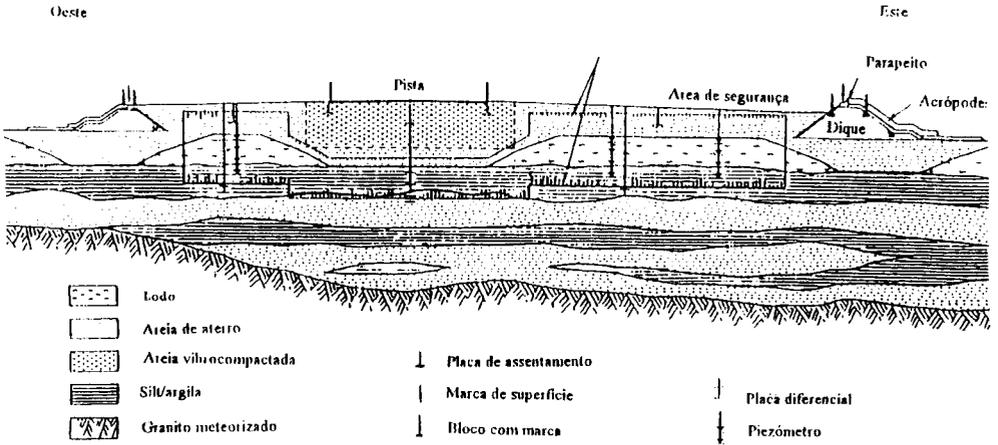


Fig. 7 - Localização dos diferentes equipamentos de monitorização dos assentamentos numa secção transversal típica

#### 4 - ASSENTAMENTOS MEDIDOS ATÉ À PRESENTE DATA

Os assentamentos verificados até à presente data (Abril de 1996) através da rede de instrumentação já referida, estão sumariamente indicados na Fig. 8.

Com base nos valores dos assentamentos medidos calcularam-se os gradientes longitudinais por estes serem os parâmetros mais relevantes para a actividade aeroportuária.

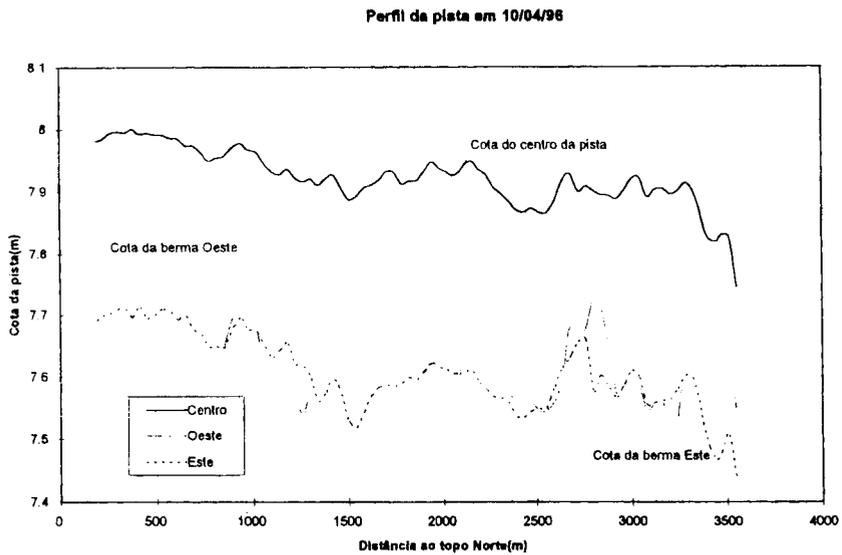


Fig. 8 - Perfil da pista elaborado com base nos assentamentos medidos nos pontos de observação (Br1 a Br23)

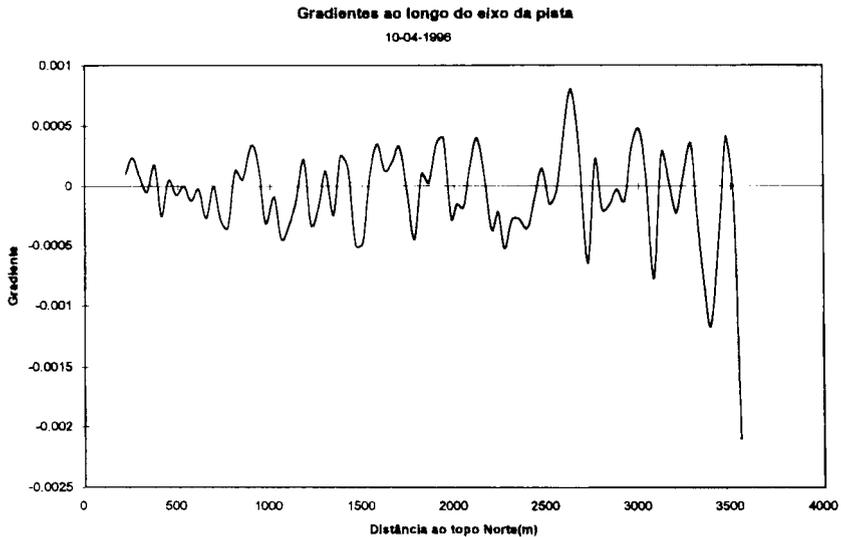


Fig. 9 - Gradientes ao longo da pista

## 5 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE PREVISÃO E OS RESULTADOS DA MONITORIZAÇÃO

Uma comparação entre os assentamentos previstos e os assentamentos medidos numa mesma data mostra uma boa correlação. Os assentamentos verificados são genericamente inferiores aos que foram previstos, o que significa que o projecto é conservador. Em termos específicos assinalar-se-ão as seguintes discrepâncias:

a) Na comparação referente a Março de 1995 existe uma quase coincidência entre valores previstos e medidos na proximidade das cabeceiras Norte e Sul, tal já não acontecendo na parte central da pista. Tal diferença deve-se provavelmente ao facto de a parte central, por razões de programação, ter sido construída muito depois da zona das cabeceiras.

b) Em Agosto de 1995, o efeito devido à diferença de tempo total de consolidação a que as duas partes, cabeceiras e parte central, foram sujeitas, começa a ter menos importância e os perfis de assentamento previsto e medido aproximam-se bastante melhor, uns dos outros, ao longo de toda a pista;

c) Os 100 metros da extremidade Sul revelam um assentamento elevado, mesmo superior ao previsto. Tal deve-se ao facto de a "marine mud" não ter sido dragada junto ao dique, por razões de programação.

Os dados registados no mês de Abril de 1996 confirmam a tendência já registada em Agosto de 1995. Consequentemente é de prever que a tendência de longo prazo apresentado nas previsões se mantenha.

Os dados de Abril de 1996 mostram ainda que a pista está inclinada para Sul no valor de cerca 3mm/100m e que o maior declive pontualmente observado é de cerca de 6/10000 (com excepção do topo Sul acima referido).

## 6 - PREVISÃO DO COMPORTAMENTO FUTURO DA PISTA

Com base nos resultados da monitorização e tendo em consideração os dados geológicos obtidos nas sondagens de controlo foram revistas as previsões anteriormente feitas para os próximos 20 anos.

As revisões não alteram muito as previsões anteriormente feitas e indicam que no ano 2015 a pista continuará inclinada para Sul no valor da ordem de 3mm/100m, referido no ponto anterior. O maior declive pontualmente observado poderá ser superior a 6/10000, mantendo-se no entanto dentro das apertadas especificações da ICAO.

Nos estudos iniciais mais pessimistas previa-se a possibilidade de uma repavimentação ao fim de cinco anos, ou seja, em 2000 e outra ao fim de 15 anos, ou seja, em 2015. Os resultados da monitorização indicam que tais repavimentações não deverão ser necessárias.

Mas se em termos de perfil longitudinal a situação é confortável o mesmo não se passa em termos de perfil transversal. A inclinação transversal de projecto foi de 1,4% a fim de facilitar uma rápida drenagem das águas pluviais e de limitar ao mínimo o risco de “aquaplanagem”. Os dados mais recentes indicam uma tendência da berma Este para ultrapassar o valor de 1,5%, situação que a agravar-se poderá exigir medidas correctivas por volta do ano 2000. Tais resultados são entre outros factores consequência dos assentamentos tardios das zonas de segurança e do efeito da inclinação do “bed rock” para Este.

Os resultados da monitorização virão confirmar ou não a necessidade dessas correcções e a data provável da sua ocorrência.

## 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A construção do Aeroporto Internacional de Macau no curto espaço de tempo de 48 meses foi um imperativo de ordem política e social.

O progresso das obras esteve bloqueado por razões de ordem técnica, económica e financeira, devido á opção previamente tomada de construir, em estacas, as fundações para o pavimento da pista e caminhos de circulação na ilha artificial.

Esta solução tinha criado uma situação de impasse, pelo que se decidiu rever o projecto e estudar alternativas possíveis para a saída da situação criada.

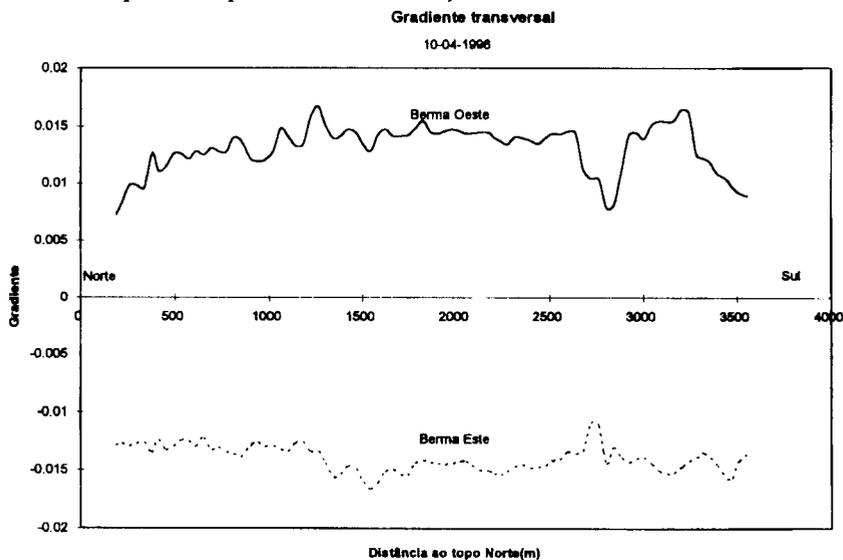


Fig.10 - Gradientes transversais calculados com base nos resultados de monitorização

A nova solução encontrada consistiu na construção de uma fundação em aterro tratado de modo a dar resposta às exigências de qualidade e de prazo. Com efeito através dos estudos executados foi demonstrado que os assentamentos poderiam ser reduzidos mediante a remoção dos materiais inconsistentes ( $SPT < 10$ ) e que a compactação poderia ser acelerada mediante tratamentos adequados dos materiais do aterro e das formações subjacentes.

Para os cálculos efectuados foram usadas as equações existentes na teoria clássica sobre assentamentos e compactações. Usaram-se igualmente métodos clássicos de tratamento das fundações e de aceleração dos assentamentos com o recurso à instalação de drenos verticais e à formação de sobrecarga acima da cota final do projecto. Pela primeira vez, em Macau, foi usada extensamente a vibroflutuação para lavagem e compactação das areias do aterro.

Os resultados dos estudos feitos mostraram que a pista e os caminhos de circulação manteriam por longo tempo as especificações operacionais recomendadas pela ICAO (Anexo 14) pelo que as decisões daí resultantes foram determinantes para o êxito da execução do empreendimento.

A monitorização tem estado a fornecer os dados necessários para acompanhar o evoluir da situação e programar as correcções que vierem a revelar-se necessárias.

De momento e de acordo com os dados já obtidos é possível constatar que todas as obras se estão a comportar de acordo com as previsões feitas. Não será demasiado insistir na necessidade de manter em funcionamento o apertado esquema de monitorização programado a fim de que seja detectável a tempo a necessidade de qualquer reperfilamento ou de qualquer outra reparação do pavimento. Refere-se aqui a possibilidade de ser necessário, a médio prazo, proceder-se a uma correcção do perfil transversal em algumas zonas que se afastem demasiado das especificações.

## BIBLIOGRAFIA

- AEROPORTO INTERNACIONAL DE MACAU - *Projectos e Relatórios de Obra*. Documentos de trabalho não publicados. Macau, 1989-1992.
- MACAU INTERNATIONAL AIRPORT - *Ground monitoring reports*. Documentos de trabalho não publicados. CHEC e SPP. Macau, 1994-1996.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - *International Standards and recommended practices: Aerodromes - Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation*. Vol. I, Aerodrome design and operations, 1990.
- BOWLES, J.E. - *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. Second edition. McGraw-Hill, Inc. International Edition, 1984.
- MESRI G. e GODLEVSKI P.M. - *Time and stress-compressibility inter-relationship*. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, May 1977, N.º SM1, 417-430, 1977.
- SILVAREM B. e SWAMEE A. - *A computational method for consolidation coefficient*. Soils and Foundations, Vol 17, N.º 2, 19-135, 1977.
- MESRI G. - *Coefficient of Secondary Compression*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.99, N.º SM1, 122-137, 1973.
- TERZAGHI K. e PECK R.B. - *Soil mechanics in engineering practice*. Second edition. Wiley, New York, 1967.

## ANEXO A

### LEIS E EQUAÇÕES QUE GOVERNAM OS ASSENTAMENTOS

#### A.1 Teoria

Da teoria clássica da consolidação tira-se que

$$S = L \times m_v \times p \times U \times H$$

em que

$S$  é o assentamento total no instante  $t$ ,

$L$  é um factor de correcção, que incorpora vários efeitos,

$m_v$  é o coeficiente de compressibilidade volumétrica,

$p$  representa o incremento de pressão,

$U$  representa o grau de consolidação no momento  $t$ ,

$H$  representa a espessura de formações em fase de consolidação.

No estudo efectuado foi utilizada a pressão  $p$  exercida ao nível considerado, devida ao peso da coluna de materiais subjacentes. Foram usados os valores  $m_v$  de compressibilidade volumétrica obtidos no laboratório corrigidos para as condições de campo, por intermédio do factor  $L$ .

Tabela A.1 - Propriedades médias dos solos

Propriedades			“Marine mud”	“Aluvium clay”
Teor de humidade	$m$	%	65 - 75	30 - 45
Massa volúmica	$\gamma$	t/m <sup>3</sup>	1,55 - 1,65	1,75 - 1,90
Limite de liquidez	$LL$	%	60 - 75	60 - 65
Limite de plasticidade	$PL$	%	30 - 35	30 - 35
Índice de vazios	$e_o$		1,8 - 2,0	0,9 - 1,2
Índice de compressão	$Cc$		0,6 - 0,7	0,3 - 0,45
Coef. de compress. vol.	$m_v$	m <sup>2</sup> /MN	0,7 - 0,9	0,2 - 0,4
Coef. de consolid. vert.	$C_v$	m <sup>2</sup> /ano	1,8 - 2,6	6,0 - 10
Coef. de consolid. horiz.	$Ch$	m <sup>2</sup> /ano	1,6 - 2,4	6,0 - 10
Tensão de corte	$s$	kPa	4,0 - 18	20 - 40

#### A.2 Uso dos drenos verticais

Para o estudo do efeito do uso dos drenos verticais na redução do tempo de consolidação utilizou-se a equação que relaciona o grau de consolidação,  $U$ , com o factor tempo,  $T_v$ .

O grau de consolidação,  $U$ , conforme proposto por Terzaghi (1936) é dado pelas fórmulas seguintes:

$$U = 2 \times \sqrt{T_v / \pi} \quad \text{para } U < 0,6$$

$$U = 1 - 0,811 / 11,79^{T_v} \quad \text{para } U > 0,6$$

Uma vez que o uso destas fórmulas torna o cálculo algo complicado preferiu-se usar antes a fórmula proposta por Sivarem e Swamee (1977), a qual substitui com vantagens as duas anteriores, no seu domínio de aplicação.

Esta fórmula é:

$$U = (4 \times T_v / \pi)^{0,5} / (1 + (4 \times T_v / \pi)^{2,8})^{0,179}$$

O factor tempo é dado por,

$$T_v = C_v \times t / d^2$$

em que

$t$  é o tempo desde o início da aplicação da pressão  $p$ ,  
 $C_v$  é o coeficiente de consolidação,  
 $d$  é a distância de drenagem.

No caso da existência de drenos verticais, esta solução clássica, assume uma forma semelhante á anterior, ou seja,

$$T_h = C_h \times t / \delta^2$$

$T_h$  é o factor tempo equivalente ao factor  $T_v$  considerado no caso de não existirem drenos verticais;

$C_h$  é o coeficiente de compressibilidade no caso do escoamento de água ser horizontal,

$\delta$  é o diâmetro equivalente para a malha de drenos projectada:

-para uma malha quadrada  $\delta = 1,13 \times$  espaçamento entre drenos,

-para uma malha triangular  $\delta = 1,05 \times$  espaçamento entre drenos.

Foram estudados espaçamentos entre drenos de 1,5, 2,0 e 3 metros.

Ainda de acordo com a teoria clássica foram usadas as relações entre  $U$  e  $T_h$  seguintes:

$$U = 1 - (1/e^{8T_h/\mu})$$

sendo

$$\mu = (n^2/n^2 - 1) \times (\ln n - 0,75 + (1/n^2) \times (1 - 1/4n^2))$$

em que

$$n = \delta / \partial$$

$\partial$  é o diâmetro efectivo do dreno

A presença de drenos verticais acelera a drenagem vertical existente, em condições naturais, produzindo a consolidação efectiva,  $U_f$

$$U_f = U_h + U_v - U_h U_v \quad (\text{seg. Carrillo})$$

### A.3 Uso de sobrecarga

Os assentamentos e consequentes consolidações apresentados nos pontos anteriores admitem que a carga sobre o aterro e formações subjacentes se mantém ao longo do tempo. O uso de sobrecarga corresponde na prática a executar um aterro temporário acima da cota de projecto, ou seja, durante o período de sobrecarga. Durante esse período o ritmo de consolidação sofre uma aceleração proporcional à sobrecarga. Ao atingir-se uma taxa de consolidação programada compatível com as operações posteriores e o objectivo final, a sobrecarga é removida para a cota final de projecto.

Nos cálculos efectuados usou-se a técnica de sobreposição dos efeitos de modo a simular o andamento dos assentamentos até se obterem as combinações requeridas para o cumprimento dos prazos programados.

Os tempos necessários para se atingir uma mesma taxa de consolidação foram assim obtidos do seguinte modo:

Consolidação,  $U_p$ , com a carga de projecto,  $p$ ,

$$U_p = Dp/p$$

sendo

$Dp$  - a pressão dissipada durante o tempo  $t_p$ ,

$p$  - a pressão devida à carga aplicada à cota de projecto.

se em vez de  $p$  a carga aplicada for  $s$

$$U_s = Dp/s$$

$$U_s = U_p \times p/s \quad \text{ou} \quad U_s/U_p = p/s$$

Relacionando  $U_p$  e  $U_s$  com os respectivos factores tempo, obtiveram-se  $t_p$  e  $t_s$  e as relações entre ambos. Sabendo que se dispunha de 4 a 6 meses para a sobrecarga e que era necessário obter uma consolidação variando entre 93 e 95%, determinou-se o valor de  $s$  e

consequentemente a altura da sobrecarga a aplicar em cada zona relevante da obra. O tempo ganho foi de  $\Delta t$  e foi decidido em função das necessidades de programação.

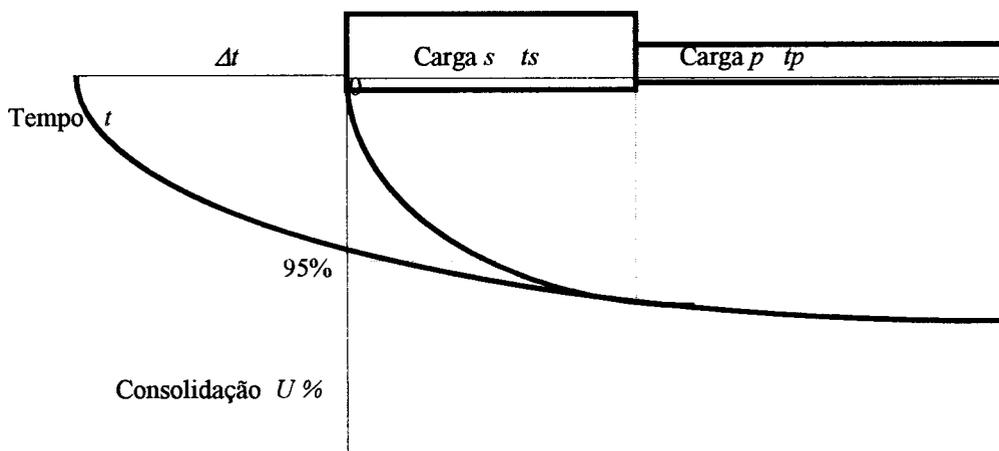


Fig. A1 - Tempo de compactação reduzido devido ao efeito da sobrecarga

#### A.4 Uso da areia calibrada e da vibrocompactação

O uso da areia calibrada e da vibrocompactação como meios de tratamento do aterro foram considerados como complementares dos anteriores e o seu efeito não foi calculado nesta estimativa inicial do comportamento dos aterros em termos de assentamentos. Tal cálculo foi feito posteriormente e será objecto de tratamento oportuno.