



RAR - REFINARIAS DE AÇÚCAR REUNIDAS, S.A.
Porto, PORTUGAL

REUTILIZAÇÃO DE LAMAS DE CARBONATAÇÃO NO PROCESSO DE REFINAÇÃO DO AÇÚCAR

Relatório PRODEP

Jaime Alexandre da Silva Rodrigues

66(047.3)
LEQ 1999
RODj

Porto, Junho de 2000





RAR - REFINARIAS DE AÇÚCAR REUNIDAS, S.A.
Lisboa PORTUGAL

REUTILIZAÇÃO DE LAMAS DE CARBONATAÇÃO NO PROCESSO DE REFINAÇÃO DO AÇÚCAR

Relatório PRODEP

Jaime Alexandre da Silva Rodrigues

66(047.3)/LEQ 1999/R00j

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca	
Nº	88304
CDU	
Data	20 / 4 / 2007

Porto, Junho de 2000

AGRADECIMENTOS

Ao longo deste estágio, foram muitas as pessoas que me ajudaram e apoiaram: quer na realização do meu trabalho, quer na minha integração na empresa. De entre todas, seria injusto não realçar as que mais de perto me acompanharam, e sem as quais a minha tarefa teria sido bem mais difícil.

Deixo então aqui, um agradecimento especial à Eng^a Amélia Ferraz, ao Eng^o Luís Bento, ao Eng^o Fernando Rocha, ao Eng^o José chorão e ao Eng^o João Barreto.

Para eles, muito obrigado!

SUMÁRIO

Este relatório, está estruturado de forma a começar por familiarizar o leitor com a empresa e o seu processo de refinação de açúcar, por forma a tornar mais fácil a compreensão do trabalho realizado.

Numa segunda parte, serão descritas as actividades desenvolvidas no decorrer do estágio: incineração das lamas de carbonatação e ensaios de carbonatação.

ÍNDICE

1 - RAR -Refinarias de Açúcar Reunidas, S.A.	1
1.1 - A Empresa	1
1.2 - O Processo de Refinação do Açúcar	3
2 - Incineração das Lamas de Carbonatação	7
2.1 - A Instalação Piloto	7
2.2 - Ensaios de Incineração	11
2.3 - Ensaios de Incineração, Resultados Obtidos	14
3 – Carbonatações, Determinação da Capacidade de Descoloração das Lamas	66
4 - Conclusões	70
Anexo I	71
Anexo II	77
Anexo III	79
Anexo IV	81

1. RAR – Refinarias de Açúcar Reunidas, S.A.

1.1. A Empresa

Em 1962 nove pequenas refinarias do Norte de Portugal fundiram-se numa nova empresa denominada RAR – Refinarias de Açúcar Reunidas. Esta empresa construiu uma nova refinaria que iniciou a sua actividade em 1967, com uma capacidade de 75 ton/dia.

A produção consistia principalmente de açúcares branco e amarelo areados e açúcar normal branco. Nessa altura o processo era constituído pelas etapas de Afinação, de Descoloração com carvão activado e filtração com auxiliares de filtração, em filtros de vela. Licor fino era cristalizado para açúcar branco. Açúcar branco de grão fino era comercializado como açúcar areado branco. Os xaropes de afinação e refinação eram usados para produzir açúcar areado amarelo. Este açúcar era produzido através de uma cozedura normal com um grão fino e a separação era feita em centrífugas contínuas.

Este processo simples de refinação foi alterado nos anos setenta, tendo-se instalado novas etapas, de Carbonatação, Sulfitação e Recuperação, aumentando a capacidade para 300 ton/dia. Os processos de produção de açúcares areados foram alterados para o método tradicional português usando tachos de vácuo e agitadores de vácuo, denominados Areadores. A cozedura era feita em tachos de vácuo de calandria, constituindo este facto uma inovação, já que os tachos de vácuo tradicionais usavam serpentinas de vapor para aquecimento.

A meio dos anos setenta a RAR mudou a Sulfitação para resinas de permuta iónica, tornando-se uma das primeiras refinarias Europeias a implantar este sistema para a descoloração principal.

Nos anos oitenta a RAR instalou uma estação de Evaporação, tendo ajustado um sistema de Co-geração nos anos noventa. Desde o seu arranque, a capacidade da fábrica foi aumentando gradualmente até às actuais 500 ton/dia de açúcar branco. Actualmente o processo de refinação da RAR consiste nas etapas constantes da figura 1.

1.2. O Processo de Refinação do Açúcar

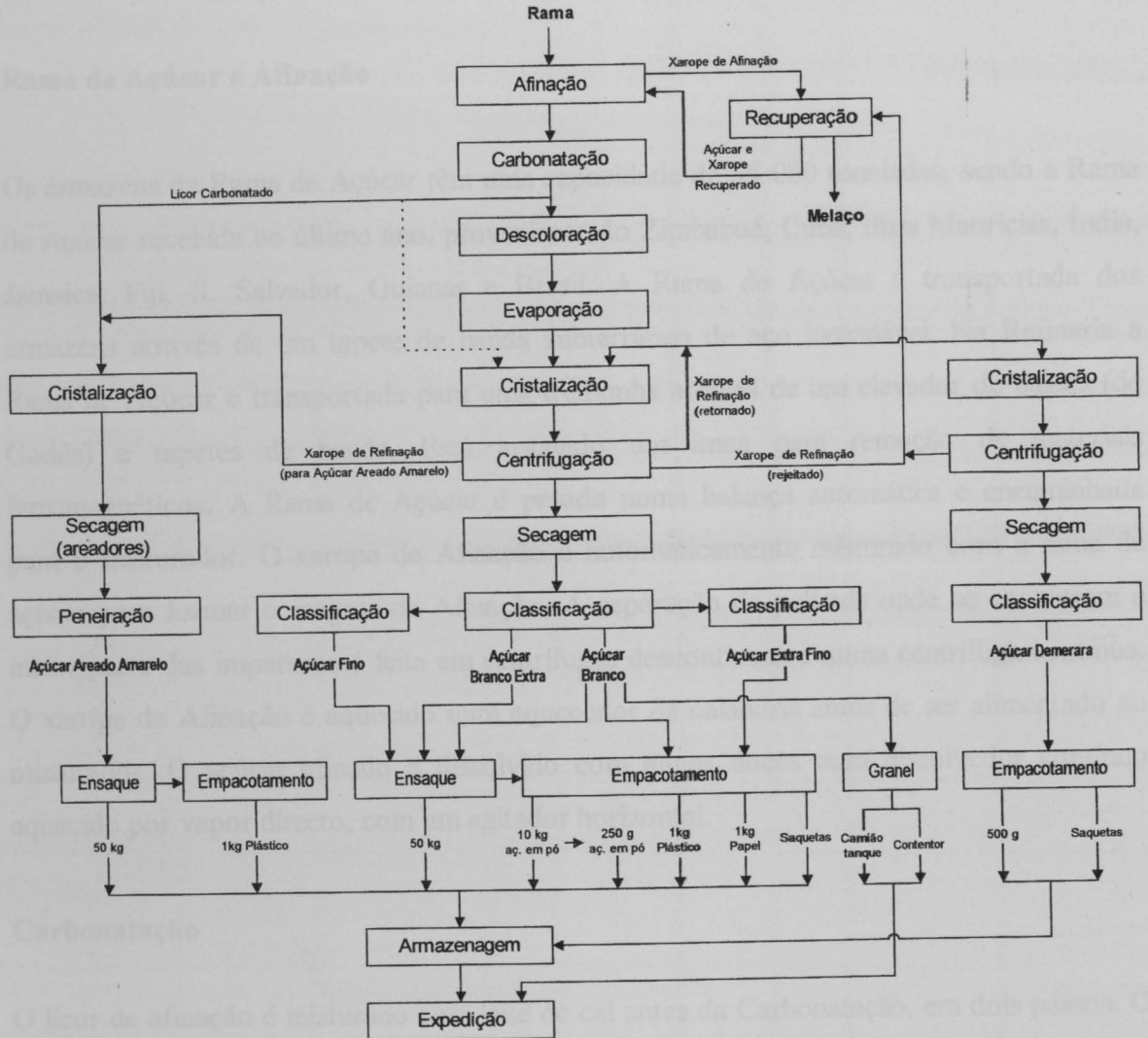


Figura 1 – Esquema do Processo de Refinação actual da RAR

As instalações da RAR ocupam uma área de 55 000 m², sendo constituídas pela Refinaria, à qual está ligada a Casa das Caldeiras, pela Embalagem, pelos Armazéns de Açúcar Branco e Rama de Açúcar e pelas Oficinas Mecânica e Eléctrica. Para além destes edificios existem ainda os Edifícios da Administração e serviços, tais como Contabilidade, Comercial, Pessoal e Cantina. Existem três laboratórios na RAR: o Laboratório de Controlo do Processo (LCP), O Laboratório de Controlo de Qualidade (LQ) e o Laboratório de Microbiologia (LM). Desde 1973 que existe um Departamento de Investigação, DID, onde são efectuados estudos da tecnologia do processo de refinação.

1.2. O Processo de Refinação do Açúcar

Rama de Açúcar e Afinação

Os armazéns de Rama de Açúcar têm uma capacidade de 35 000 toneladas, sendo a Rama de Açúcar recebida no último ano, proveniente do Zimbabué, Cuba, Ilhas Maurícias, Índia, Jamaica, Fiji, S. Salvador, Guianas e Brasil. A Rama de Açúcar é transportada dos armazéns através de um tapete de banda subterrâneo de aço inoxidável. Na Refinaria a Rama de Açúcar é transportada para uma tremonha através de um elevador de baldes (de Godés) e tapetes de banda. Está instalado um íman para remoção de materiais ferromagnéticos. A Rama de Açúcar é pesada numa balança automática e encaminhada para o misturador. O xarope de Afinação é automaticamente misturado com a rama de açúcar para formar o magma de Afinação. A separação da película onde se encontram a maior parte das impurezas é feita em centrífugas descontínuas e numa centrífuga contínua. O xarope de Afinação é aquecido num aquecedor de calandria antes de ser alimentado ao misturador. O açúcar afinado é dissolvido com águas doces num dissolvedor contínuo aquecido por vapor directo, com um agitador horizontal.

Carbonatação

O licor de afinação é misturado com leite de cal antes da Carbonatação, em dois passos. O primeiro passo é efectuado em duas torres de saturação paralelas com calandrias para aquecimento. O segundo passo é realizado noutra torre de saturação. Depois da Carbonatação o licor é filtrado em cinco filtros rotativos. A seguir, é efectuada uma segunda filtração com auxiliares de filtração em dois filtros rotativos, como filtração de segurança antes das resinas. As águas de lavagem com lama são filtradas num filtro de prensa completamente automático de placas e membranas. As águas doces são retornadas para o dissolvedor da afinação.

Descoloração

O licor carbonatado é descolorado em quatro sistemas de duas colunas de resinas. A resina usada é uma resina aniónica forte poliestirénica divinilo benzénica com amónia quaternária ligada ao ião cloreto. Em cada sistema o licor flui em sentido descendente da coluna

primária, para a segunda coluna, a coluna de afinção. Depois da Descoloração o licor passa através de um filtro em linha de 60 mesh. A regeneração das resinas é feita com soluções de cloreto de sódio. O sal é recebido a granel, dissolvido e filtrado num filtro prensa, antes de ser misturado com água quente até à concentração desejada.

Evaporação

O licor final das resinas é concentrado num sistema de Evaporação de dois efeitos. No primeiro corpo o licor é aquecido por vapor em calandria. O vapor do primeiro corpo é usado para alimentar a calandria do segundo corpo. Um condensador barométrico multi-jacto produz 200 mbar no segundo corpo. Entre o condensador multi-jacto e o evaporador está ajustado um permutador de calor para aquecer a água de alimentação à Refinaria. Os vapores são condensados neste condensador e as águas doces recuperadas para o sistema de águas doces. O licor fino é concentrado de 62 ° para 72 ° Brix.

Cristalização

A RAR produz três tipos de açúcar cristalizados: açúcar branco extra, açúcar CEE nº 2 e açúcar branco normal com cores médias de 10, 35 e 45 IU, respectivamente. A Cristalização é efectuada num sistema de recirculação de xaropes (“in boiling”). Neste sistema os xaropes das cozeduras anteriores são retornados para a próxima cozedura. Os últimos xaropes são cristalizados num tacho separado e os xaropes são enviados para a estação de recuperação. O açúcar deste tacho é misturado com açúcar branco normal. O equipamento de Cristalização é constituído por três tachos de vácuo de aço inoxidável, com agitadores. As massas cozidas são descarregadas para três misturadores, antes das centrífugas de açúcar branco

Centrífugas de Açúcar Branco

A massa cozida de açúcar branco é purgada em três Centrífugas automáticas BMA G-1250. As centrífugas estão interligadas para permitirem uma descarga sequencial. Existem mais três centrífugas BMA automáticas de menor capacidade de carga para centrifugar a última cozedura de cada ciclo de cozedura, para além de servirem de máquinas de reserva. O açúcar é lavado com água de condensados quentes numa lavagem de duas etapas. O

açúcar húmido é descarregado para um tapete vibratório (gafanhoto) que alimenta o elevador e o tapete de banda antes do secador de açúcar.

Secador de Açúcar

O açúcar húmido é seco num Secador-arrefecedor tipo Rota-Louvre. Ar quente é alimentado em cocorrente com o açúcar. Ar frio é alimentado na extremidade da saída do secador e contacta com o açúcar em contracorrente. A aspiração de ar é feita a meio do Secador através de um tubo axial. O pó de açúcar é removido do ar aspirado através de um ciclone húmido. As águas doces são enviadas para o dissolvedor da afinação.

Classificação

Os finos e as troças são retirados do açúcar em classificadores Rotex de três andares. O açúcar retido nos segundo e terceiro andar é misturado como açúcar normal. Parte do açúcar do terceiro andar é desviado para produzir açúcares fino e extra-fino. Para estes açúcares é efectuada uma segunda Classificação num classificador Sweco com dois andares.

Entregas a Granel e Empacotamento

O açúcar industrial é maioritariamente vendido a Granel em camiões de 20 toneladas e em contentores de sacos flexíveis de 1 tonelada. Outra parte é vendida em sacos de 50 kg de polipropileno/polietileno. Este açúcar representa 41% da produção da RAR de açúcar branco. O açúcar doméstico (59%) é vendido em pacotes de 1 kg de polietileno e de papel. Os pacotes de papel representam 66% do total de pacotes de 1 kg. As saquetas de 8 g são vendidas em caixas de 10 kg. O “icing-sugar” é produzido por moagem do açúcar branco. Mistura-se amido no açúcar como agente anti-aglomerante.

Produção de Açúcar Amarelo

A Produção de Açúcar Amarelo representa 2,8% da produção total de açúcares. Este produto é feito por cristalização do licor carbonatado mistura de com o xarope de refinação num tacho de vácuo de calandria. Nesta cozedura os cristais formam-se por cristalização

espontânea. Depois da formação da massa cozida, o vácuo é quebrado e a temperatura é aumentada até aos 105-108 ° C. Depois, a massa cozida é descarregada para dois misturadores de vácuo horizontais, designados por areadores. Devido aos calores sensível e de cristalização, a água é evaporada e o açúcar é seco. O açúcar dos areadores é descarregado para os tapetes vibratórios (gafanhoto) com uma corrente de ar frio. O açúcar é simultaneamente seco e arrefecido até uma humidade final de 2 a 2,5%. As troças são removidas por classificação e o açúcar é ensacado em sacos de 50 kg de polipropileno/polietileno. Parte deste açúcar é empacotado em sacos de plástico de 1 kg.

Recuperação

Os xaropes de afinação rejeitados são recristalizados num sistema de três cozeduras designado por duplo Einwurf. Os xaropes de refinação rejeitados são cristalizados numa pré-cozedura, resultando num açúcar que é dissolvido e enviado para o dissolvedor de afinação e num xarope que é misturado com o xarope de afinação. O açúcar da 1ª cozedura de Recuperação é dissolvido e enviado para o dissolvedor de afinação. Os açúcares da segunda e terceira cozedura são reciclados para formarem pé-de-cozedura para a primeira e segunda cristalização, respectivamente. Os xaropes respectivos são enviados para as cristalizações seguintes. A última cristalização é efectuada num tacho de vácuo contínuo. O xarope desta cozedura é descarregado como melaço. Todas as massas cozidas da Recuperação são purgadas em quatro centrífugas BMA contínuas.

Vapor e Energia

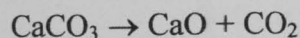
O Vapor é produzido em duas caldeiras de vapor Babcock a 24 bar. A pressão do Vapor é reduzida para 5 e 1 kg/cm² antes de ser enviado para a Refinaria. Parte do vapor é passado através de três alternadores turbo com uma potência total de 4,5 MWatt. Esta potência produzida excede as necessidades da Refinaria. São recuperadas três toneladas por hora de Vapor do sistema de co-geração.

2 – INCINERAÇÃO DAS LAMAS DE CARBONATAÇÃO

As Lamas de carbonatação representam um dos problemas ambientais da RAR, já que, por 500 toneladas de açúcar, produzem-se cerca de 8 toneladas de lamas. Tendo em vista a resolução deste problema estão em curso vários estudos por forma a reutilizá-las.

As Lamas são actualmente usadas na correcção de solos agrícolas. Contudo, podem ser reutilizadas quer no processo industrial, substituindo na carbonatação total ou parcialmente a cal, quer na neutralização dos gases de combustão das caldeiras geradoras de vapor.

As lamas, são fundamentalmente constituídas por carbonato de cálcio, que sob a acção do calor sofre a seguinte reacção:



Esta reacção pode ser realizada mediante um processo de incineração, no qual o óxido de cálcio (CaO) é produzido por decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃), num forno, a temperaturas elevadas. A reacção é reversível e o CaO combina-se prontamente com o CO₂ para formar CaCO₃. A pressão do CO₂ em equilíbrio com o CaCO₃ e CaO aumenta com a temperatura. No entanto, num sistema industrial este nunca é mantido em equilíbrio; em vez disso, o CO₂ é continuamente removido do forno para deslocar o equilíbrio da esquerda para a direita, promovendo assim a formação de CaO. A reacção ocorre para temperaturas superiores a 600°C, tornando-se espontânea a partir de 835°C. Para garantir um rendimento de decomposição de CaCO₃ superior a 70% deverá ser utilizada uma temperatura de trabalho de 900° C.

2.1 – A Instalação Piloto

A instalação piloto utilizada na incineração das lamas de carbonatação (Figuras 2 e 3), é constituída por um queimador (e respectiva câmara de combustão), pelo forno, pelo secador e por um quadro de controlo. Existem ainda dois ventiladores, um na câmara de combustão e outro à saída do secador, que não são usados. Pensou-se que na tubagem que conduz os gases do secador para o exterior, iria existir uma elevada perda de carga dificultando a remoção dos gases, para que tal não acontecesse instalou-se um ventilador de aspiração. Dado a não significativa perda de carga, o ventilador de aspiração encontra-se fora de funcionamento.



Figura 3 – Instalação piloto de incineração

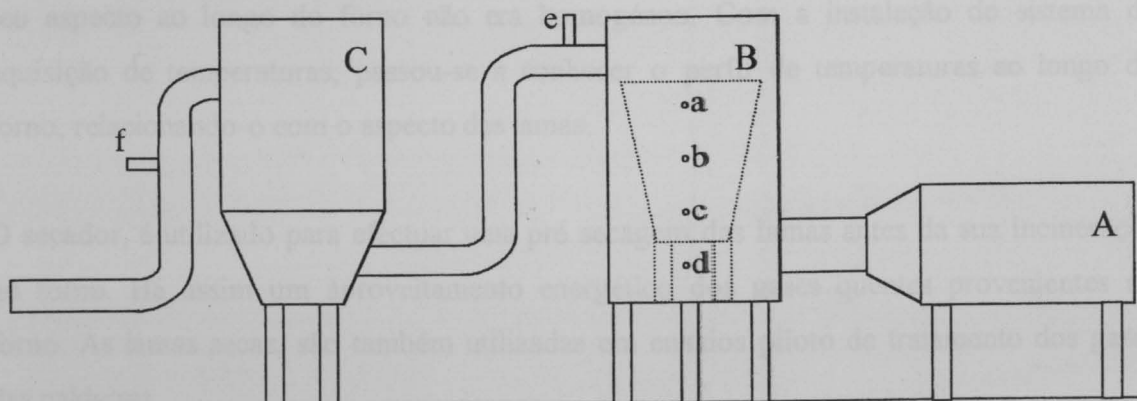


Figura 3 – Representação esquemática da instalação piloto: A – Câmara de combustão; B – Forno de incineração; C – Secador; a – Temperatura superior; b – Temperatura média; c – Temperatura inferior; d – Temperatura de controlo; e – Temperatura de segurança; f – Temperatura à saída do secador

O queimador existente possui um ventilador no seu interior, não sendo também necessário usar o ventilador acoplado à câmara de combustão.

O combustível usado é o gás propano, sendo necessário utilizar duas garrafas ligadas em paralelo para possibilitar o processo.

O funcionamento do queimador, é controlado pela temperatura de controlo e pela temperatura de segurança. Assim, quando o set-point da temperatura de controlo (temperatura medida dentro do forno, em locais diferentes dependendo do ensaio) é atingido, a alimentação de gás ao queimador diminui. No entanto, as temperaturas dentro e à saída do forno continuam a aumentar ligeiramente. Por sua vez, quando o set-point da temperatura de segurança (temperatura medida à saída do forno) é atingido, o queimador desliga até que esta temperatura comece a diminuir.

Inicialmente, apenas se registava a temperatura dentro do forno correspondente ao local da sonda de controlo. Foi posteriormente instalado um sistema de aquisição de temperaturas por computador, onde era registada a temperatura inferior, média e superior no interior do forno.

Ao retirar as lamas incineradas referentes ao primeiro ensaio de queima, verificou-se que o seu aspecto ao longo do forno não era homogéneo. Com a instalação do sistema de aquisição de temperaturas, passou-se a conhecer o perfil de temperaturas ao longo do forno, relacionando-o com o aspecto das lamas.

O secador, é utilizado para efectuar uma pré secagem das lamas antes da sua incineração no forno. Há assim um aproveitamento energético dos gases quentes provenientes do forno. As lamas secas, são também utilizadas em ensaios piloto de tratamento dos gases das caldeiras.

Dentro do forno e do secador, existe um cesto onde são colocadas as lamas. O fundo dos cestos é perfurado para permitir a passagem dos gases.

As lamas secas num dado ensaio, serão incineradas no ensaio seguinte. A manipulação dos cestos é feita com a ajuda de um guincho (Figura 4)

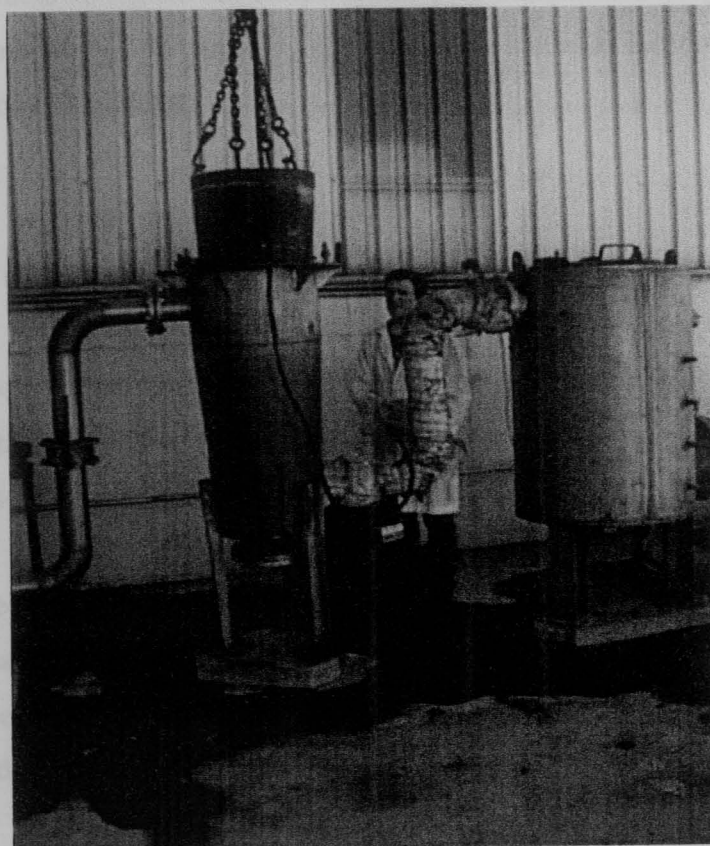


Figura 4 – Manipulação dos cestos

A introdução do cesto no forno tem de ser feita com cuidado, para que os orifícios existentes em cada um deles se ajustem de forma a possibilitar a inserção das sondas.

As plantas da instalação piloto e de cada um dos seus componentes (secador, forno e câmara de combustão), são apresentadas no Anexo I.

A realização de um ensaio de queima, segue basicamente as seguintes etapas:

- Colocar as lamas secas no ensaio anterior dentro do forno;
- Carregar lamas frescas no secador;
- Introduzir a sonda de controlo e as sondas de leitura no forno;
- Ligar as garrafas de gás;

- Fixar o set-point da temperatura de controlo e da temperatura de segurança no quadro eléctrico;
- Ligar o queimador;
- Dar início ao registo das temperaturas pelo computador e registar manualmente as temperaturas de controlo, segurança e de saída do secador, em intervalos de tempo de 5 minutos.

2.2 – Ensaios de Incineração

Os ensaios de incineração, têm como objectivo determinar quais as melhores condições de operação da instalação piloto, de forma a que a transformação de carbonato de cálcio a óxido de cálcio seja a maior possível.

As condições de operação, e a própria instalação piloto, foram então modificadas com o decorrer dos ensaios de queima. Assim, à medida que se analisava um determinado ensaio, procurava-se alterar as condições de operação e/ou a instalação piloto de forma a que o ensaio seguinte decorresse nas condições pretendidas.

Neste ponto do relatório, são descritas as principais alterações efectuadas com o decorrer dos ensaios. Na secção 2.3, é apresentada uma ficha individual para cada ensaio, onde são descritas pormenorizadamente as condições de operação, os resultados obtidos e algumas observações importantes.

Nos primeiros ensaios, não dispunha-mos ainda do sistema de aquisição de temperaturas do forno por computador. A única temperatura dentro do forno registada, era a correspondente ao local onde era colocada a sonda de temperatura de controlo.

Ao descarregar as lamas incineradas correspondentes aos primeiros ensaios, verificou-se que o seu aspecto ao longo do forno não era homogéneo (ver Tabelas E1 a E4). Esta observação, levou-nos a pensar que existiria um gradiente de temperaturas ao longo do forno, como posteriormente se verificou com a instalação das sondas de leitura.

Ainda no que diz respeito ao aspecto das lamas, verificou-se que as lamas próximas do fundo do cesto apresentavam uma coloração esverdeada. Tal facto é devido à migração de chumbo existente na liga metálica de que é feita a grelha perfurada existente no fundo do cesto.

Tentou-se resolver o problema, introduzindo uma placa perfurada de material cerâmico sobre a grelha metálica do fundo do cesto. Esta solução não se mostrou muito viável, pois além de continuar a haver alguma migração de chumbo para as lamas, a placa cerâmica acabou por se desfazer ao fim do terceiro ensaio em que foi usada. Não foi encontrada nenhuma solução eficaz, acabado a migração de chumbo por se tornar insignificante com o decorrer dos ensaios (a grelha metálica continha cada vez menos chumbo).

Os primeiros 5 ensaios, foram realizados com a sonda da temperatura de controlo colocada na parte superior do forno (orifício a). Observa-se que as temperaturas de controlo e de segurança registadas para cada ensaio, têm valores muito semelhantes. Este facto deve-se, à grande proximidade dos locais onde as referidas temperaturas são captadas.

Um problema com que nos confronta-mos, foi a congelação da garrafa de gás que alimentava o queimador. Optou-se então, do ensaio 5 em diante, por alimentar o queimador com duas garrafas de gás ligadas em paralelo.

Verificou-se também, em vários ensaios, anomalias no funcionamento do queimador. Assim, quando o set-point da temperatura de segurança era atingido e o queimador desligava, não voltava a ligar automaticamente. Este problema nunca foi resolvido.

Uma vez que inicialmente, apenas disponhamos de um único orifício para introdução de sondas de temperatura (orifício a), tanto o forno como os cestos foram perfurados em mais locais, correspondentes aos orifícios b, c e d.

Nos ensaios 6 e 7, a sonda para medição da temperatura de controlo passou a ser introduzida no fundo do forno (orifício c). A partir daqui, passou a ser evidente a diferença entre a temperatura de controlo e a temperatura de segurança registadas.

No ensaio 8, a sonda da temperatura de controlo foi novamente mudada. A partir deste ensaio e até final, esta passou a ser inserida no orifício d, correspondente ao espaçamento existente entre o fundo do cesto e o fundo do forno.

No ensaio 7, para melhor manter a temperatura do forno dentro dos limites estabelecidos, mudou-se o set-point da temperatura de segurança ao longo do ensaio. Este procedimento foi repetido em quase todos os ensaios posteriores.

Do ensaio 12 em diante, passámos a dispor de um sistema de aquisição de temperaturas por computador. Este sistema era inicialmente composto por duas sondas, que eram introduzidas em dois dos orifícios a, b ou c dependendo do ensaio. A partir do ensaio 16, passou-se a utilizar três sondas. As sondas das temperaturas de controlo e de segurança, permaneceram nos mesmos locais.

Para evitar a passagem directa de parte dos gases quentes para o secador, a folga existente entre a parede externa do cesto e a parede interna do forno, foi tapada com lã de rocha. Este procedimento foi efectuado a partir do ensaio 17.

O consumo de gás, foi controlado do ensaio 21 ao ensaio 24. Para o efeito, as garrafas de gás eram pesadas antes de dar início e no final do ensaio. Uma das duas permanecia sobre a balança durante tudo o ensaio, registando-se o seu peso de 30 e 30 minutos.

Nos três últimos ensaios (22 a 24), efectuaram-se as seguintes pesagens: lamas secas introduzidas no forno, lamas frescas introduzidas no secador, lamas incineradas provenientes do forno e lamas secas provenientes do secador.

2.3 – Ensaio de Incineração, Resultados Obtidos

Na secção, é apresentada uma ficha individual para cada um dos 24 ensaios realizados. Nestas fichas, são descritas pormenorizadamente as condições de operação, os resultados obtidos e algumas observações importantes.

Para melhor interpretação de alguns aspectos referidos nas fichas, a representação esquemática da instalação piloto de incineração pode ser consultada na secção 2.1 (Figura 3).

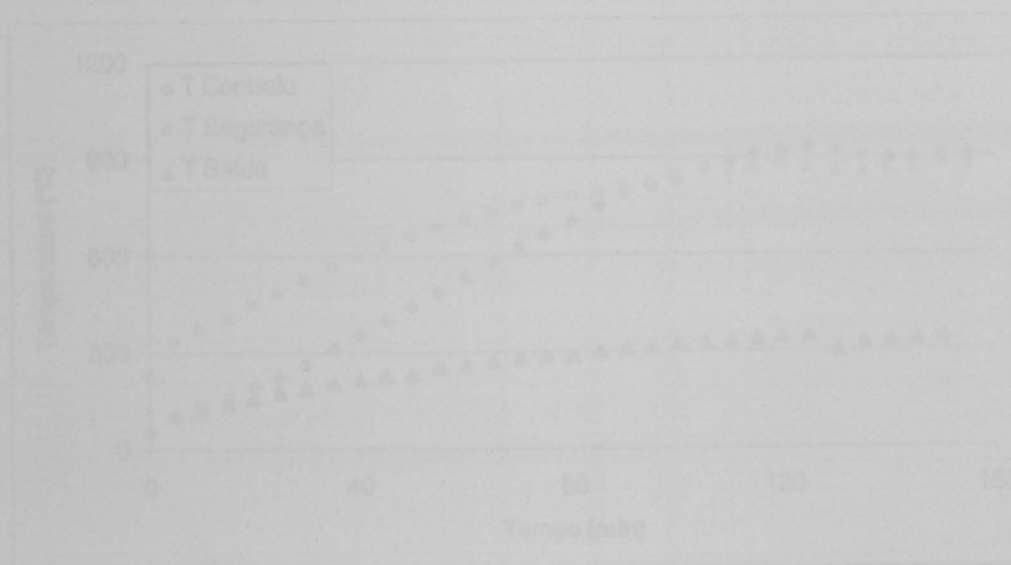


Figura B1 - Temperatura de controle, segurança e TSMMA em função do tempo

Observações:

- O ensaio foi interrompido por volta dos 15 min, devido a uma falta de gás. Cerca de 90 min depois, o processo foi reiniciado registando as várias temperaturas em intervalos de 5 min (o tempo zero corresponde ao reinício do processo).
- O tempo necessário para atingir temperaturas de ordem dos 900 °C, foi de 115 min. Esta temperatura (temperaturas próximas dos 900 °C) foi mantida durante 40 min.

Ensaio n° 1

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	900° C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas frescas
Local da sonda de controlo:	Orifício a
Tempo total do ensaio:	155 min

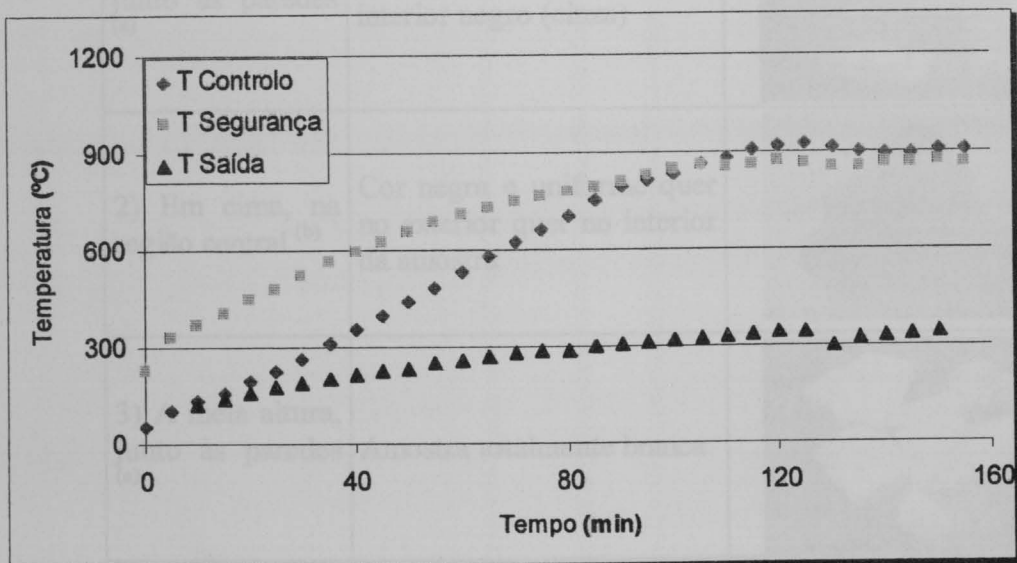
Resultados obtidos

Figura E1 - Temperatura de controlo, segurança e à saída do secador em função do tempo


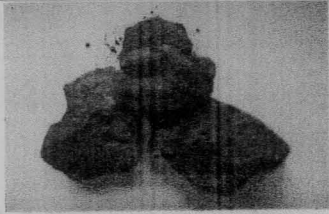
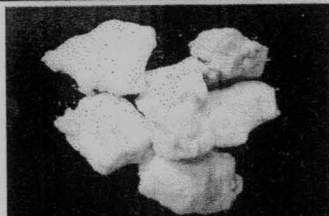
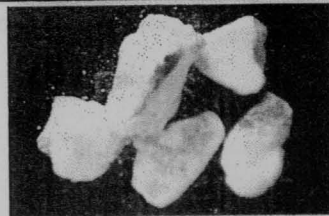

Observações:

- O ensaio foi interrompido por volta dos 15 min, devido a uma falha de gás. Cerca de 90 min depois, o processo foi reiniciado registando as várias temperaturas em intervalos de 5 min (o tempo zero corresponde ao reinício do processo).
- O tempo necessário para atingir temperaturas da ordem dos 900 °C, foi de 115 min. Esta temperatura (temperaturas próximas dos 900 °C) foi mantida durante 40 min.

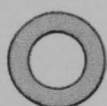
Amostras recolhidas

As lamas tratadas ficaram a arrefecer cerca de dois dias no forno e no secador respectivamente. Foram então recolhidas cinco amostras em diferentes partes do forno e uma amostra da parte superior do secador:

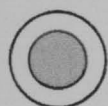
Tabela E1 - Amostras recolhidas

Equipamento	Região	Aspecto	
Forno	1) Em cima, junto às paredes ^(a)	Camada externa branca e interior negro (cinza)	
	2) Em cima, na região central ^(b)	Cor negra e uniforme quer no exterior quer no interior da amostra	
	3) A meia altura, junto às paredes ^(a)	Amostra totalmente branca	
	4) A meia altura, na região radial intermédia ^(c)	Semelhante à amostra 1)	
	5) A meia altura, no centro ^(d)	Semelhante à amostra 2) mas de cor mais clara (cinzento claro)	
Secador	6) Em cima, por toda a área radial ^(e)	Cor acastanhada e uniforme	

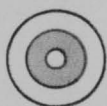
a)



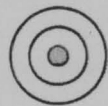
b)



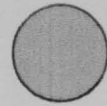
c)



d)



e)



Ensaio nº 2

Set-point da Temperatura de Controlo:	900 °C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	900 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício a
Tempo total do ensaio:	150 min

Resultados obtidos

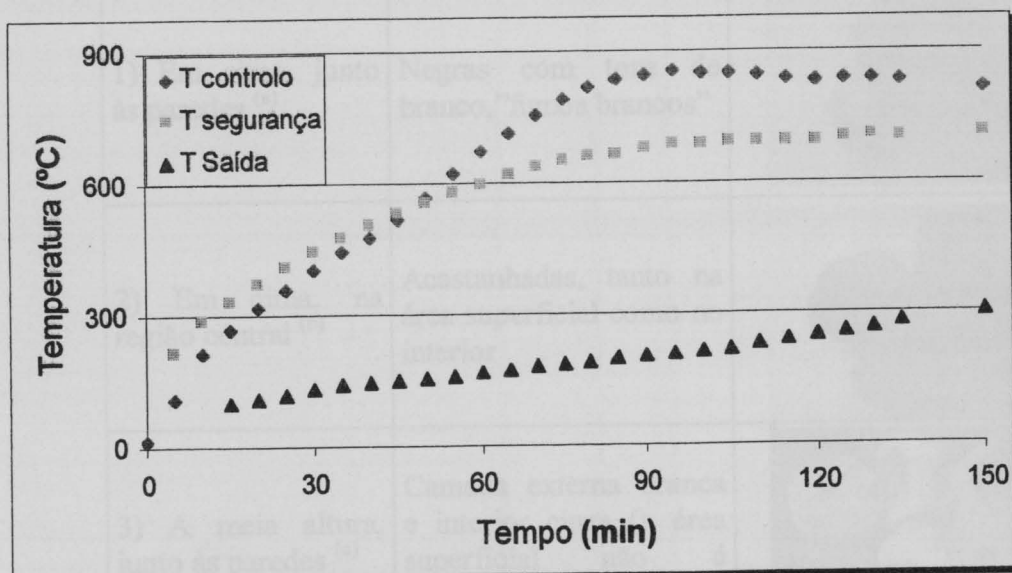


Figura E2 - Temperatura de controlo, segurança e à saída do secador em função do tempo

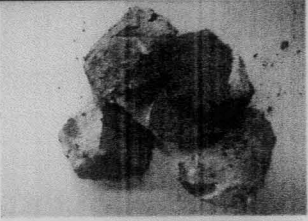
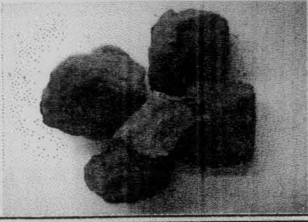

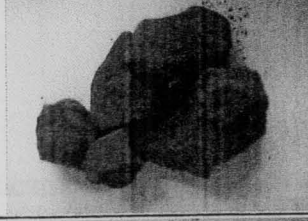
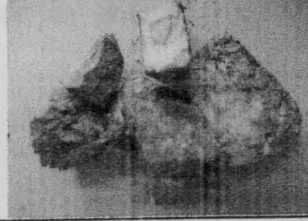
Observações:

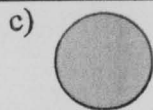
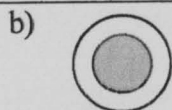
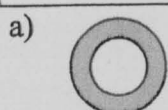
- A pressão de gás à entrada do queimador, foi decrescendo ao longo do ensaio (10 mbar até 7mbar)
- Não se atingiu a temperatura pré definida (900 °C), a temperatura máxima atingida foi de 854 °C
- A temperatura do forno manteve-se na entre 830 e 852 °C durante aproximadamente 50 min
- Tempo necessário para atingir temperaturas superiores a 830 °C: 85min

Amostras recolhidas

As lamas tratadas ficaram a arrefecer cerca de um dia no forno e no secador respectivamente. Ao retirar do forno o cesto que continha as lamas, verificou-se que estas ainda se encontravam a uma temperatura muito elevada. As lamas provenientes do forno, ficaram então a arrefecer mais um dia no exterior. Posteriormente, foram recolhidas cinco amostras em diferentes partes do forno e uma amostra da parte superior do secador:

Tabela E2 - Amostras recolhidas

Equipamento	Região	Aspecto	
Forno	1) Em cima, junto às paredes ^(a)	Negras com tons de branco, "fumos brancos"	
	2) Em cima, na região central ^(b)	Acastanhadas, tanto na área superficial como no interior	
	3) A meia altura, junto às paredes ^(a)	Camada externa branca e interior cinza (a área superficial não é uniformemente branca)	
	4) A meia altura, na região central ^(b)	Negras e uniformes, no interior e na superfície externa	
	5) No fundo, por toda a área radial ^(c)	Branças, com tons de verde na superfície externa	
Secador	6) Em cima, por toda a área radial ^(c)	Cor acastanhada e uniforme	



Ensaio n° 3

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	900 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício a
Tempo total do ensaio:	175 min

Resultados obtidos

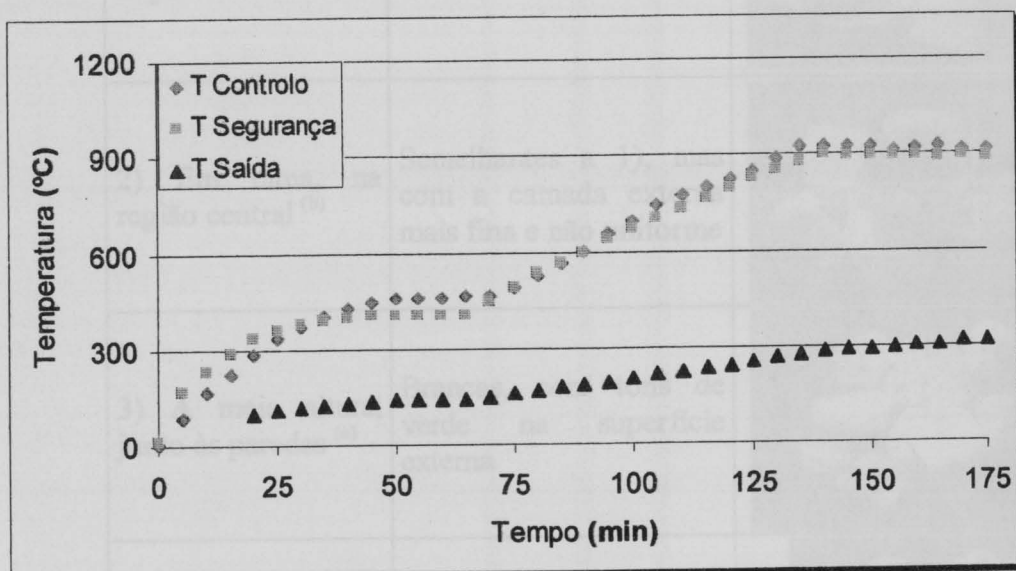


Figura E3 - Temperatura de controlo, segurança e à saída do secador em função do tempo

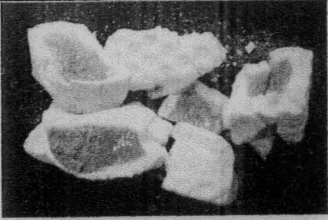
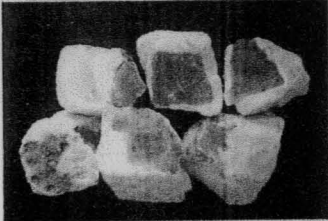

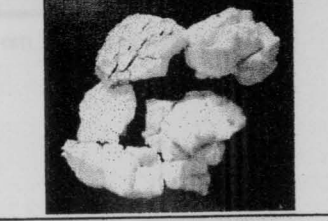

Observações:

- A partir dos 40 min, a temperatura de segurança permaneceu praticamente constante até aos 65 min, altura em que se mudou a garrafa de gás (ver patamar no gráfico). Quanto à temperatura de controlo, manteve-se constante entre os 50 e 70min.
- O tempo necessário para atingir a temperaturas de 900 °C, foi de 132 min. Esta temperatura (temperaturas próximas dos 900 °C) foi mantida durante 40 min.
- Quando o set-point (900°C) é atingido, a temperatura de controlo varia entre os 900 e os 930 °C, pois o queimador liga e desliga.

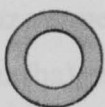
Amostras recolhidas

As lamas tratadas ficaram a arrefecer cerca de três dias no forno e no secador respectivamente. Foram então recolhidas cinco amostras em diferentes partes do forno e uma amostra da parte superior do secador:

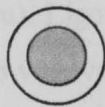
Tabela E3 - Amostras recolhidas

Equipamento	Região	Aspecto	
Forno	1) Em cima, junto às paredes ^(a)	Camada externa branca e interior cinza	
	2) Em cima, na região central ^(b)	Semelhantes a 1), mas com a camada externa mais fina e não uniforme	
	3) A meia altura, junto às paredes ^(a)	Branças, com tons de verde na superfície externa	
	4) A meia altura, na região central ^(b)	Semelhantes a 3)	
	5) No fundo, por toda a área radial ^(c)	Superfície externa verde/negra e interior branco ainda com alguma tonalidade verde	
Secador	6) Em cima, por toda a área radial ^(c)	Cor acastanhada e uniforme (tanto no interior como no exterior)	

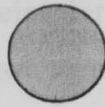
a)



b)



c)



Ensaio nº 4

Set-point da Temperatura de Controlo:	1000 °C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	1000 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício a
Tempo total do ensaio:	155 min

Resultados obtidos

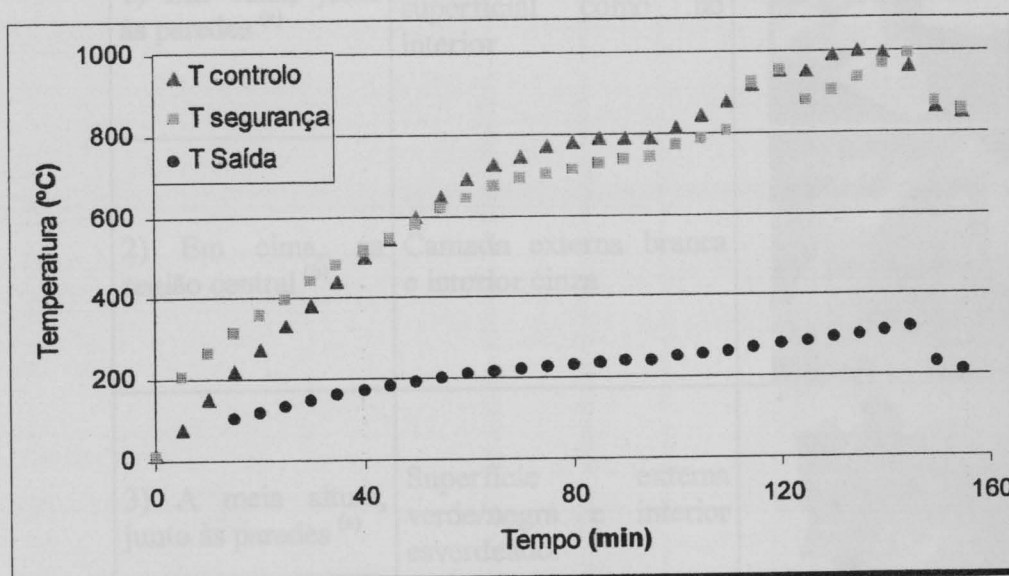


Figura E4 - Temperatura de controlo, segurança e à saída do secador em função do tempo

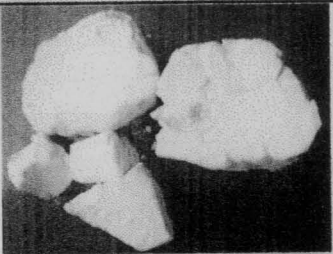


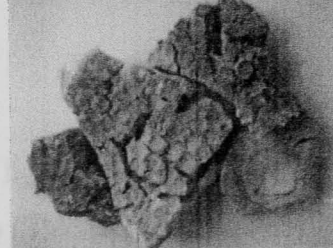
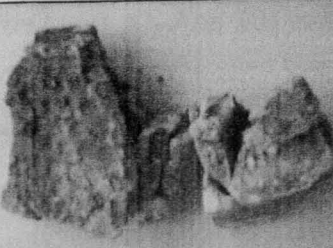
Observações:

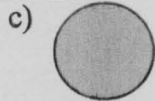
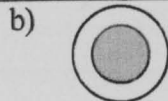
- Após os 75 min, a temperatura de controlo aumentou lentamente, apesar da pressão do gás se manter praticamente constante. Optou-se então por mudar de garrafa de gás aos 92 min, pois a temperatura de controlo apenas tinha aumentado apenas 2°C desde os 85 min.
- Aos 134 min, atingiu-se os 1000 °C de temperatura dentro do forno (T de Controlo).
- Entre os 135 e os 140 min, a temperatura dentro do forno chegou a atingir os 1018 °C.
- Depois dos 140 min temperatura começou a descer rapidamente, pois o queimador desligou (a luz vermelha acendeu). Ligou-se o queimador (pressionando o botão correspondente à luz vermelha), mas este não voltava a funcionar, tornando a acender a luz vermelha pouco depois. Trocou-se de garrafa de gás, mas nada mudou. Deu-se então o ensaio como encerrado.

Amostras recolhidas

As lamas tratadas ficaram a arrefecer cerca de dois dias no forno e no secador respectivamente. Foram então recolhidas cinco amostras em diferentes partes do forno e uma amostra da parte superior do secador:

Tabela E4 - Amostras recolhidas

Equipamento	Região	Aspecto	
Forno	1) Em cima, junto às paredes ^(a)	Branças, tanto na área superficial como no interior	
	2) Em cima, na região central ^(b)	Camada externa branca e interior cinza	
	3) A meia altura, junto às paredes ^(a)	Superfície externa verde/negra e interior esverdeado.	
	4) A meia altura, na região central ^(b)	Verdes, tanto na área superficial como no interior	
	5) No fundo, por toda a área radial ^(c)	Verdes/negras à superfície e esverdeadas no interior	
Secador	6) Em cima, por toda a área radial ^(c)	Cor acastanhada uniforme	



Ensaio nº 5

Set-point da Temperatura de Controlo:	1000° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	1000 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orificio <u>a</u>
Tempo total do ensaio:	135 min

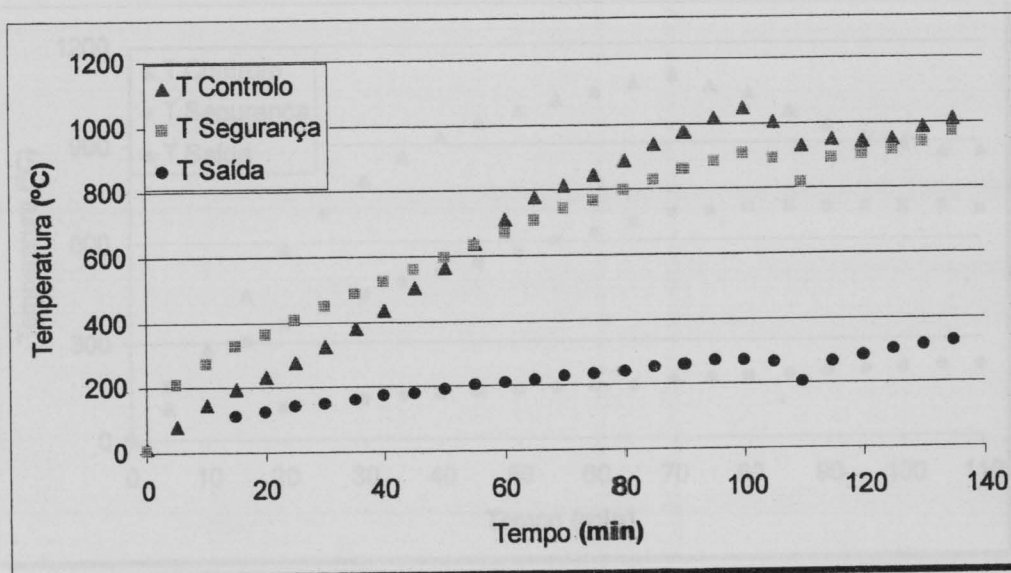
Resultados obtidos

Figura E5 - Temperatura de controlo, segurança e à saída do secador em função do tempo

Observações:

- Pela primeira vez, neste ensaio utilizaram-se duas garrafas de gás ligadas em paralelo.
- Aos 93 min, atingiu-se os 1000 °C de temperatura dentro do forno (T de Controlo).
- A temperatura de controlo, por volta dos 100 min ultrapassava os 1050 °C. Aos 101 min, mudou-se então o set-point da temperatura de segurança para 900 °C.
- Quando aos 110min, se efectuou nova leitura das diversas temperaturas, verificou-se que o queimador se encontrava desligado (luz vermelha acesa) pelo que a temperatura de controlo desceu até aos 930 °C. O queimador foi então novamente ligado.
- Aos 120 min voltou-se a colocar o set-point de segurança nos 1000 °C, pois a temperatura de controlo (dentro do forno) não subia acima dos 950 °C.

Ensaio nº 6

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	900 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício c
Tempo total do ensaio:	110 min

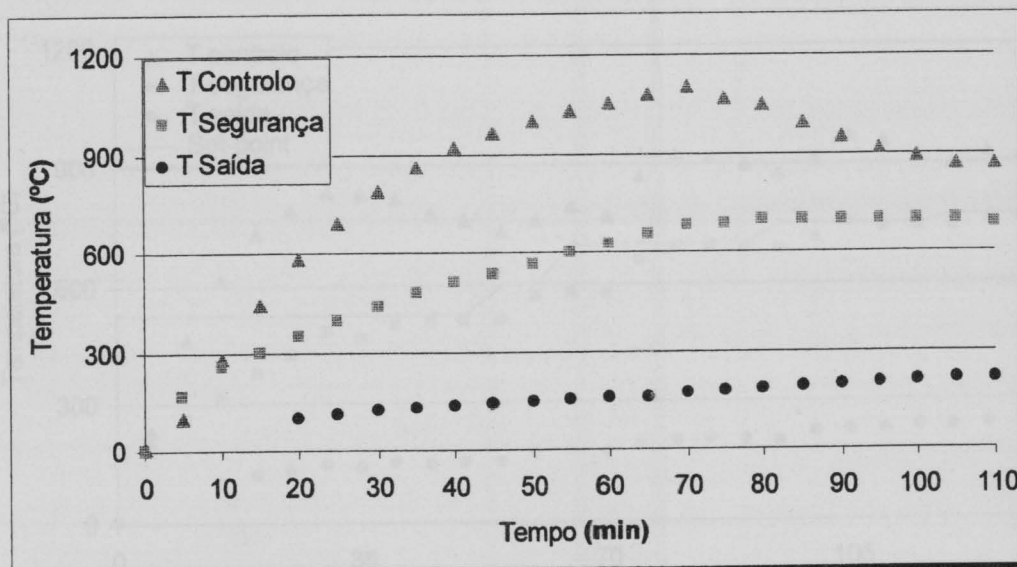
Resultados obtidos

Figura E6 - Temperatura de controlo, segurança e à saída do secador em função do tempo

Observações:

- A sonda para medição da temperatura de controlo (temperatura dentro do forno), foi introduzida no fundo do forno para realização deste ensaio.
- Aos 38 min, atingiu-se os 900 °C de temperatura dentro do forno (T de Controlo).
- A temperatura de controlo aos 72 min atingia já os 1111 °C (o set-point era de 900 °C), nesta altura a temperatura de segurança era de 688 °C. optou-se então por mudar o set-point da temperatura de segurança para 700 °C.

Ensaio nº 7

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	520 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício c
Tempo total do ensaio:	140 min

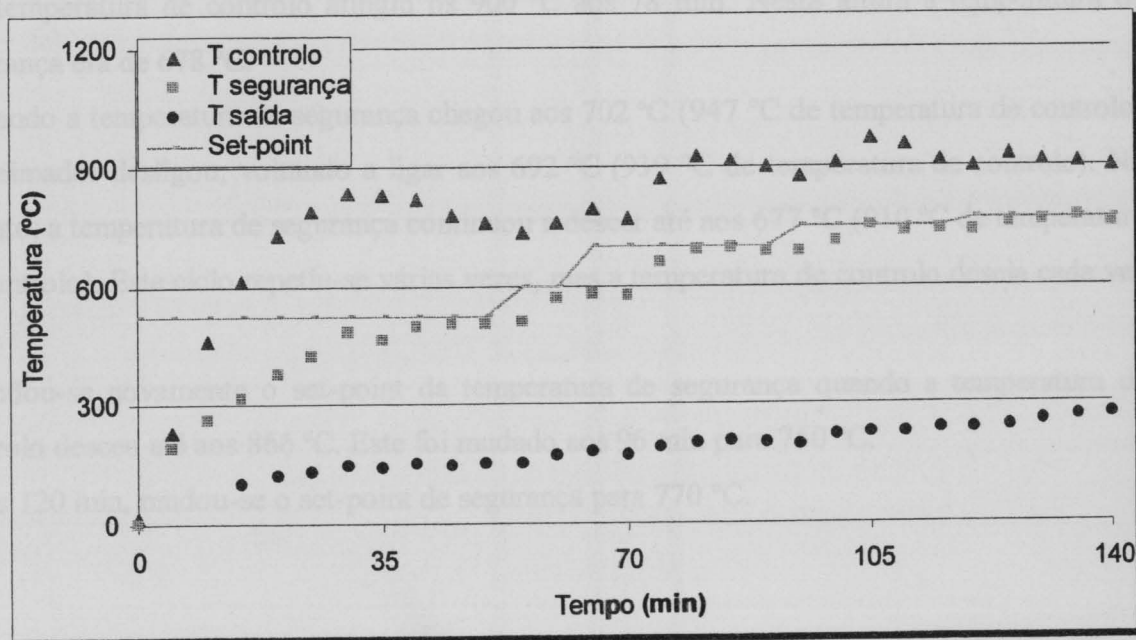
Resultados obtidos

Figura E7 - Temperatura de controlo (dentro do forno), segurança (à saída do forno), set-point da temperatura de segurança e temperatura à saída do secador para o ensaio 7 em função do tempo.

Observações:

- A sonda para medição da temperatura de controlo (temperatura dentro do forno), foi introduzida no fundo do forno para realização deste ensaio.
- A descida da temperatura por volta dos 35 min (Fig. E7), é consequência do queimador se ter desligado por volta deste mesmo tempo (luz vermelha acesa).
- Entre os 40 e 45 min a temperatura de segurança atingiu os 525 °C (o set-point estabelecido era de 520 °C). O queimador desligou e a temperatura começou a descer até cerca dos 516 °C, altura em que o queimador ligou automaticamente. No entanto, a temperatura continuou a descer até aos 499 °C voltando a subir e a repetir o ciclo descrito. Aos 526 °C de temperatura

de segurança, correspondiam 772 °C de temperatura de controlo, e aos 499 °C correspondiam 745 °C.

- Aos 57 min, optou-se então por mudar o set-point da temperatura de segurança para 600 °C. Nesta altura a temperatura de segurança estava a descer e era cerca de 508 °C.
- Aos 63 min a temperatura de segurança atingiu os 603 °C (o set-point da temperatura de segurança era neste momento de 600 °C, e a temperatura de controlo 820 °C), o queimador desligou voltando a ligar aos 593 °C. O ciclo repetiu-se e como ainda não se tinha atingido os 900 °C de temperatura de controlo (set-point estabelecido), mudou-se o set-point da temperatura de segurança para 700 °C (67 min).
- A temperatura de controlo atingiu os 900 °C aos 78 min. Nesta altura a temperatura de segurança era de 678 °C.
- Quando a temperatura de segurança chegou aos 702 °C (947 °C de temperatura de controlo) o queimador desligou, voltando a ligar aos 692 °C (939 °C de temperatura de controlo). No entanto, a temperatura de segurança continuou a descer até aos 677 °C (910 °C de temperatura de controlo). Este ciclo repetiu-se várias vezes, mas a temperatura de controlo descia cada vez mais.
- Mudou-se novamente o set-point da temperatura de segurança quando a temperatura de controlo desceu até aos 866 °C. Este foi mudado aos 96 min para 750 °C.
- Aos 120 min, mudou-se o set-point de segurança para 770 °C.

Tempo (min)

Figura E2 - Temperatura de controlo (dentro do forno), segurança (à saída do forno) e temperatura à saída do forno por unidade 2 em função do tempo.

Observações

- A sonda para medição da temperatura de controlo, para realização desta prova, foi introduzida no espaço existente entre o fundo do forno e o fundo do cesto.
- Observando-se que a temperatura de controlo sobe muito lentamente e temava valores muito baixos, verificou-se (entre os 45 e 50min), que ao mexer na sonda que se encontrava dentro do forno (principalmente no cabo de ligação), a temperatura de controlo sofria grandes oscilações. Ao mexer no cabo de ligação, a temperatura de controlo dispôs a atingir valores na ordem das 1150°C. Descobriu-se mais tarde, tal como se previa, que estes factos eram devidos a anomalias na ligação da sonda.
- Aos 70min, atingiram-se pela primeira vez os 700°C de temperatura de segurança.

Ensaio n° 8

Set-point da Temperatura de Controlo:	1000° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	700 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas frescas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	130 min

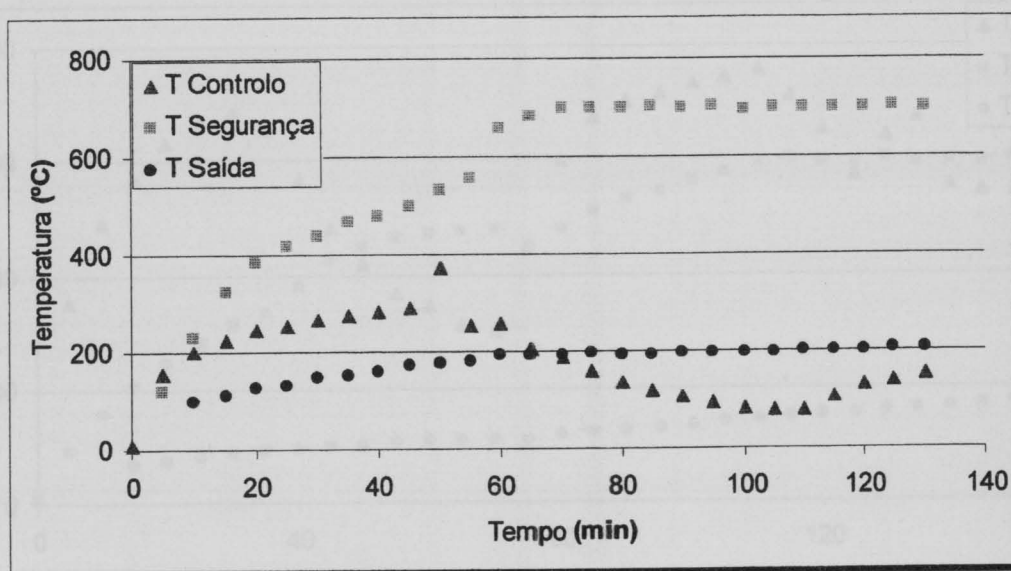
Resultados obtidos

Figura E8 - Temperatura de controlo (dentro do forno), segurança (à saída do forno) e temperatura à saída do secador para o ensaio 8 em função do tempo.

Observações:

- A sonda para medição da temperatura de controlo, para realização deste ensaio, foi introduzida no espaço existente entre o fundo do forno e o fundo do cesto.
- Observando-se que a temperatura de controlo subia muito lentamente e tomava valores muito baixos, verificou-se (entre os 45 e 50min), que ao mexer na sonda que se encontrava dentro do forno (principalmente no cabo de ligação), a temperatura de controlo sofria grandes oscilações. Ao mexer no cabo de ligação, a temperatura de controlo chegou a atingir valores na ordem dos 1150°C. Descobriu-se mais tarde, tal como se previa, que estes factos eram devidos a anormalidades na ligação da sonda.
- Aos 70min, atingiram-se pela primeira vez os 700°C de temperatura de segurança.

Ensaio nº 9

Set-point da Temperatura de Controlo:	1000° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	700 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	155 min

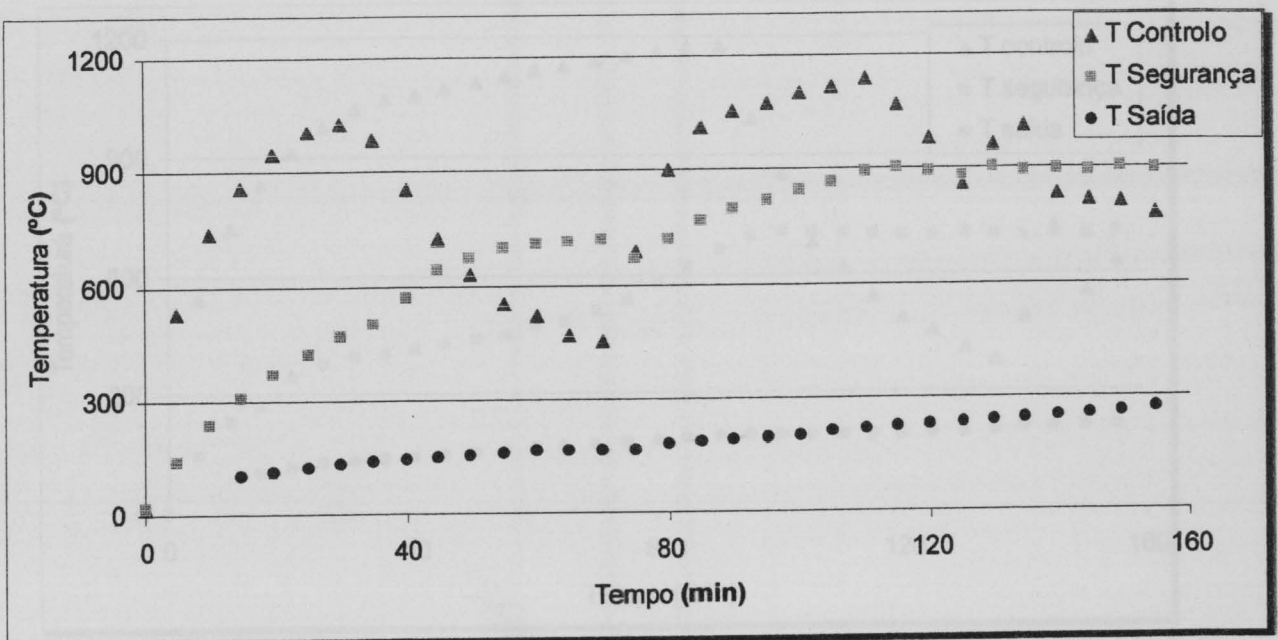
Resultados obtidos

Figura E9 - Temperatura de controlo (dentro do forno), segurança (à saída do forno) e temperatura à saída do secador para o ensaio 9 em função do tempo.

Observações:

- Aos 52 min, mudou-se o set-point da temperatura de segurança para 800°C.
- As garrafas de gás foram mudadas aos 71 min, pois a pressão de alimentação era muito baixa.
- Aos 113 min, atingiram-se os 900°C de temperatura de segurança.

Ensaio nº 10

Set-point da Temperatura de Controlo:	1000° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	700 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	155 min

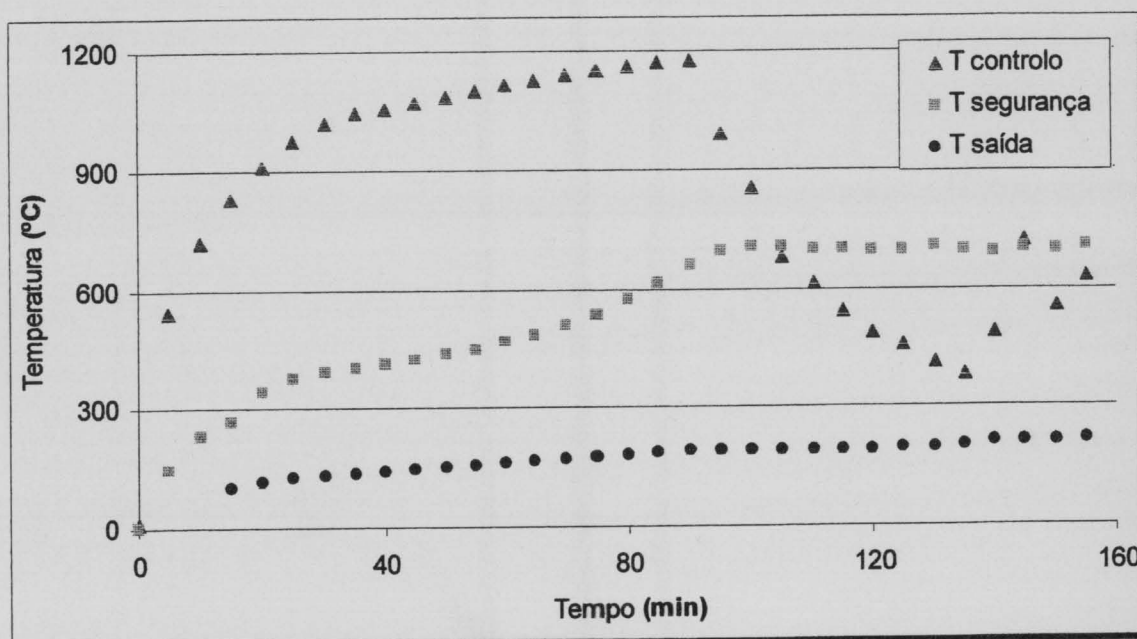
Resultados obtidos

Figura E10 - Temperatura de controlo (dentro do forno), segurança (à saída do forno) e temperatura à saída do secador para o ensaio 10 em função do tempo.

Observações:

- O facto de a temperatura de segurança subir muito lentamente, pode ser devido ao bloqueamento dos furos da placa existente no fundo do cesto.
- Aos 92min, a temperatura de segurança atingiu pela primeira vez os 700°C
- Quando a temperatura de segurança ultrapassou os 700°C (\cong 702°C), o queimador desligou (luz vermelha acesa). Voltou-se então a por o queimador em funcionamento pressionando o botão correspondente à luz vermelha. Este voltou a desligar quando a temperatura de segurança era de \cong 702°C, voltou-se então a repetir o procedimento já efectuado.

- À terceira vez que a temperatura de segurança chegou aos 702-703°C, a luz vermelha já não acendeu, e passou a dar-se o seguinte ciclo: O queimador desliga quando se atinge os 702-703°C de temperatura de segurança; A temperatura começa a descer rapidamente e o queimador volta a ligar automaticamente; A temperatura continua a descer rapidamente até cerca dos 627°C começando depois a subir (também rapidamente) repetindo-se o ciclo.
- A primeira vez que a temperatura de segurança ultrapassou os 700°C e o queimador desligou, a temperatura de controlo começou também a descer.
- Por volta dos 135min, a temperatura de controlo começou novamente a subir

Resultados obtidos



Figura 211 - Temperaturas de controlo (dentro do forno), segurança (à saída do forno), set-point de segurança de segurança e temperatura T saída do secador para o quadro 11 em função do tempo.

Observações

- As condições de operação deste ensaio foram semelhantes às do ensaio nº 10, apenas se mediu o set-point da temperatura de segurança aos 95, 105 e 115 min para 750, 800 e 850°C respectivamente;
- As observações efectuadas durante o ensaio, também foram muito semelhantes às realizadas. Apenas no final do ensaio o comportamento foi diferente, por consequência das medidas efectuadas no set-point da temperatura de segurança.

Ensaio n° 11

Set-point da Temperatura de Controlo:	1000° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	700 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	125 min

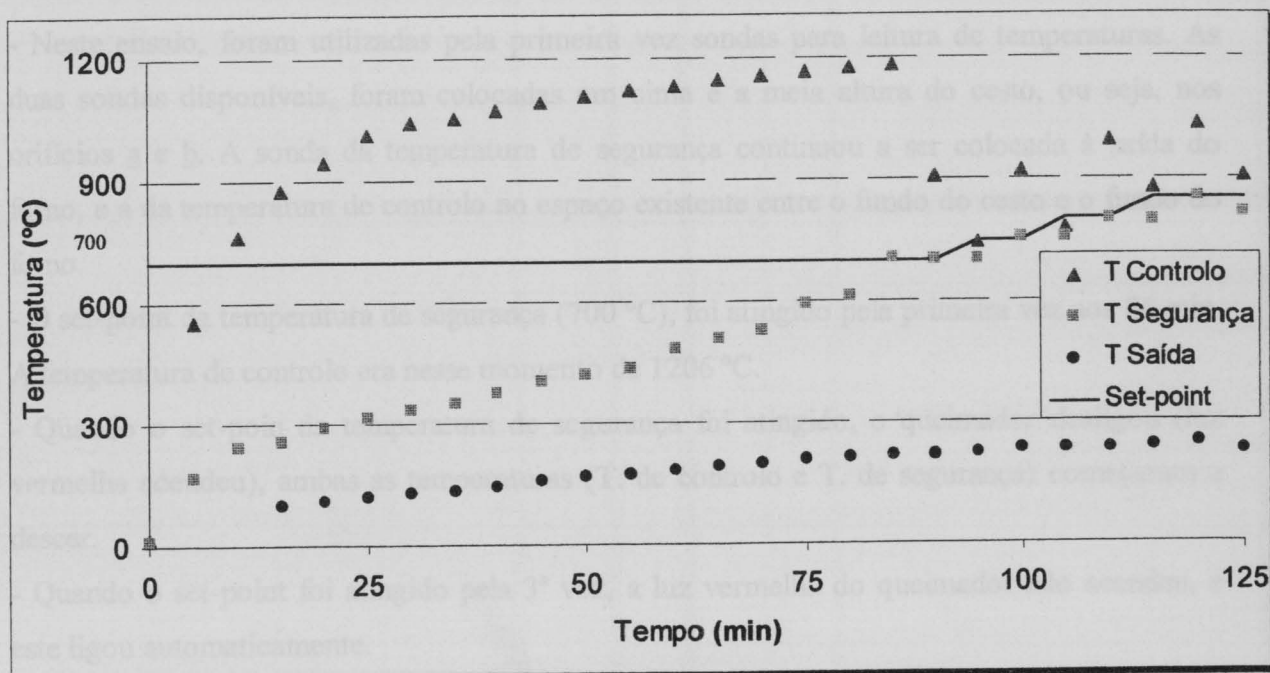
Resultados obtidos

Figura E11 - Temperatura de controlo (dentro do forno), segurança (à saída do forno), set-point da temperatura de segurança e temperatura à saída do secador para o ensaio 11 em função do tempo.

Observações:

- As condições de operação deste ensaio foram semelhantes às do ensaio n° 10, apenas se mudou o set-point da temperatura de segurança aos 95, 105 e 115 min para 750, 800 e 850°C respectivamente.
- As observações efectuadas durante o ensaio, também foram praticamente as mesmas. Apenas no final do ensaio o comportamento foi diferente, por consequência das mexidas efectuadas no set-point da temperatura de segurança.

Ensaio n° 12

Set-point da Temperatura de Controlo:	1000° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	700 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas frescas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	150 min

Observações:

- Neste ensaio, foram utilizadas pela primeira vez sondas para leitura de temperaturas. As duas sondas disponíveis, foram colocadas em cima e a meia altura do cesto, ou seja, nos orifícios a e b. A sonda da temperatura de segurança continuou a ser colocada à saída do forno, e a da temperatura de controlo no espaço existente entre o fundo do cesto e o fundo do forno.
- O set-point da temperatura de segurança (700 °C), foi atingido pela primeira vez aos 86 min. A temperatura de controlo era nesse momento de 1206 °C.
- Quando o set-poin da temperatura de segurança foi atingido, o queimador desligou (luz vermelha acendeu), ambas as temperaturas (T. de controlo e T. de segurança) começaram a descer.
- Quando o set-point foi atingido pela 3ª vez, a luz vermelha do queimador não acendeu, e este ligou automaticamente.
- Aos 110 min, quando se efectuou a leitura das temperaturas, verificou-se que o queimador se encontrava desligado.

Ensaio nº 13

Set-point da Temperatura de Controlo

Set-point inicial da Temperatura de Controlo

Lamas introduzidas no forno:

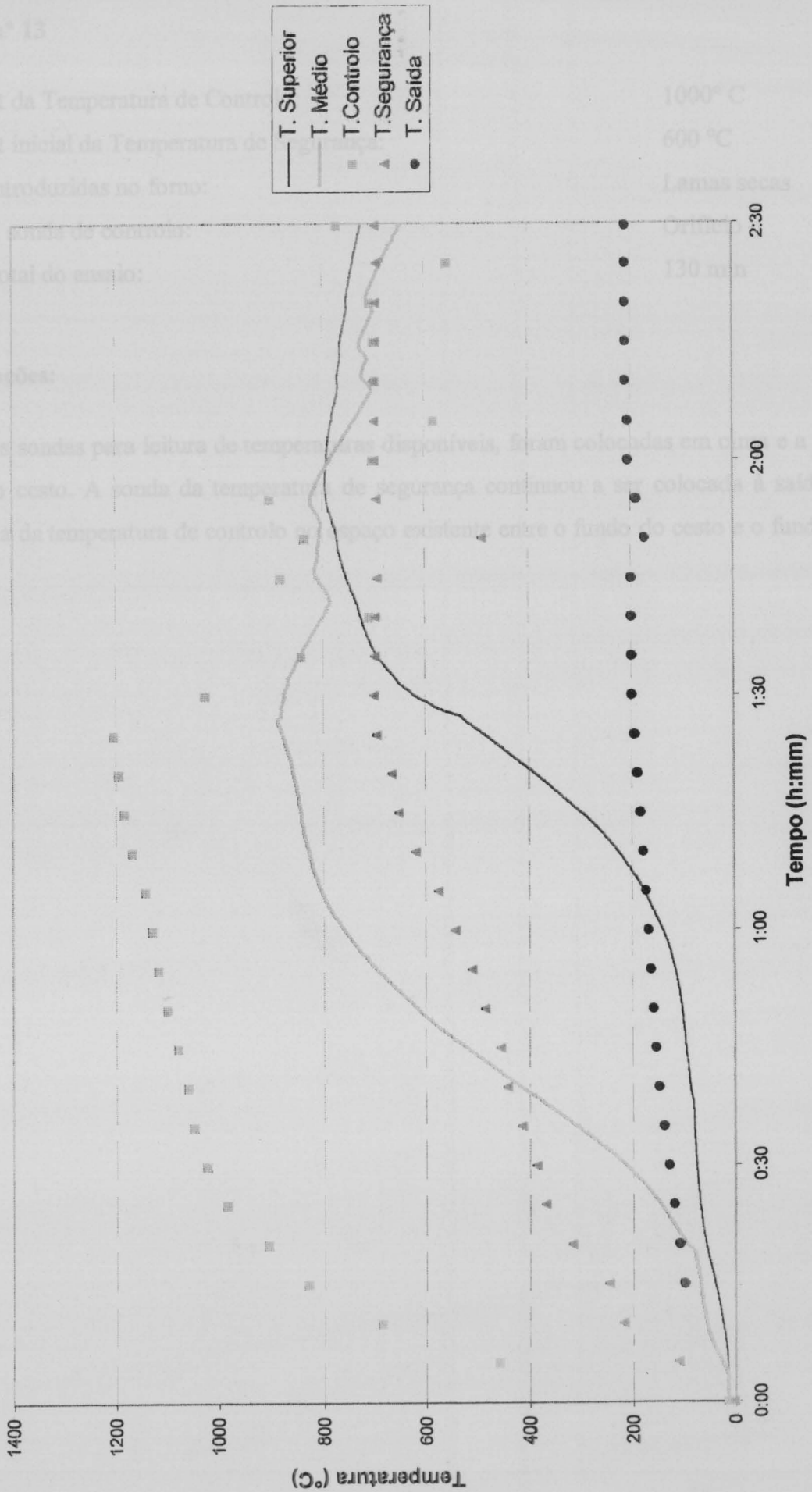
Local da sonda de controlo:

Tempo total do ensaio:

Observações:

- As duas sondas para leitura de temperaturas disponíveis, foram colocadas em cima e a meia altura do cesto. A sonda da temperatura de segurança continuou a ser colocada a saída do forno, e a da temperatura de controlo no espaço existente entre o fundo do cesto e o fundo do forno.

ENSAIO 12



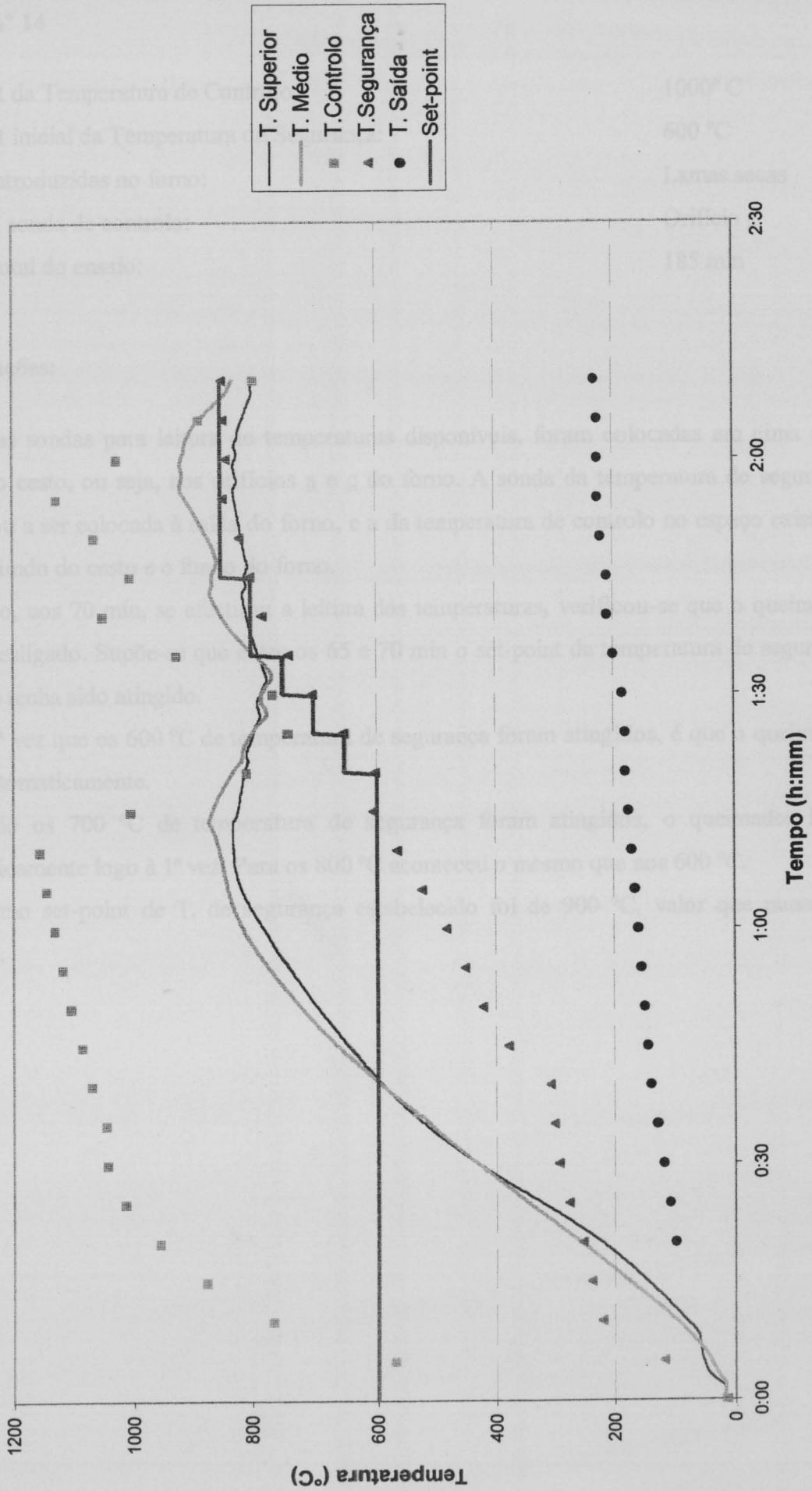
Ensaio nº 13

Set-point da Temperatura de Controlo:	1000° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	600 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	130 min

Observações:

- As duas sondas para leitura de temperaturas disponíveis, foram colocadas em cima e a meia altura do cesto. A sonda da temperatura de segurança continuou a ser colocada à saída do forno, e a da temperatura de controlo no espaço existente entre o fundo do cesto e o fundo do forno.

ENSAIO 13



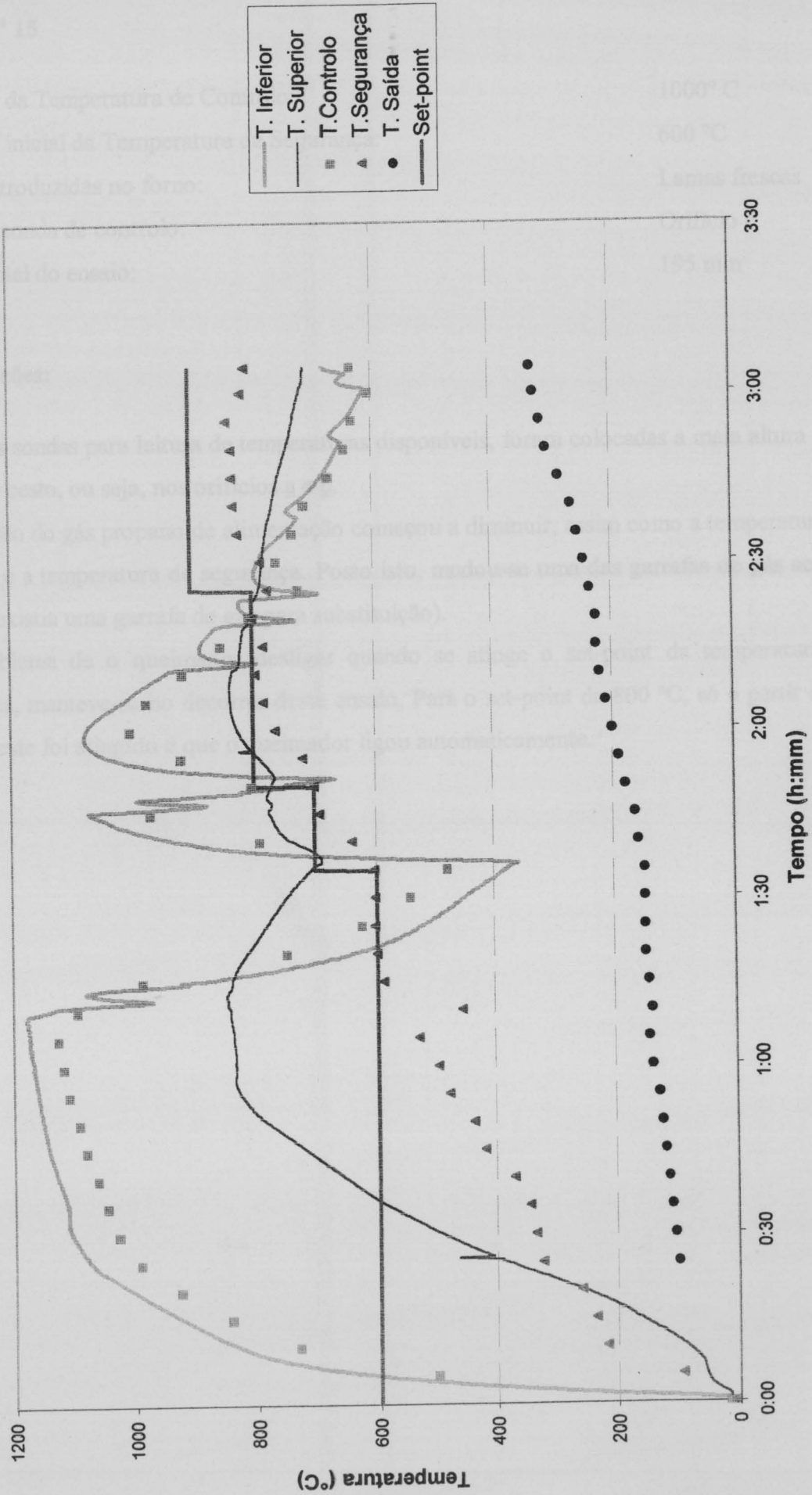
Ensaio nº 14

Set-point da Temperatura de Controlo:	1000° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	600 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	185 min

Observações:

- As duas sondas para leitura de temperaturas disponíveis, foram colocadas em cima e no fundo do cesto, ou seja, nos orifícios a e c do forno. A sonda da temperatura de segurança continuou a ser colocada à saída do forno, e a da temperatura de controlo no espaço existente entre o fundo do cesto e o fundo do forno.
- Quando, aos 70 min, se efectuou a leitura das temperaturas, verificou-se que o queimador estava desligado. Supõe-se que entre os 65 e 70 min o set-point da temperatura de segurança (600 °C) tenha sido atingido.
- Só à 3ª vez que os 600 °C de temperatura de segurança foram atingidos, é que o queimador ligou automaticamente.
- Quando os 700 °C de temperatura de segurança foram atingidos, o queimador ligou automaticamente logo à 1ª vez. Para os 800 °C aconteceu o mesmo que aos 600 °C.
- O ultimo set-point de T. de segurança estabelecido foi de 900 °C, valor que nunca foi atingido.

ENSAIO 14



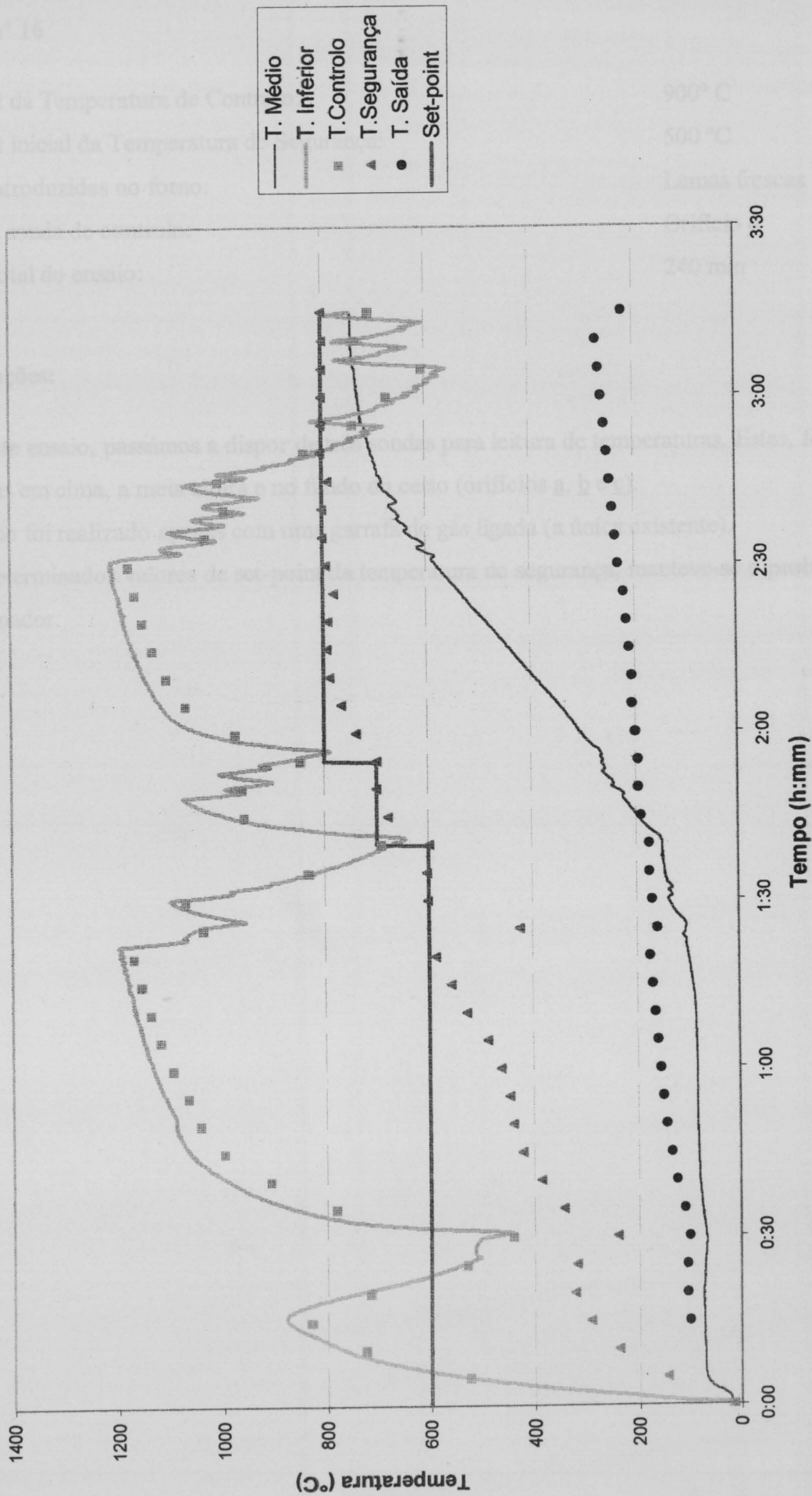
Ensaio nº 15

Set-point da Temperatura de Controlo:	1000° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	600 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas frescas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	195 min

Observações:

- As duas sondas para leitura de temperaturas disponíveis, foram colocadas a meia altura e no fundo do cesto, ou seja, nos orifícios a e c.
- A pressão do gás propano de alimentação começou a diminuir, assim como a temperatura de controlo e a temperatura de segurança. Posto isto, mudou-se uma das garrafas de gás aos 26 min (só existia uma garrafa de gás para substituição).
- O problema de o queimador desligar quando se atinge o set-point da temperatura de segurança, manteve-se no decorrer deste ensaio. Para o set-point de 800 °C, só a partir da 8ª vez que este foi atingido é que o queimador ligou automaticamente.

ENSAIO 15



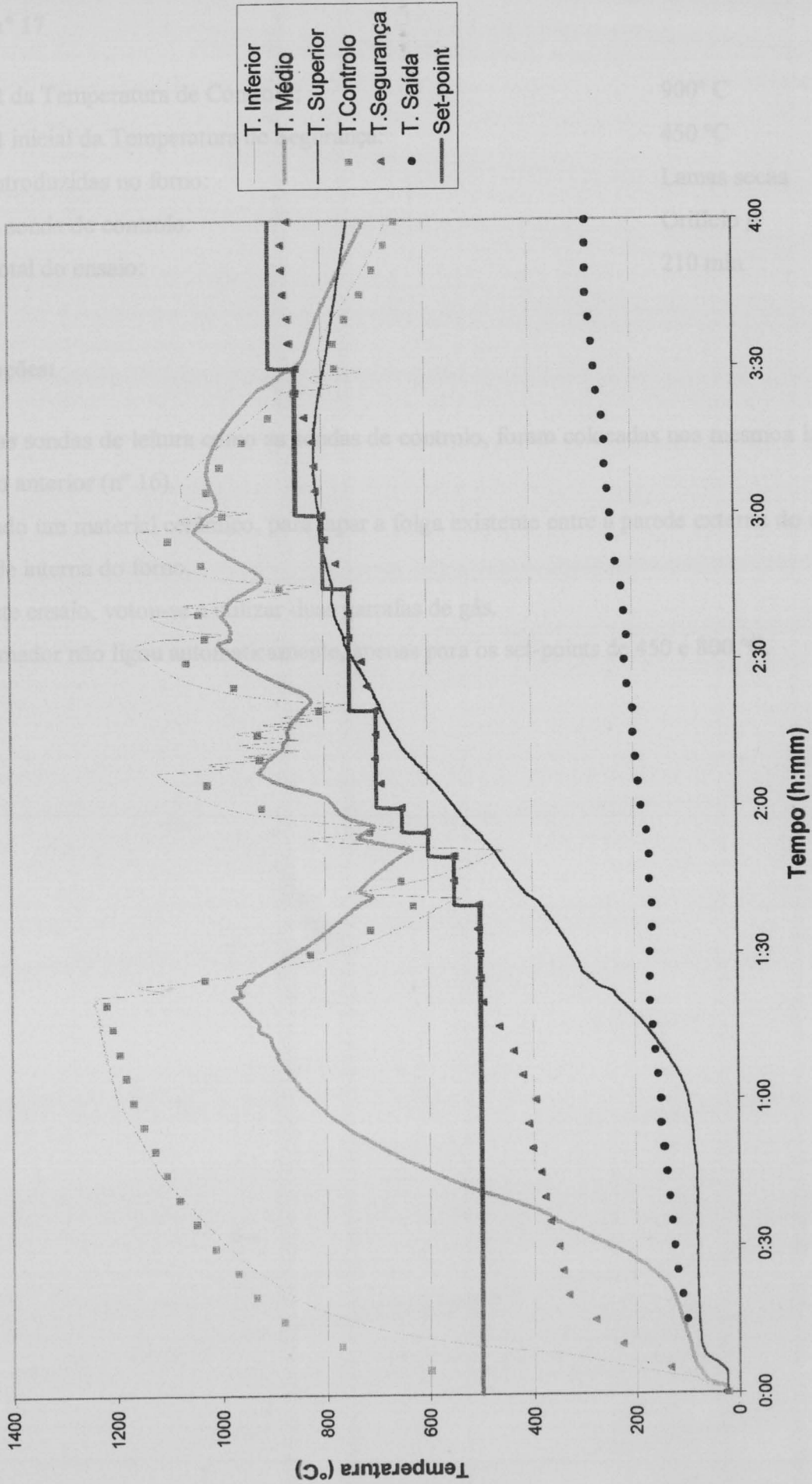
Ensaio n° 16

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	500 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas frescas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	240 min

Observações:

- Para este ensaio, passámos a dispor de três sondas para leitura de temperaturas. Estas, foram colocadas em cima, a meia altura e no fundo do cesto (orifícios a, b e c).
- O ensaio foi realizado apenas com uma garrafa de gás ligada (a única existente).
- Para determinados valores de set-point da temperatura de segurança, manteve-se o problema do queimador.

ENSAIO 16



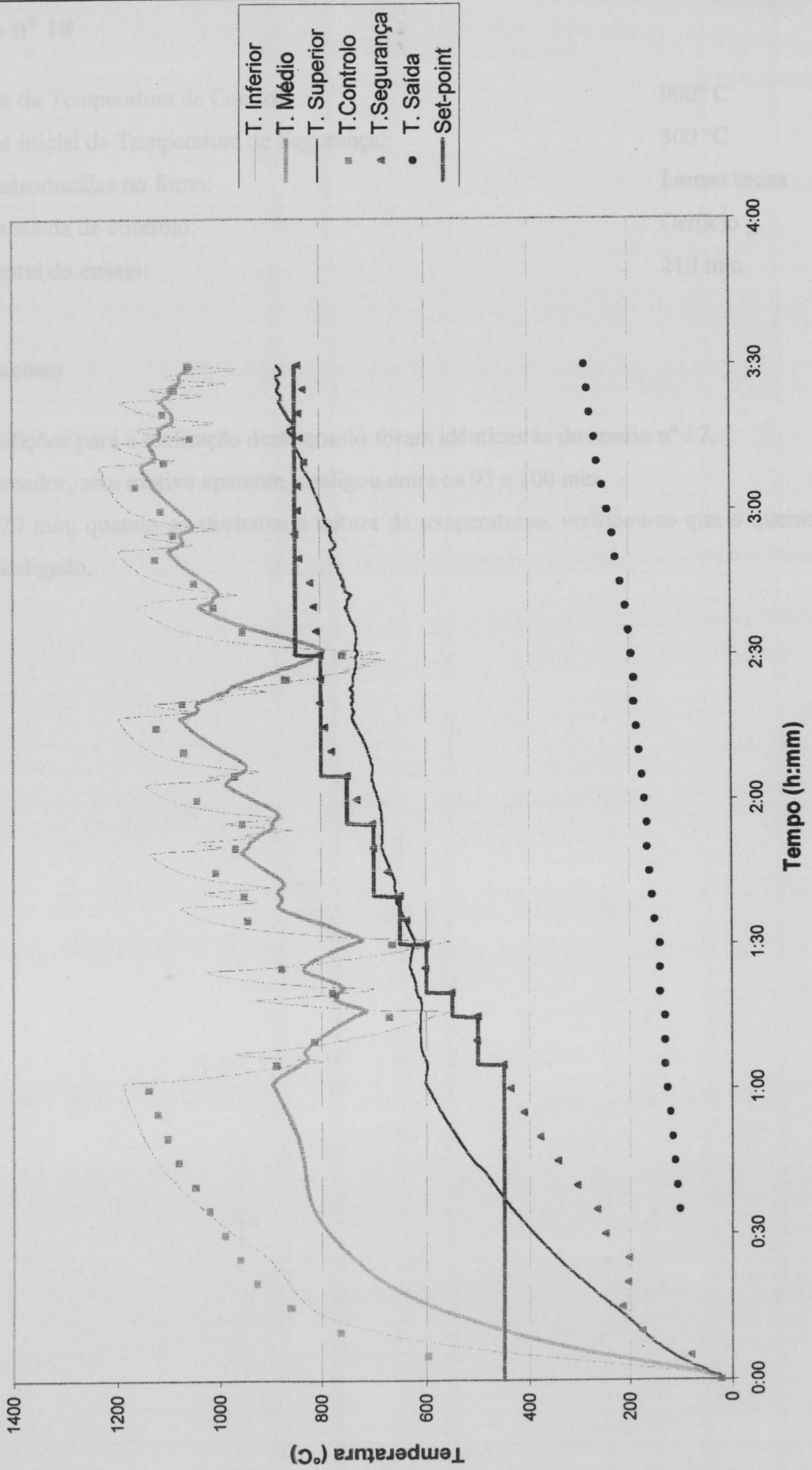
Ensaio nº 17

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	450 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	210 min

Observações:

- Tanto as sondas de leitura como as sondas de controlo, foram colocadas nos mesmos locais do ensaio anterior (nº 16).
- Foi usado um material cerâmico, para tapar a folga existente entre a parede externa do cesto e a parede interna do forno.
- Para este ensaio, votou-se a utilizar duas garrafas de gás.
- O queimador não ligou automaticamente, apenas para os set-points de 450 e 800 °C.

ENSAIO 17



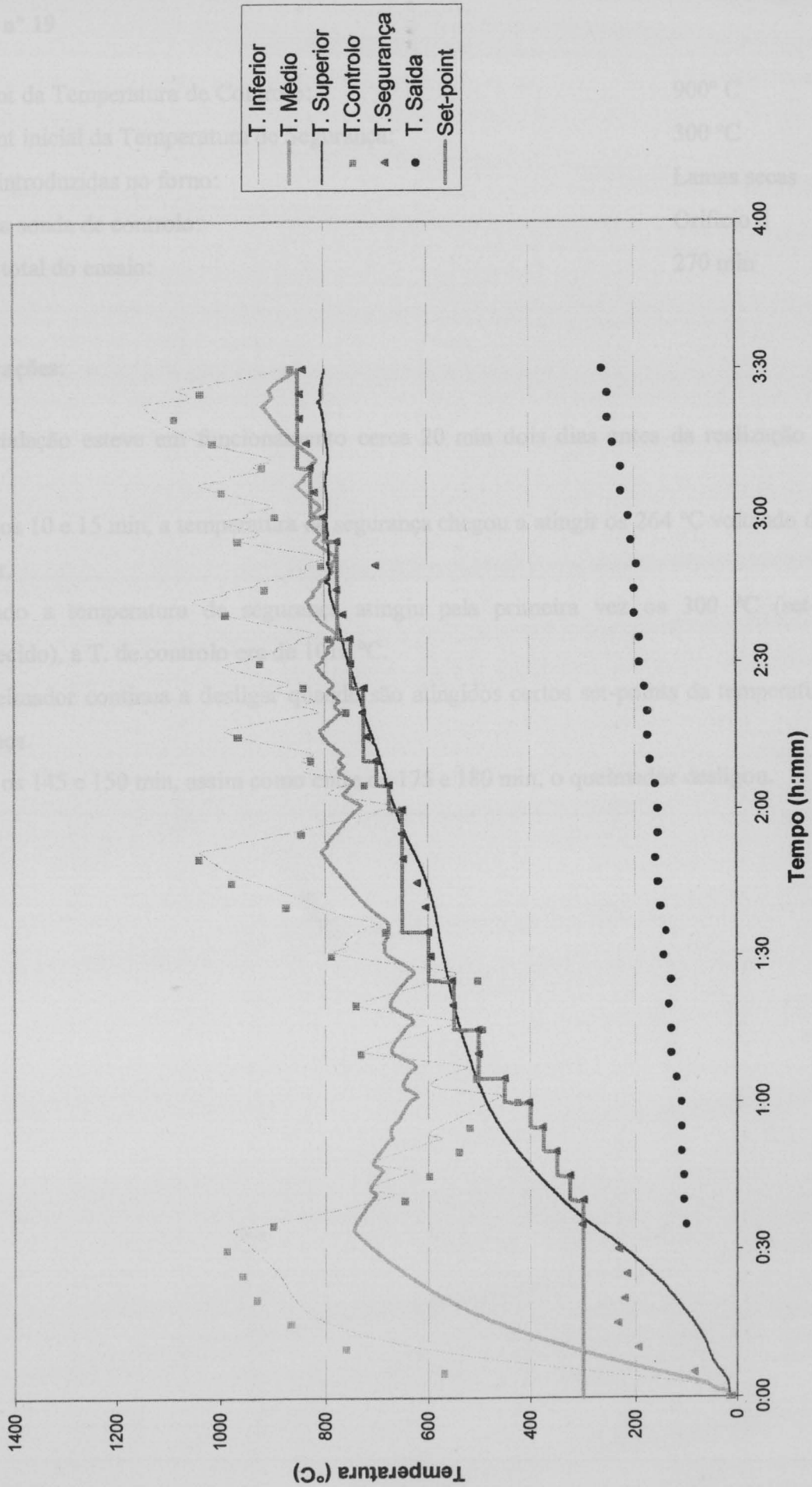
Ensaio nº 18

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	300 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	210 min

Observações:

- As condições para a realização deste ensaio foram idênticas às do ensaio nº 17.
- O queimador, sem motivo aparente, desligou entre os 95 e 100 min.
- Aos 170 min, quando se efectuava a leitura de temperaturas, verificou-se que o queimador estava desligado.

ENSAIO 18



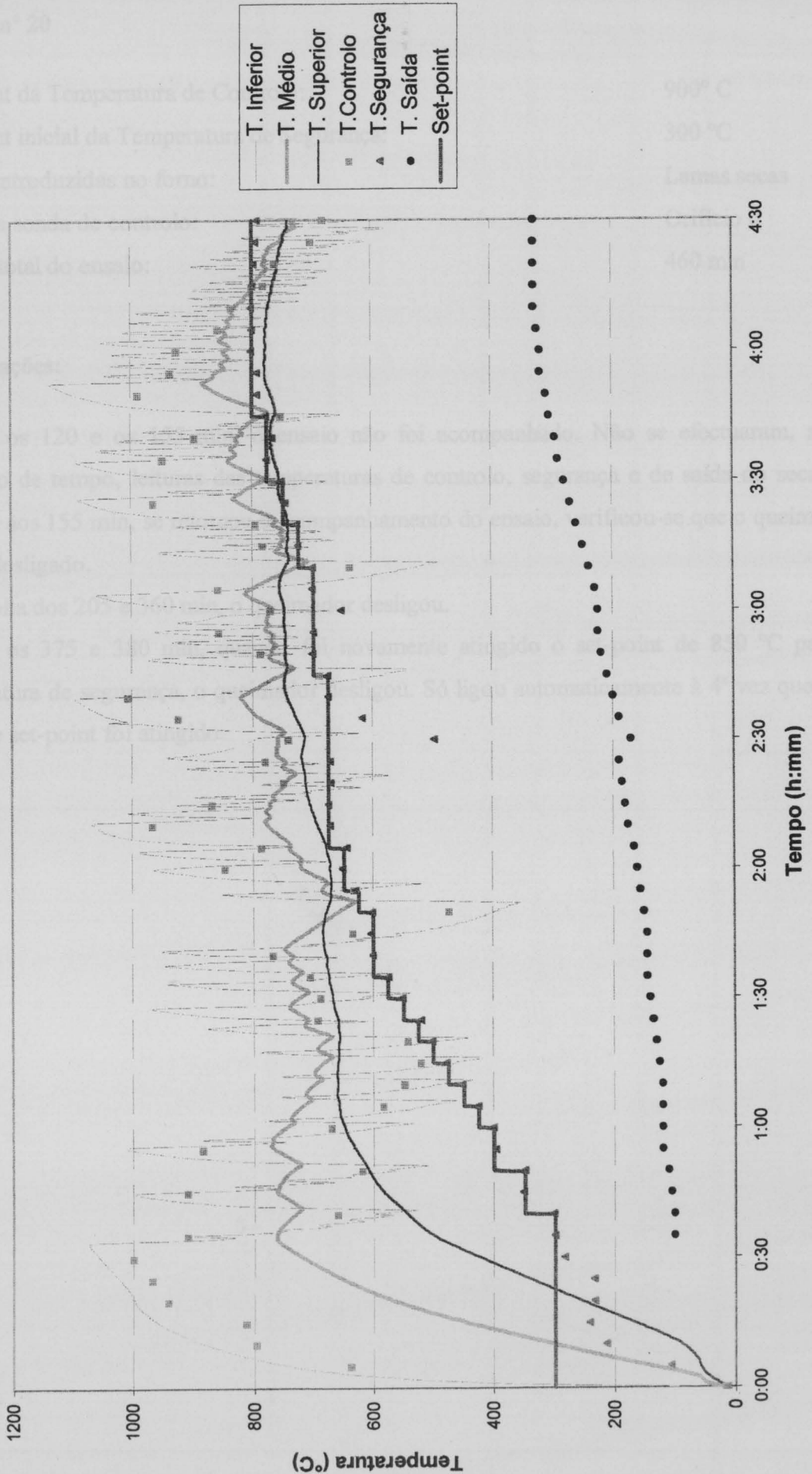
Ensaio n° 19

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	300 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	270 min

Observações:

- A instalação esteve em funcionamento cerca 20 min dois dias antes da realização deste ensaio.
- Entre os 10 e 15 min, a temperatura de segurança chegou a atingir os 264 °C voltando depois a descer.
- Quando a temperatura de segurança atingiu pela primeira vez os 300 °C (set-point estabelecido), a T. de controlo era de 1018 °C.
- O queimador continua a desligar quando são atingidos certos set-points da temperatura de segurança.
- Entre os 145 e 150 min, assim como entre os 175 e 180 min, o queimador desligou.

ENSAIO 19



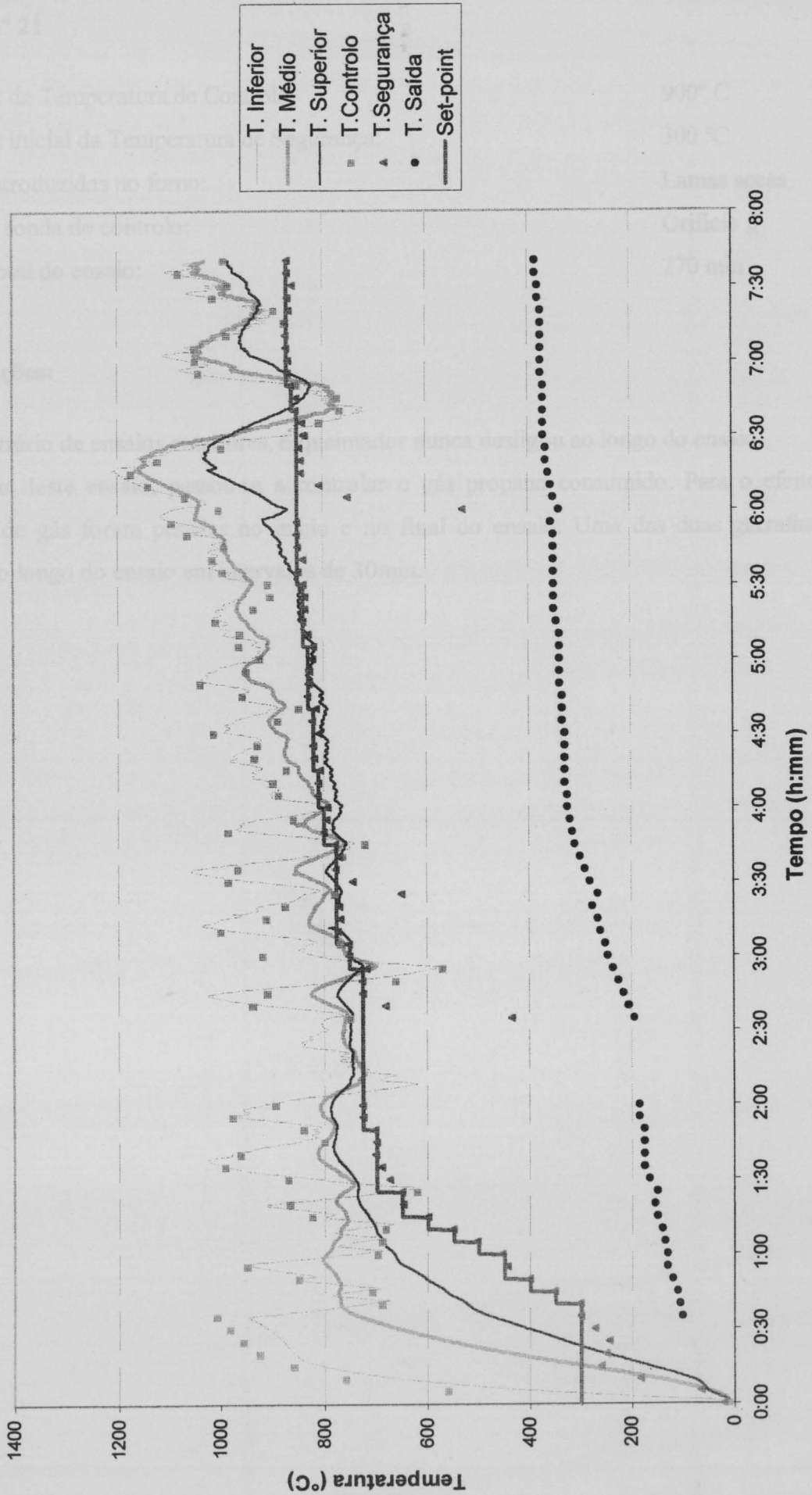
Ensaio n° 20

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	300 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	460 min

Observações:

- Entre os 120 e os 155 min, o ensaio não foi acompanhado. Não se efectuaram, neste intervalo de tempo, leituras das temperaturas de controlo, segurança e de saída do secador. Quando aos 155 min, se retomou o acompanhamento do ensaio, verificou-se que o queimador estava desligado.
- Por volta dos 205 e 360 min, o queimador desligou.
- Entre os 375 e 380 min, quando foi novamente atingido o set-point de 850 °C para a temperatura de segurança, o queimador desligou. Só ligou automaticamente à 4ª vez que este valor de set-point foi atingido.

ENSAIO 20



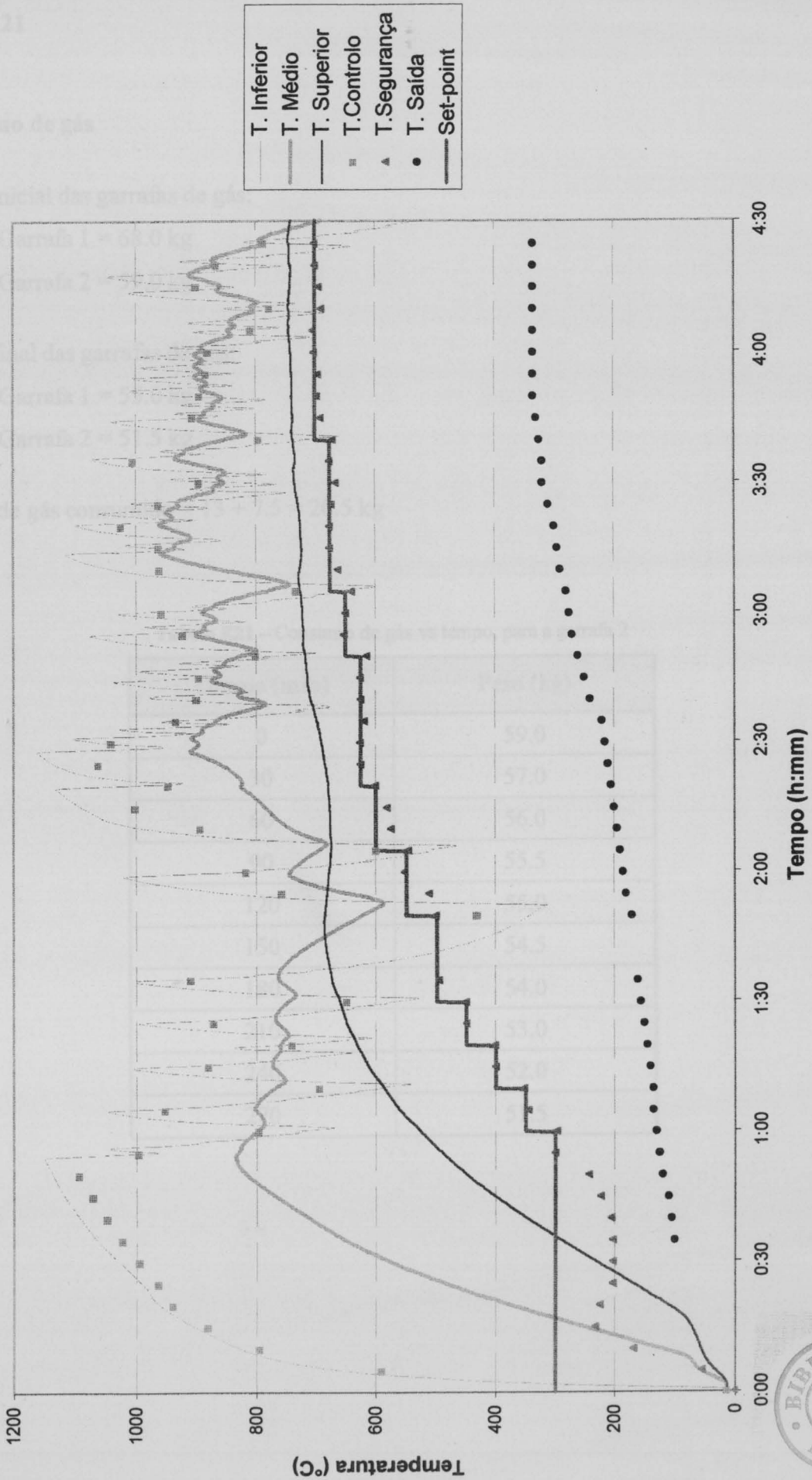
Ensaio nº 21

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	300 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício d
Tempo total do ensaio:	270 min

Observações:

- Ao contrário de ensaios anteriores, o queimador nunca desligou ao longo do ensaio.
- A partir deste ensaio, passou-se a controlar o gás propano consumido. Para o efeito, as garrafas de gás foram pesadas no início e no final do ensaio. Uma das duas garrafas, foi pesada ao longo do ensaio em intervalos de 30min.

ENSAIO 21



Ensaio 21**Consumo de gás**

- Peso inicial das garrafas de gás:

Garrafa 1 = 68.0 kg

Garrafa 2 = 59.0 kg

- Peso final das garrafas de gás:

Garrafa 1 = 55.0 kg

Garrafa 2 = 51.5 kg

- Total de gás consumido = $13 + 7.5 = 20.5$ kg

Tabela E21 – Consumo de gás vs tempo, para a garrafa 2

Tempo (min)	Peso (kg)
0	59.0
30	57.0
60	56.0
90	55.5
120	55.0
150	54.5
180	54.0
210	53.0
240	52.0
270	51.5

Ensaio 21

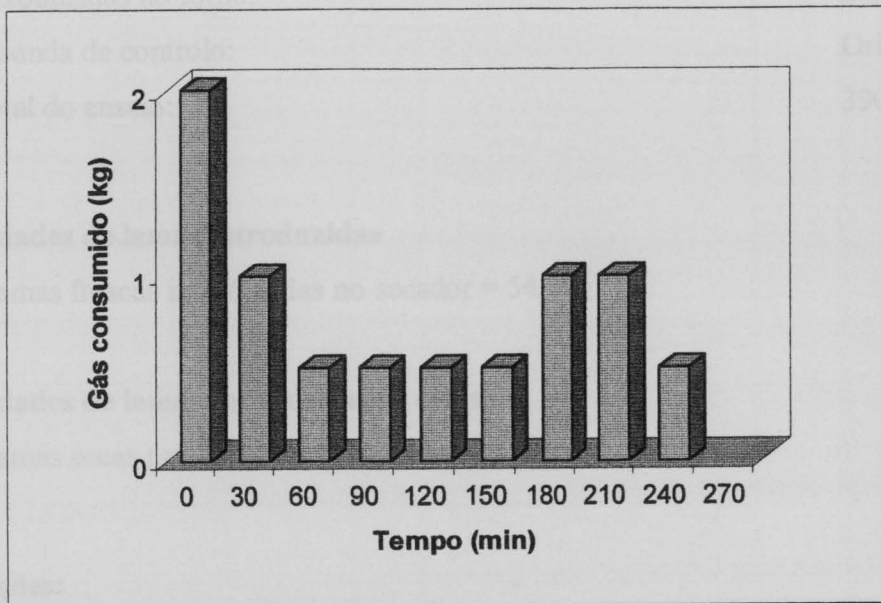


Figura E21.2 – Consumo de gás em função do tempo, para a garrafa 2

Ensaio nº 22

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	300 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício d
Tempo total do ensaio:	390 min

- Quantidades de lamas introduzidas

Lamas frescas introduzidas no secador = 54.5kg

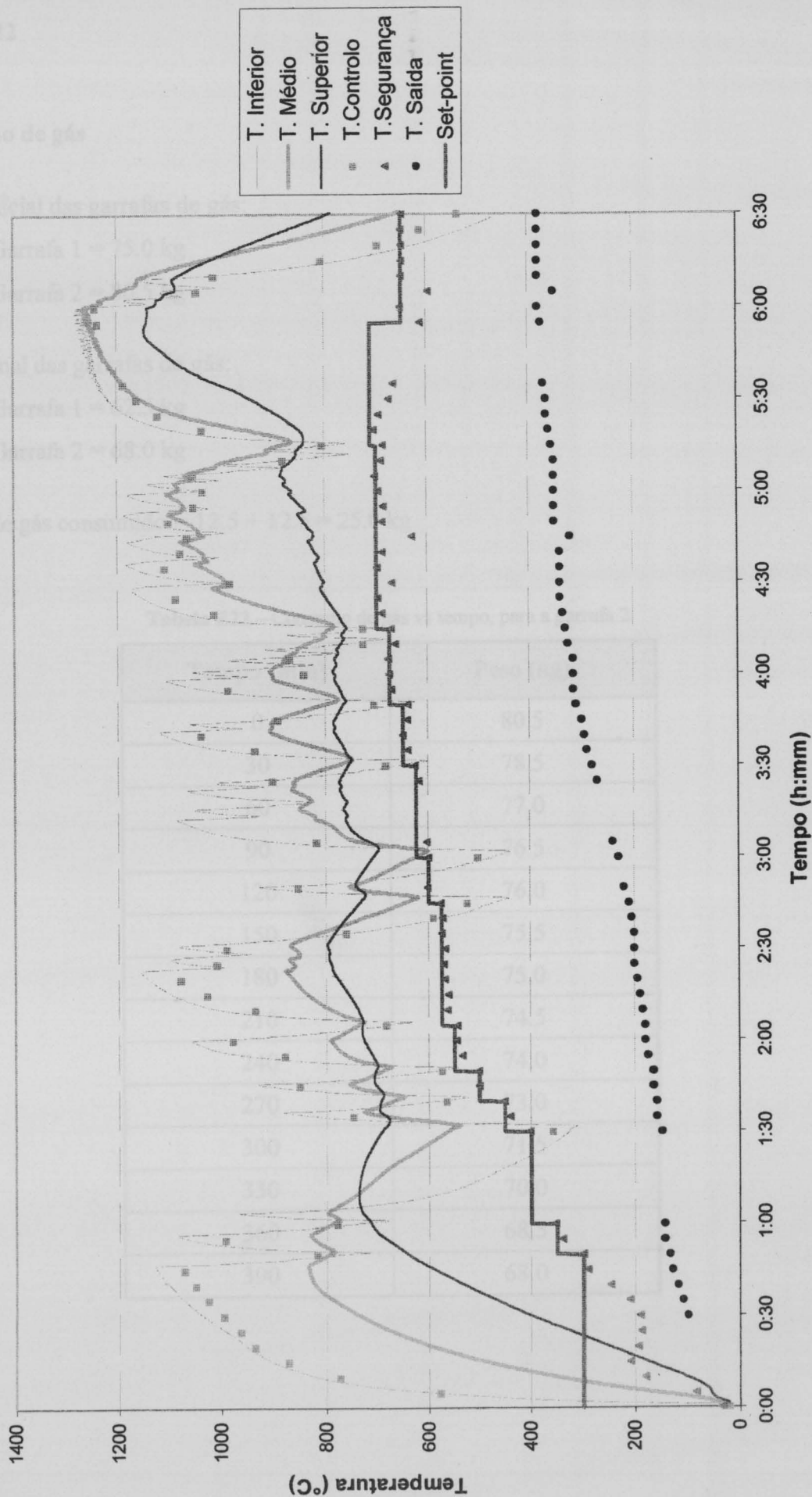
- Quantidades de lamas retiradas após o ensaio

Lamas secas provenientes do secador = 35kg

Observações:

- A partir deste ensaio, para além de se controlar o consumo de gás propano de alimentação, passou-se também a pesar a quantidade de lamas introduzidas e retiradas do forno e do secador.

ENSAIO 22



Ensaio 22**Consumo de gás**

- Peso inicial das garrafas de gás:

Garrafa 1 = 75.0 kg

Garrafa 2 = 80.5 kg

- Peso final das garrafas de gás:

Garrafa 1 = 62.5 kg

Garrafa 2 = 68.0 kg

- Total de gás consumido = 12.5 + 12.5 = 25.0 kg

Tabela E22 – Consumo de gás vs tempo, para a garrafa 2

Tempo (min)	Peso (kg)
0	80.5
30	78.5
60	77.0
90	76.5
120	76.0
150	75.5
180	75.0
210	74.5
240	74.0
270	73.0
300	71.5
330	70.0
360	68.5
390	68.0

Ensaio 22

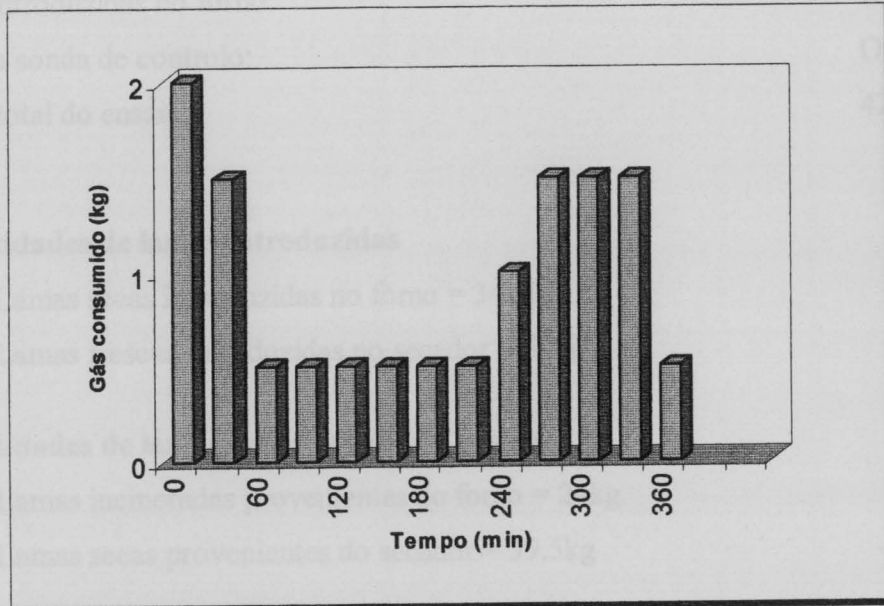


Figura E22.2 – Consumo de gás em função do tempo, para a garrafa 2

Ensaio nº 23

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	300 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício d
Tempo total do ensaio:	420 min

- Quantidades de lamas introduzidas

Lamas secas introduzidas no forno = 34.5kg

Lamas frescas introduzidas no secador = 58kg

- Quantidades de lamas retiradas após o ensaio

Lamas incineradas provenientes do forno = 24kg

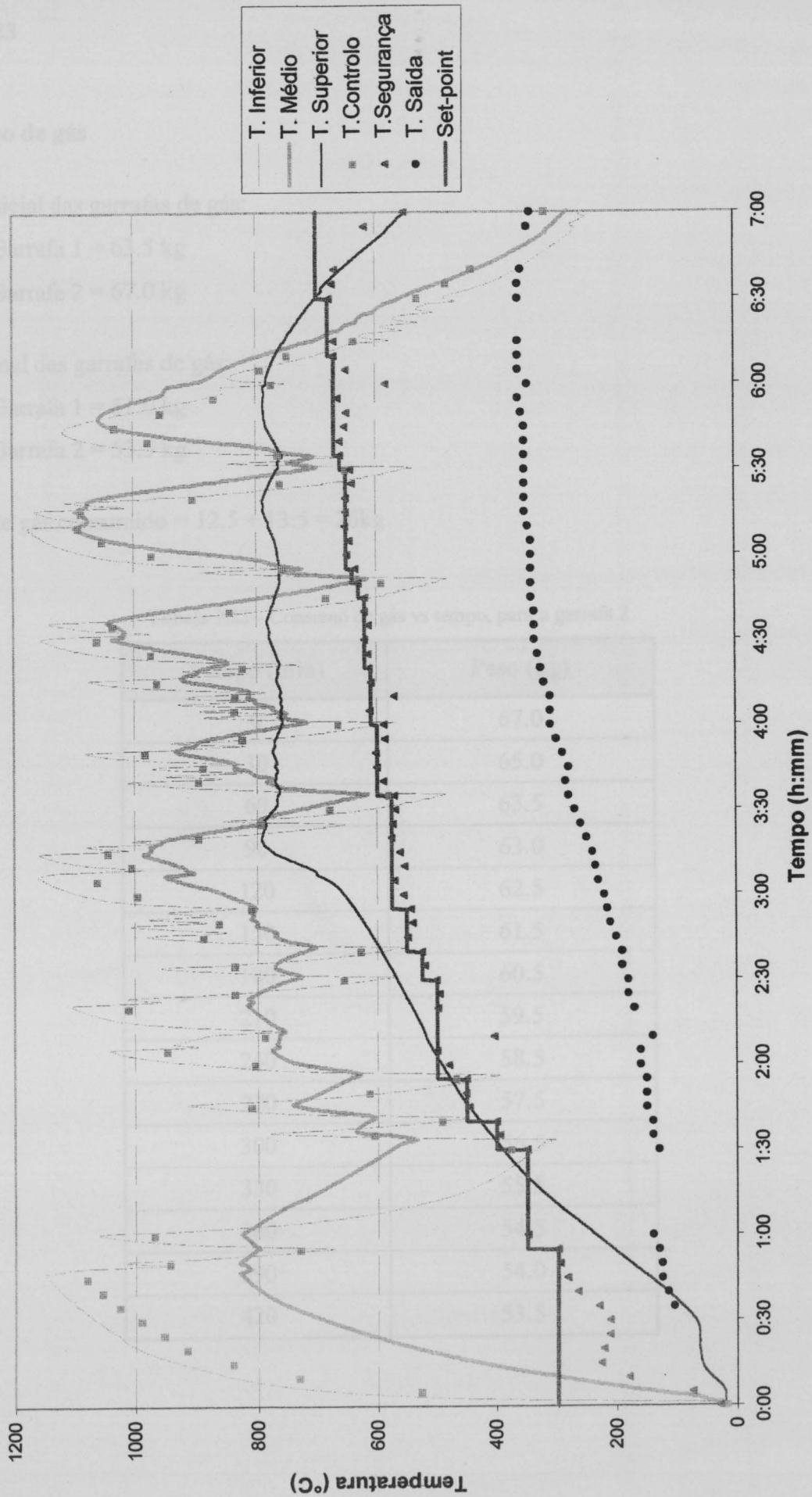
Lamas secas provenientes do secador = 39.5kg

- Observações:

- O queimador desligou várias vezes durante o ensaio, principalmente quando era atingido um determinado valor de set-point da temperatura de segurança.

- Por volta dos 360min, as diversas temperaturas começaram a diminuir, pois as garrafas de gás encontravam-se quase vazias. Optou-se então por dar como terminado o ensaio aos 420min.

ENSAIO 23



Ensaio 23**Consumo de gás**

- Peso inicial das garrafas de gás:

Garrafa 1 = 63.5 kg

Garrafa 2 = 67.0 kg

- Peso final das garrafas de gás:

Garrafa 1 = 51.0 kg

Garrafa 2 = 53.5 kg

- Total de gás consumido = 12.5 + 13.5 = 26kg

Tabela E23 – Consumo de gás vs tempo, para a garrafa 2

Tempo (min)	Peso (kg)
0	67.0
30	65.0
60	63.5
90	63.0
120	62.5
150	61.5
180	60.5
210	59.5
240	58.5
270	57.5
300	56.5
330	55.5
360	54.5
390	54.0
420	53.5

Ensaio 23

Set-point da Temperatura de Controlo: 500 °C

Set-point inicial da Temperatura de Separação: 300 °C

Lamas introduzidas no forno: Lamas secas

Local da sonda de controlo: Orifício 1

Tempo

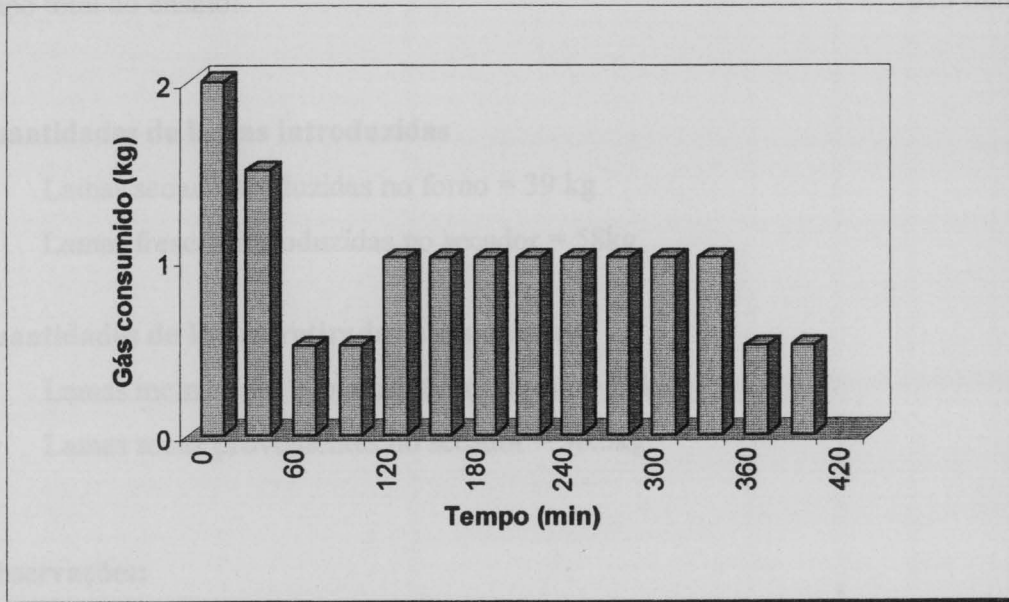


Figura E23.2 – Consumo de gás em função do tempo, para a garrafa 2



Ensaio n° 24

Set-point da Temperatura de Controlo:	900° C
Set-point inicial da Temperatura de Segurança:	300 °C
Lamas introduzidas no forno:	Lamas secas
Local da sonda de controlo:	Orifício <u>d</u>
Tempo total do ensaio:	525 min

- Quantidades de lamas introduzidas

Lamas secas introduzidas no forno = 39 kg

Lamas frescas introduzidas no secador = 58kg

- Quantidades de lamas retiradas após o ensaio

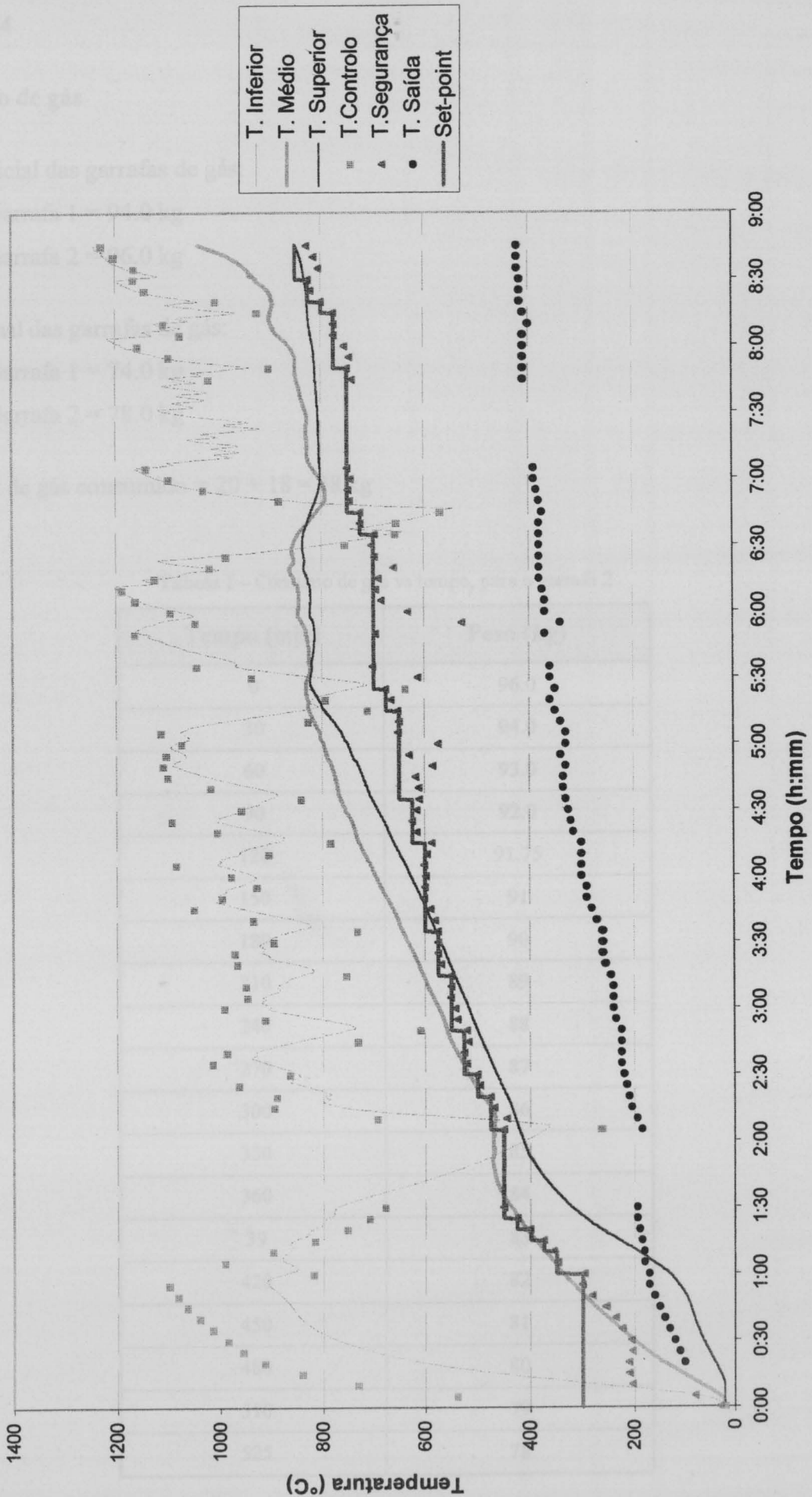
Lamas incineradas provenientes do forno = 27kg

Lamas secas provenientes do secador = 36.5kg

- Observações:

- O queimador desligou várias vezes durante o ensaio, principalmente quando era atingido um determinado valor de set-point da temperatura de segurança.

ENSAIO 24



Ensaio 24**Consumo de gás**

- Peso inicial das garrafas de gás:

Garrafa 1 = 94.0 kg

Garrafa 2 = 96.0 kg

- Peso final das garrafas de gás:

Garrafa 1 = 74.0 kg

Garrafa 2 = 78.0 kg

- Total de gás consumido = 20 + 18 = 38 kg

Tabela I – Consumo de gás vs tempo, para a garrafa 2

Tempo (min)	Peso (kg)
0	96.0
30	94.0
60	93.0
90	92.0
120	91.75
150	91
180	90
210	89
240	88
270	87
300	86
330	85
360	84
390	83
420	82
450	81
480	80
510	79
525	78

Ensaio 24

3 – CARBONATAÇÕES, DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE DESCOLORAÇÃO DAS LAMAS INCINERADAS.

Uma das técnicas usadas na refinação de açúcar para a clarificação das licors de afinação é a carbonatação. Nesta operação, adiciona-se hidróxido de cálcio ao licor e provoca-se a sua precipitação por ação de dióxido de carbono. Este processo é muito eficiente, permitindo obter licors com boas propriedades de descoloração. Em geral, a descoloração total ou parcial do licor é conseguida com o consumo de 0,5 a 1,0 kg de gás por litro de licor.

As lamas incineradas possuem boas propriedades de descoloração. Em geral, a descoloração total ou parcial do licor é conseguida com o consumo de 0,5 a 1,0 kg de gás por litro de licor. Para esta finalidade, foram realizados ensaios de carbonatação a escala laboratorial, usando-se 700ml de licor. O procedimento utilizado era o seguinte:

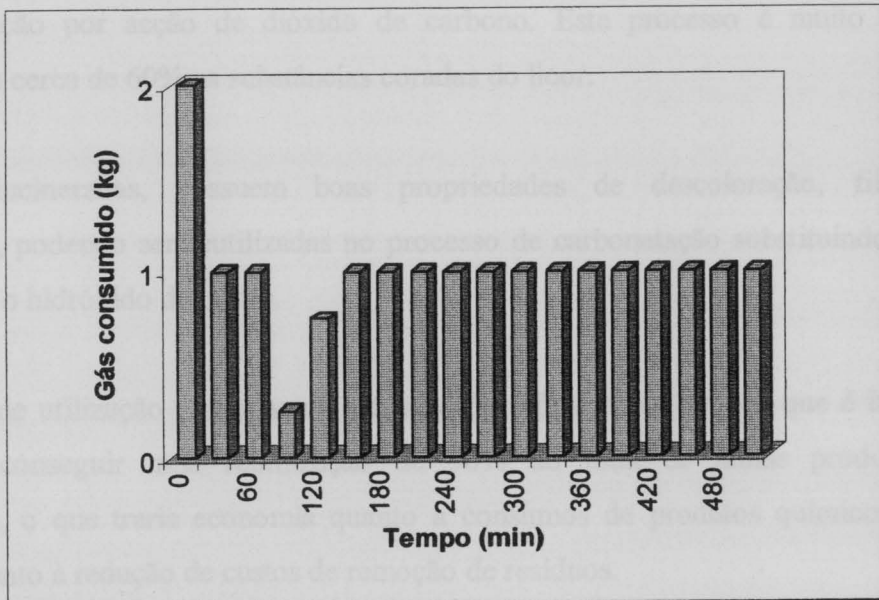


Figura E24.2 – Consumo de gás em função do tempo, para a garrafa 2

Com vista à determinação da eficiência de descoloração das lamas incineradas, realizaram-se diversas carbonatações utilizando mistura de sal (hidróxido de cálcio) e lamas incineradas em diferentes percentagens:

Comerçaram-se por realizar ensaios de carbonatação à escala laboratorial usando 700ml de licor. O procedimento utilizado era o seguinte:

- Aquecimento de 305g (≈ 700ml) de licor de afinação, previamente diluído a 40°Brix, até cerca de 80°C (temperatura de operação habitual).
- Adição de leite de cal (ou lamas incineradas), concentrando-se a 9,8% de CaO (relação a matéria seca do licor, ao licor (Anexo II)).
- Leitura do pH cinco minutos após a adição de leite de cal (ou lamas incineradas) ao licor;
- Borbulhamento de gás (contando CO₂ utilizado na instalação laboratorial).
- Leitura contínua do pH à temperatura de operação (T ≈ 80°C). Paragem da operação para 7,3 < pH < 8,0;

3 – CARBONATAÇÕES, DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE DESCOLORAÇÃO DAS LAMAS INCINERADAS.

Uma das técnicas usadas na refinação de açúcar para a clarificação dos licores de afinação é a carbonatação. Nesta operação, adiciona-se hidróxido de cálcio ao licor e provoca-se a sua precipitação por acção de dióxido de carbono. Este processo é muito eficiente, reduzindo em cerca de 60% as substâncias coradas do licor.

As lamas incineradas, possuem boas propriedades de descoloração, filtração e alcalinização, podendo ser reutilizadas no processo de carbonatação substituindo total ou parcialmente o hidróxido de cálcio.

Por esta via de utilização de lamas na indústria de refinação de açúcar, que é inovadora, pretende-se conseguir uma reutilização de 50% do total de lamas produzidas na carbonatação, o que traria economia quanto a consumos de produtos químicos, água e energia e quanto à redução de custos de remoção de resíduos.

Com vista à determinação da eficiência de descoloração das lamas incineradas, realizaram-se diversas carbonatações utilizando misturas de cal (hidróxido de cálcio) e lamas incineradas em diferentes percentagens.

Começaram-se por realizar ensaios de carbonatação à escala laboratorial usando 700ml de licor. O procedimento utilizado era o seguinte:

- Aquecimento de 805g (\cong 700ml) de licor de afinação, previamente diluído a 40°Brix, até cerca de 80°C (temperatura de operação fabril);
- Adição de leite de cal (ou lamas incineradas), correspondendo a 0.8% de CaO sobre a matéria seca do licor, ao licor (Anexo II);
- Leitura do pH cinco minutos após a adição de leite de cal (ou lamas incineradas) ao licor;
- Borbulhamento de gás (contendo CO₂) utilizado na instalação fabril;
- Leitura contínua do pH à temperatura de operação ($T \cong 80^\circ\text{C}$). Paragem da operação para $7.8 < \text{pH} > 8.0$;

- Filtração do licor carbonatado e de afinação: adição de agente de filtração ao licor; filtração, por vácuo, utilizando um filtro whatman 42;
- Neutralização do licor filtrado com HCl e NaOH diluídos;
- Leitura da absorvância a 420nm e do Brix, para determinação da cor ICUMSA;
- Cálculo da percentagem de descoloração obtida (Anexo III).

Os valores de descoloração obtidos com cal e para um dado licor de afinação, não apresentavam uma proximidade coerente.

O cabo de ligação do eléctrodo ao medidor de pH apresentava algumas deficiências, pelo que foi substituído. Efectuou-se também uma cuidadosa limpeza do eléctrodo e passou-se a realizar as carbonatações com 1600ml de licor. Os resultados da percentagem de descoloração obtidos, continuaram a não apresentar uma proximidade aceitável.

Fizeram-se também ensaios com 1600ml de licor usando lamas incineradas (determinou-se previamente a % de CaO que estas continham), obtendo-se valores de percentagem de descoloração perto de 60%. Estes valores, no entanto, não foram reprodutíveis.

Numa segunda fase, foi implantado um vaso de carbonatação (Figura 6) com capacidade para 40000ml de licor. O vaso já existente (Anexo IV), foi modificado tendo em conta os condicionalismos do local onde foi instalado. Foram também feitas outras alterações para seu melhor funcionamento.

Dada a inexistência de uma linha de vapor de aquecimento no local, a serpentina de aquecimento foi substituída por uma resistência eléctrica. As paredes do vaso foram isoladas, para que as perdas de calor não fossem significativas.

Instalou-se um sistema de agitação, e foi feita uma ligação do gás usado nas carbonatações da fábrica.

Por fim foi instalada uma sonda de temperatura e um eléctrodo de pH, para seguir as condições de operação ao longo da carbonatação.

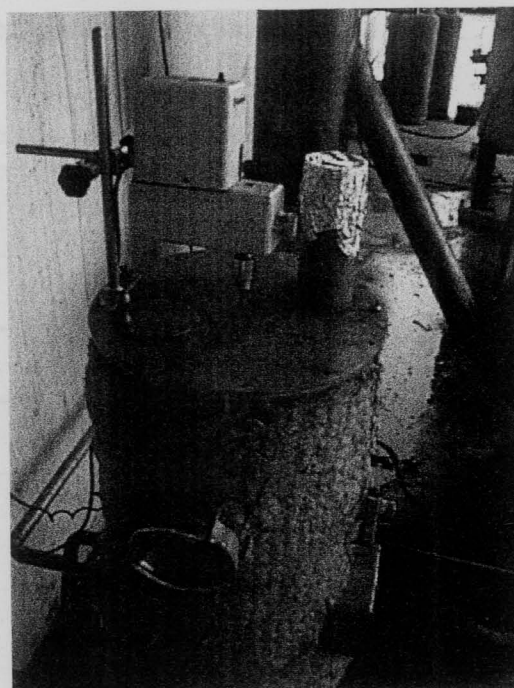


Figura 4 – Vaso de carbonatação

Antes de dar início às carbonatações, realizaram-se alguns ensaios com água. Estes serviram para calibrar o termostato da resistência de aquecimento, e ver qual o efeito do borbulhamento do gás a usar na carbonatação na temperatura.

Por fim, realizaram-se algumas carbonatações com 40000ml de licor a 40°Brix. O procedimento adoptado, foi semelhante ao descrito para as carbonatações realizadas à escala laboratorial.

As carbonatações foram realizadas com cal, e com misturas de cal e lamas incineradas nas seguintes proporções: 60% de cal e 40% de lamas; 30% de cal e 70% de lamas. Estas percentagens não são percentagens mássicas reais de cal e lamas, mas sim, percentagens de cálcio proveniente da cal e das lamas incineradas respectivamente.

A percentagem de cálcio, foi determinada previamente em amostras representativas de todo o cesto de incineração.

Foram usadas lamas correspondentes aos ensaios em que aparentemente houve uma maior conversão de carbonato a óxido de cálcio.

Os resultados obtidos, encontram-se descritos na tabela I.

Tabela I – Percentagens de descoloração obtidas.

% de Cal	% de Lamas	% Média de Descoloração
100	0	64.42
60	40	63.35
30	70	64.60

4 - CONCLUSÕES

As lamas de carbonatação, depois de incineradas, podem ser reutilizadas novamente no processo de refinação do açúcar (na carbonatação). Estas, possuem de facto boas propriedades de descoloração, como se comprova com as carbonatações realizadas no vaso piloto de carbonatação.

Nas carbonatações realizadas com a cal usada no processo, obtiveram-se percentagens de descoloração de 64.42%. Quando se usaram misturas de cal e lamas incineradas, os valores de descoloração obtidos foram muito semelhantes. Assim, para misturas de 60% de cal e 40% de lamas, houve uma descoloração de 63.35%, e para misturas de 30% de cal e 70% de lamas obtiveram-se valores de 64.60% (as percentagens das misturas, não são percentagens reais de cal e lamas, mas sim percentagens de cálcio proveniente da cal e das lamas incineradas).

Conclui-se então, que a nível de descoloração, será indiferente usar cal ou uma mistura de cal e lamas de carbonatação incineradas.

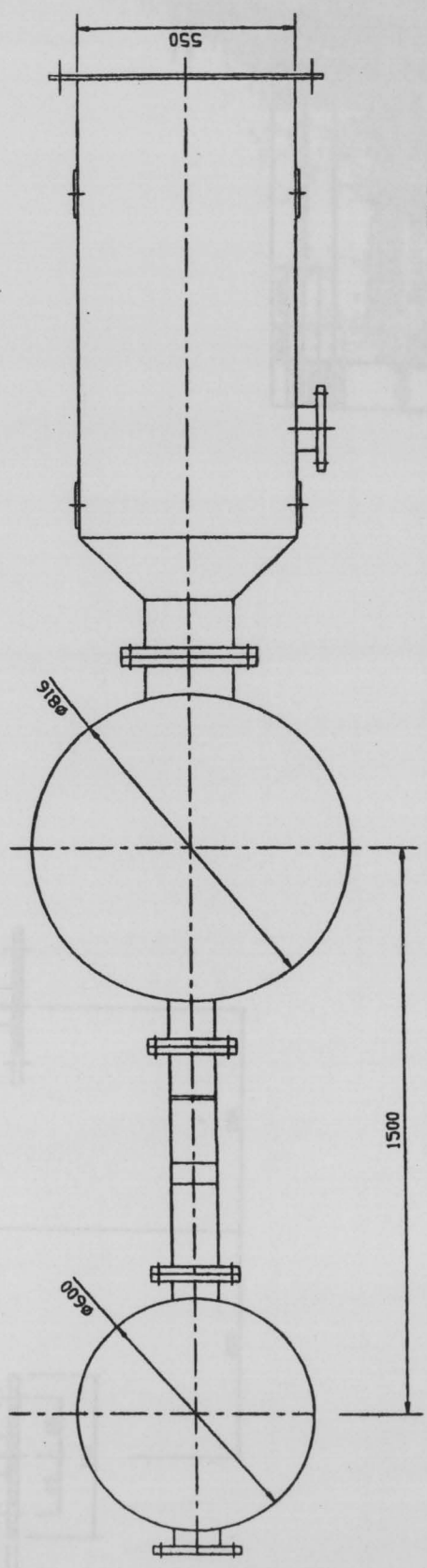
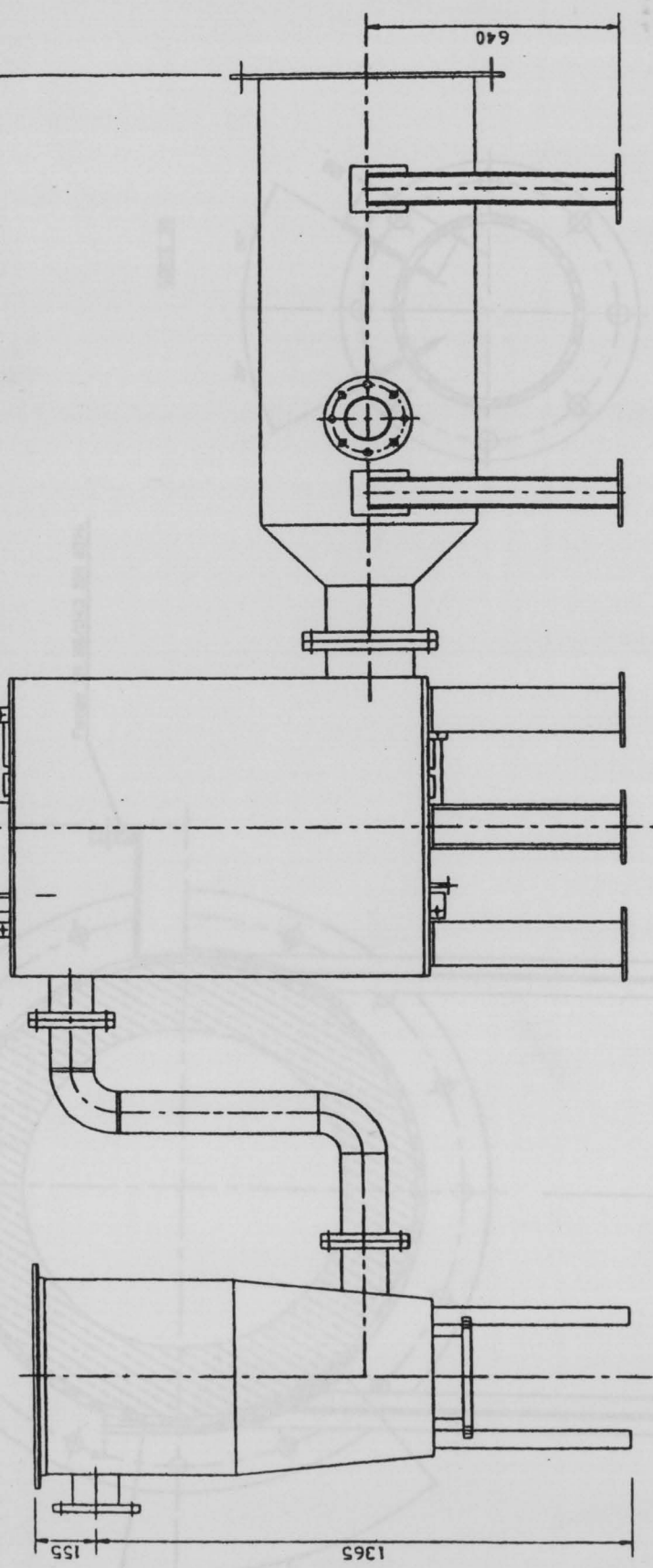
Quanto aos ensaios de incineração, verifica-se que não existe uma uniformidade de incineração no forno. Isto é, as lamas incineradas têm composição diferente dependendo da zona do forno de onde provêm. A heterogeneidade das lamas obtidas em cada ensaio poderá dever-se aos seguintes factores: inexistência de uniformidade de temperaturas ao longo do forno, heterogeneidade das lamas introduzidas no forno e a agregação das lamas dificultando a transferência de calor.

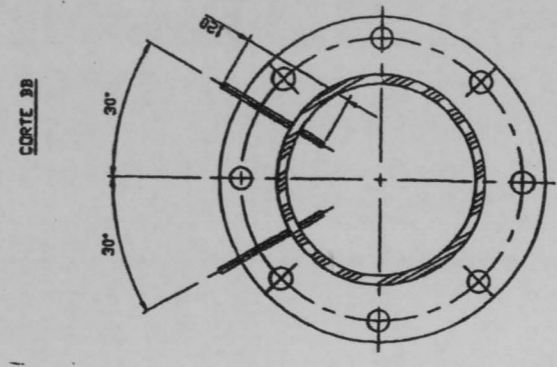
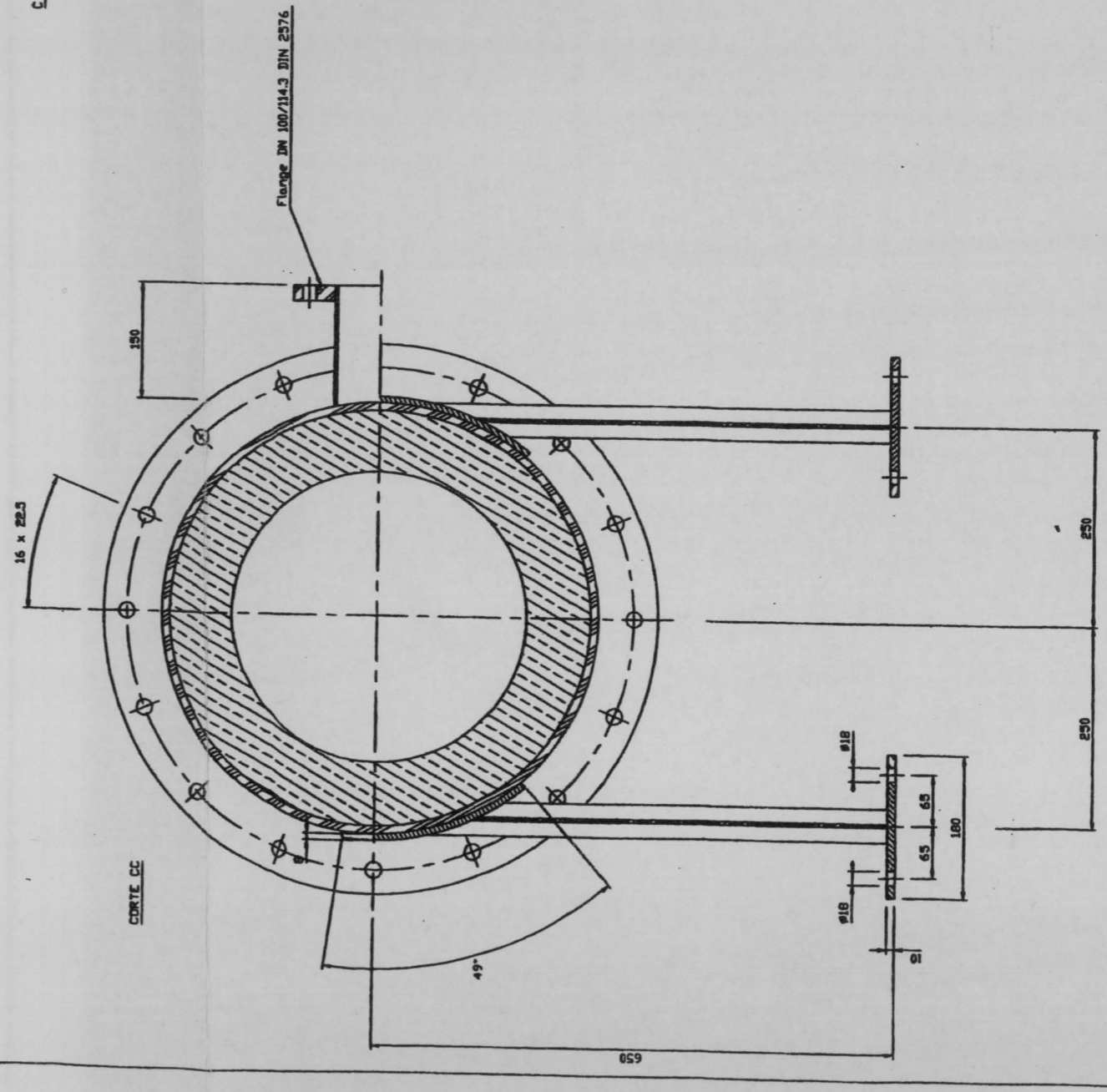
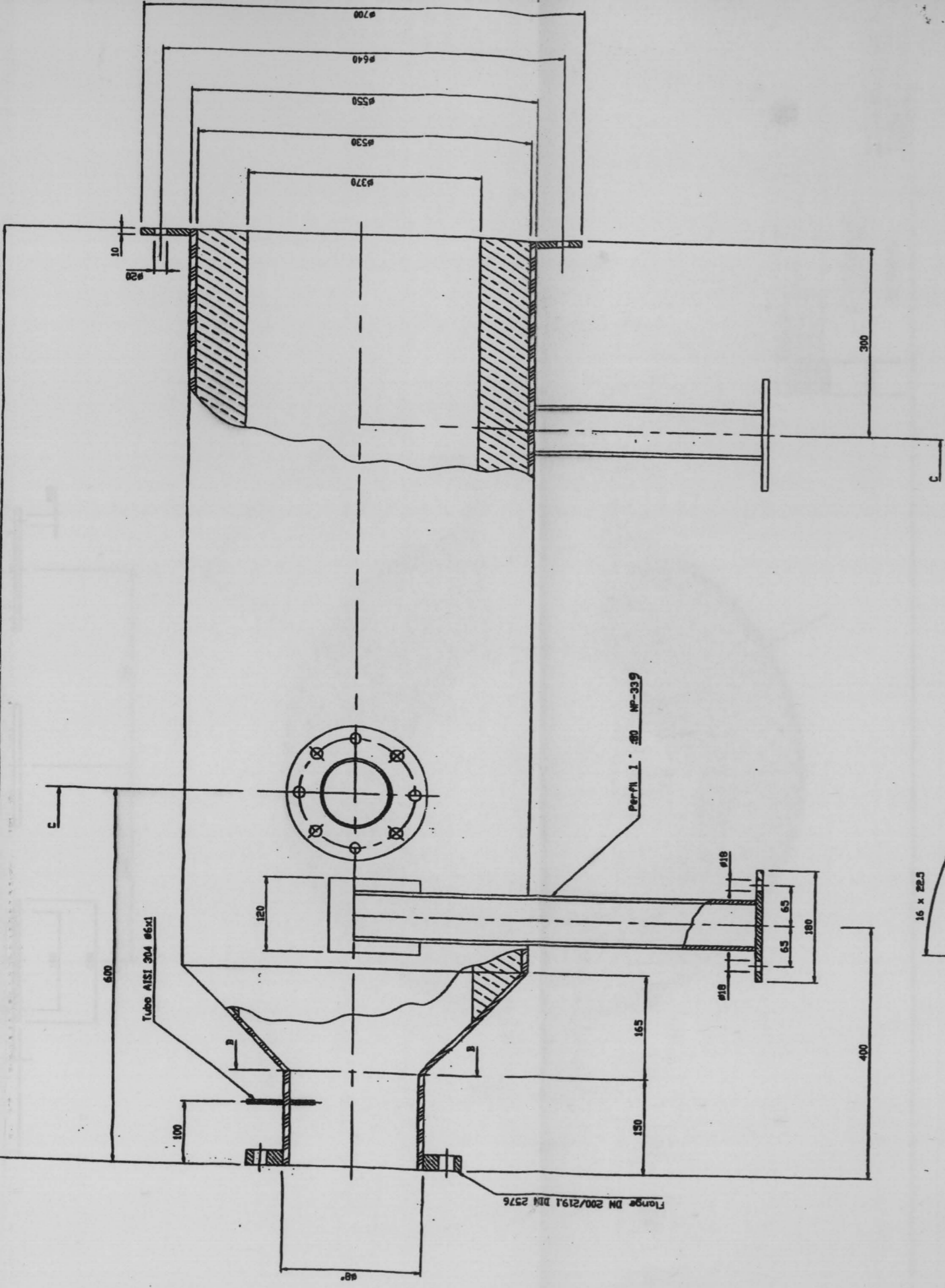
Resumindo, a reutilização de lamas de carbonatação no processo de refinação do açúcar, será viável, mediante um processo de incineração apropriado. Uma alternativa interessante a desenvolver, seria a incineração num forno rotativo.

ANEXO I

Plantas da instalação piloto de incineração

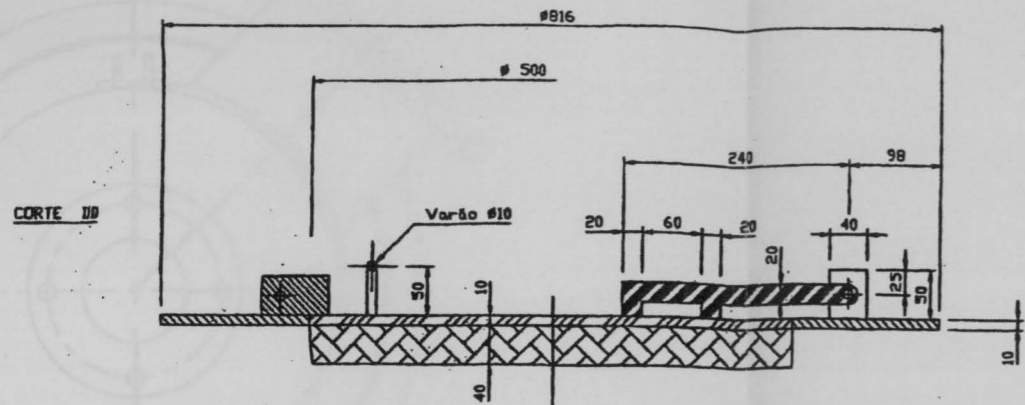




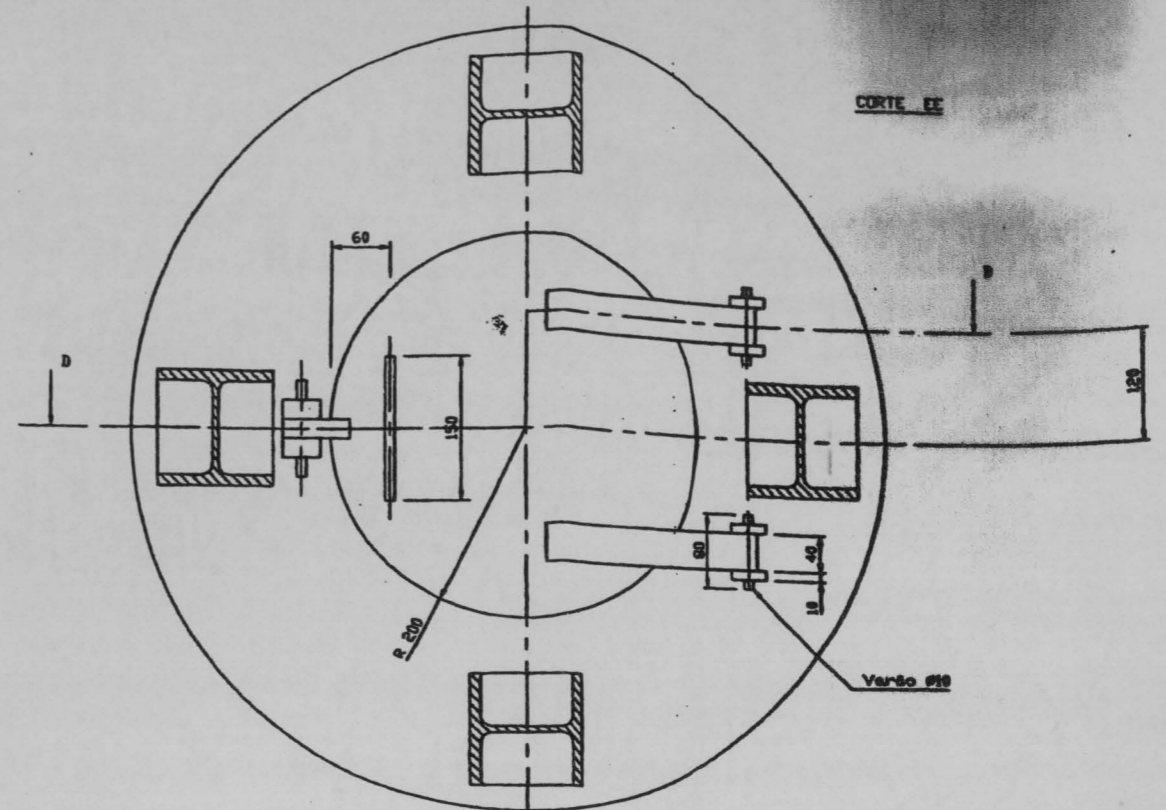
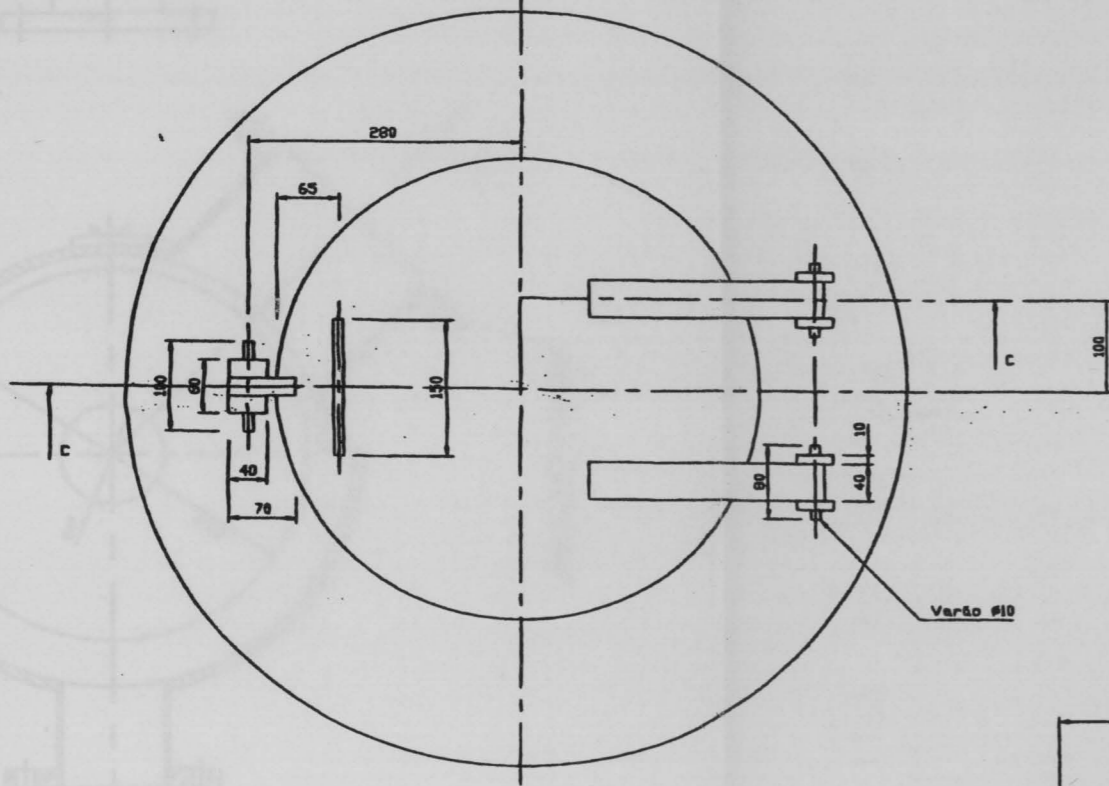


Proj. No.	Proj. Nome	Proj. Data	Proj. Escala
Proj. Rev.	Proj. Rev. Desc.	Proj. Rev. Data	Proj. Rev. Escala
Proj. Rev.	Proj. Rev. Desc.	Proj. Rev. Data	Proj. Rev. Escala
Proj. Rev.	Proj. Rev. Desc.	Proj. Rev. Data	Proj. Rev. Escala
Proj. Rev.	Proj. Rev. Desc.	Proj. Rev. Data	Proj. Rev. Escala
Proj. Rev.	Proj. Rev. Desc.	Proj. Rev. Data	Proj. Rev. Escala

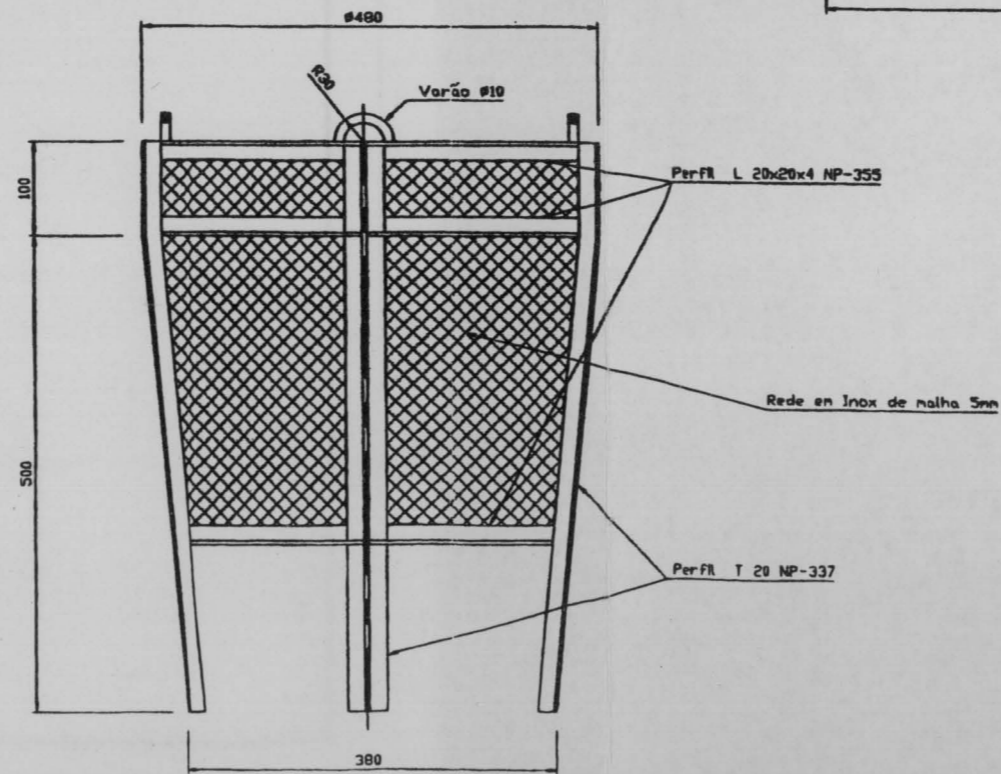
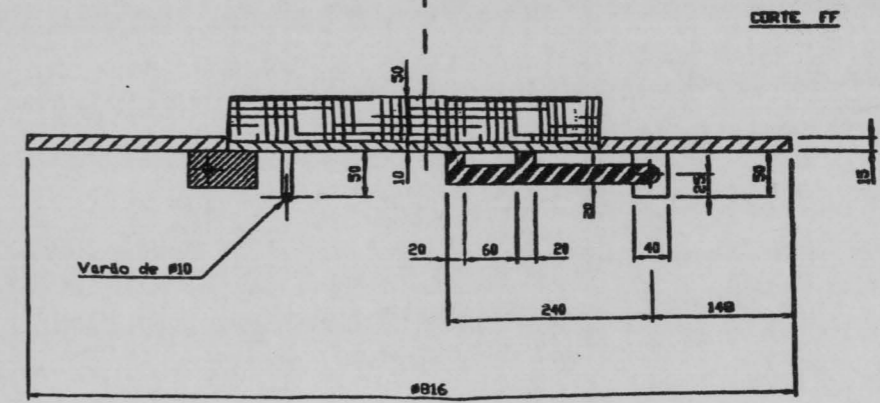
FERNALPHA
 DESENHO



Tampa Superior

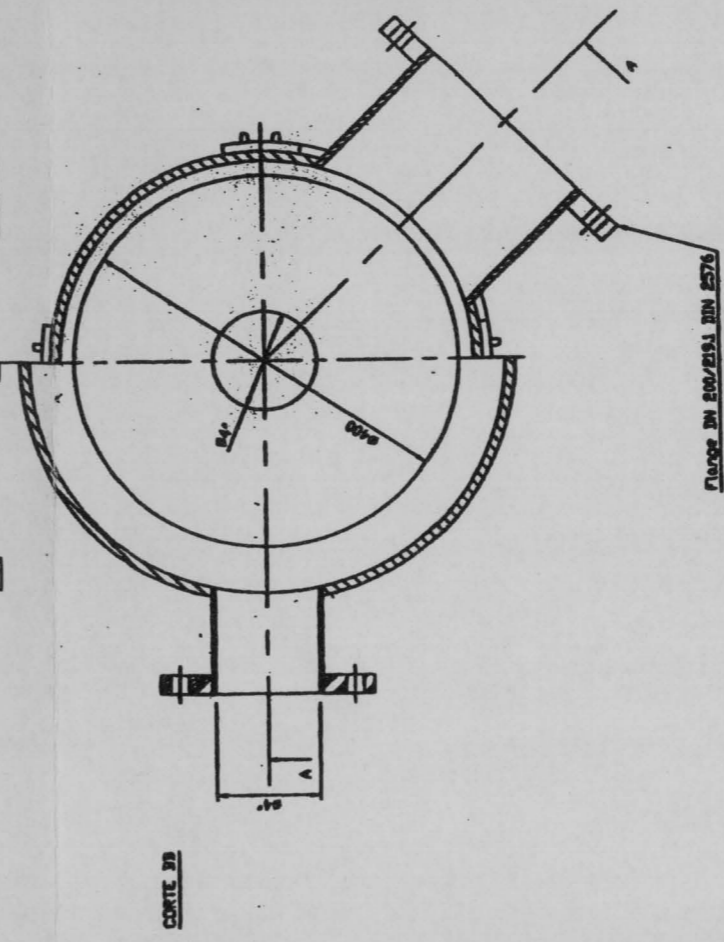
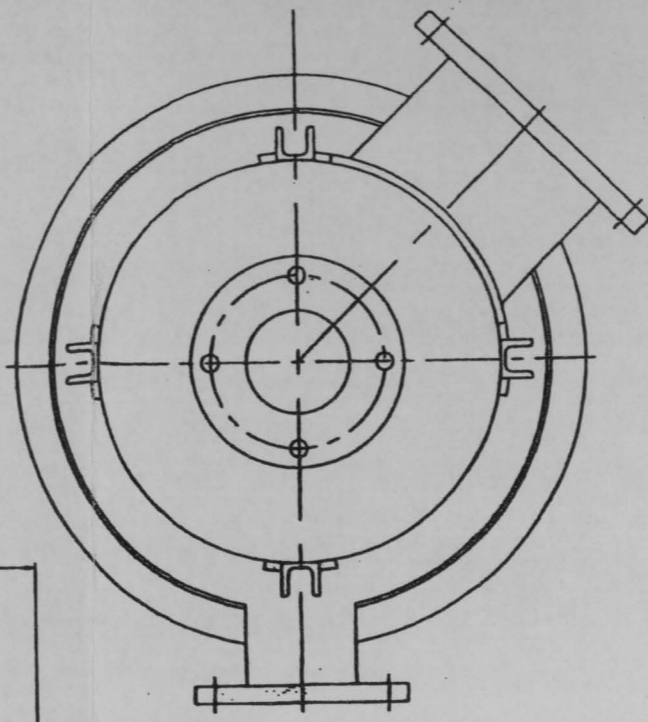
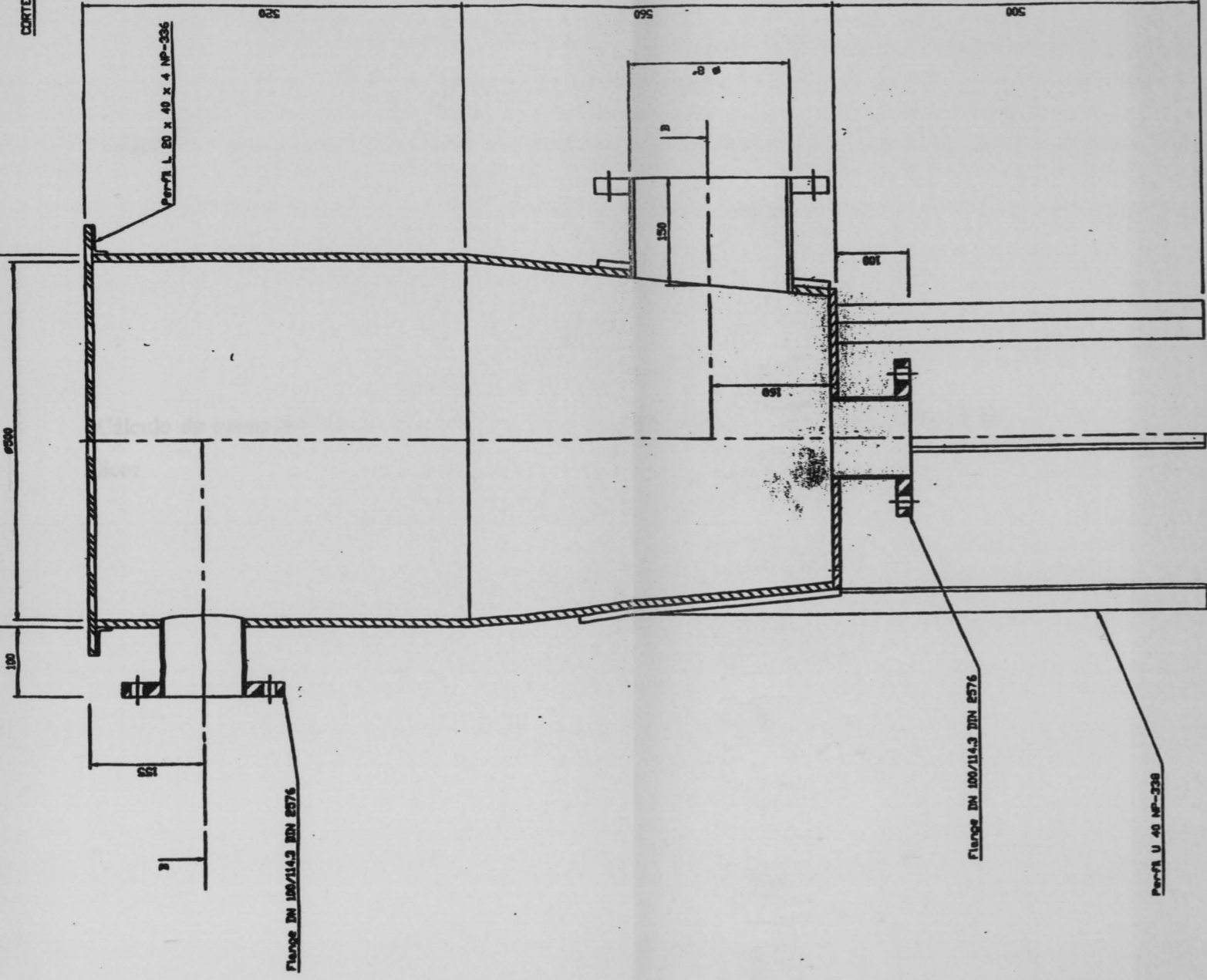


Tampa Inferior



Dados	Nome
Projeto	
Desenho	
Verifica	
Escalas	
Material	Material em Aço ou Carbono
FORNO	
DESEJO 2	

CORTE A-A



CITEC S.p.A. Via	
Disegnato Verificato Approvato Data	Modificato Data
Elaborazione Data	
Firma	

Exemplo para 700ml de licor:

Densidade do licor de abstração a 40°Brix = 1,15

Um volume de 700ml, corresponde a aproximadamente 805g de licor

Massa de matéria seca do licor:

$$805 \times \frac{40}{100} = 322 \text{ g}$$

0,8% de CaO sobre a matéria seca do licor (para cal pura):

$$\frac{0,8 \times 322}{100} = 2,6 \text{ g}$$

ANEXO II

Como é usado Ca(OH)_2 no vez de CaO, e a sua massa molar é de 74%

Cálculo da massa de Cal, ou lamas incineradas, correspondente a 0,8% da matéria seca do licor

$$2,6 \times \frac{M(\text{Ca(OH)}_2)}{M(\text{CaO})} = \text{g de Cal a pesar}$$

Pura

Quando se usam lamas incineradas este último cálculo não é necessário, pois o que temos presente nas lamas é CaO. É necessário determinar previamente a sua percentagem.

Exemplo para 700ml de licor:

Densidade do licor de afinação a 40°Brix = 1.15

Um volume de 700ml, corresponde a aproximadamente 805g de licor

Massa de matéria seca do licor:

$$805 \times \frac{40}{100} = 322 \text{ g}$$

0.8% de CaO sobre a matéria seca do licor (para cal pura):

$$\frac{0.8 \times 322}{100} = 2.6 \text{ g}$$

Como é usado Ca(OH)_2 na vez de CaO, e a sua pureza não é de 100%:

$$\frac{2.6 \times \frac{M(\text{Ca(OH)}_2)}{M(\text{CaO})}}{\text{Pureza}} = \text{g de Cal a pesar}$$

Quando se usam lamas incineradas este último cálculo não é necessário, pois o que temos presente nas lamas é CaO. É necessário determinar previamente a sua percentagem.

Utiliza-se o método de análise denominado *Determinação da cor de soluções coradas* para determinar a cor dos licores.

A cor ICUMSA é determinada do seguinte modo:

$$\text{Cor ICUMSA} = \frac{\text{Abs} \times 1000}{a \times b}$$

Em que:

Abs = Absorvância registrada a 420nm

a = Comprimento da célula de leitura em cm

b = Concentração da solução teste em g/ml, obtida a partir de tabelas brix vs concentração

A cor também pode ser calculada através do programa "cor" existente no software de laboratório.

ANEXO III

- Selecionar-se o número de células

- Introduzir-se o valor da absorvância (em milhões)

- Introduzir-se o valor da brix correspondente a solução em decimas

Cálculo da percentagem de descoloração

A percentagem de descoloração obtém-se a partir da seguinte fórmula:

$$\% \text{ descoloração} = \frac{\text{cor inicial do licor} - \text{cor final do licor}}{\text{cor inicial do licor}} \times 100$$

Utiliza-se o método de análise denominado *Determinação da cor de soluções coradas* para determinar a cor dos licores.

A cor ICUMSA é determinada do seguinte modo:

$$\text{Cor ICUMSA} = \frac{\text{Abs} \times 1000}{a \times b}$$

Em que:

Abs = Absorvância registada a 420nm

a = Comprimento da célula de leitura em cm

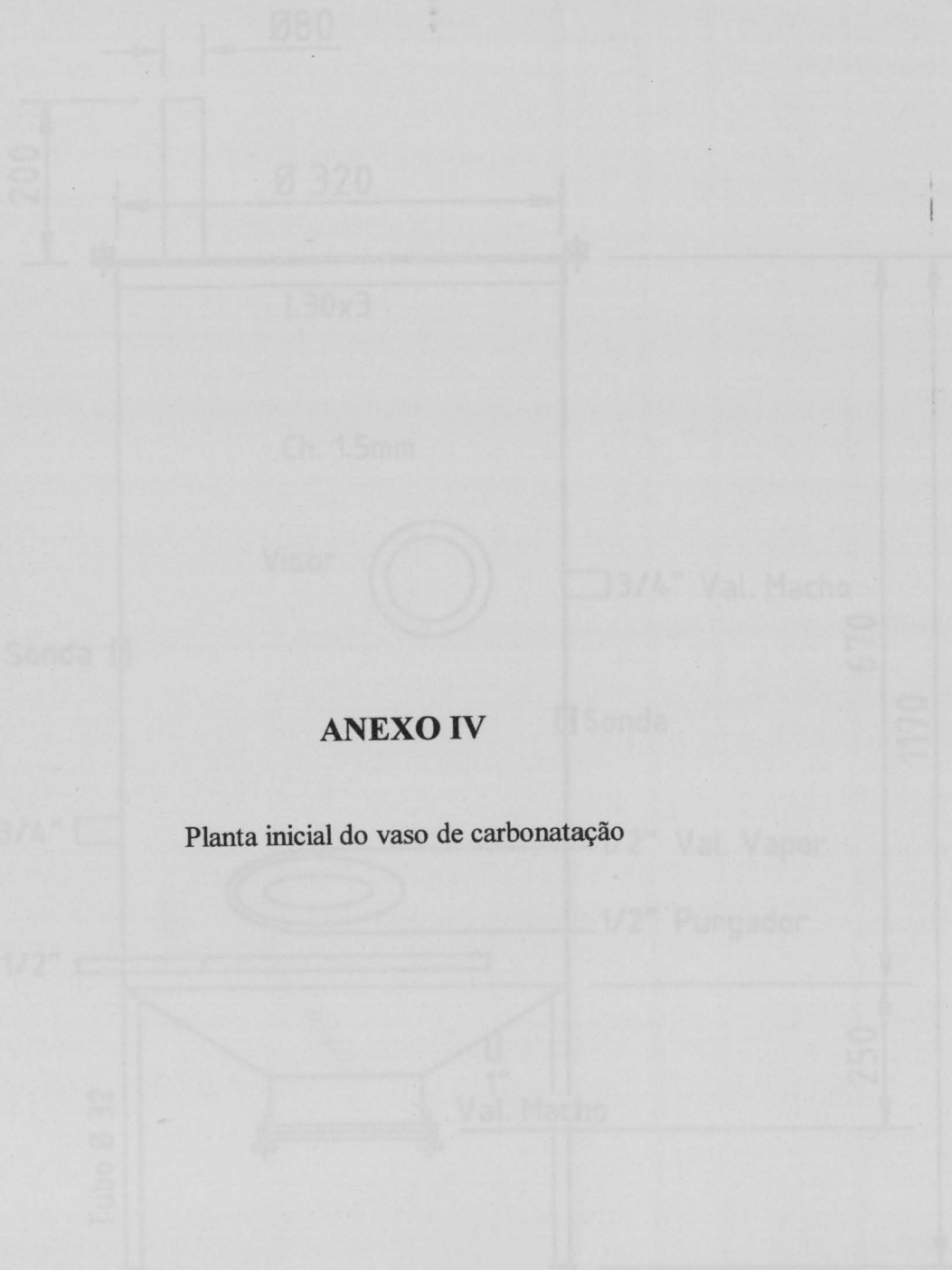
b = Concentração da solução teste em g/ml, obtida a partir de tabelas brix vs concentração

A cor também pode ser calculada através do programa “cor” existente no software do laboratório:

- Selecciona-se o tamanho da célula
- Introduce-se o valor da absorvância (exprime-se o resultado até às milésimas)
- Introduce-se o valor do brix (exprime-se o resultado até às décimas)


A percentagem de descoloração calcula-se a partir da seguinte fórmula:

$$\% \text{ descoloração} = \frac{\text{cor inicial do licor} - \text{cor final do licor}}{\text{cor inicial do licor}} \times 100$$

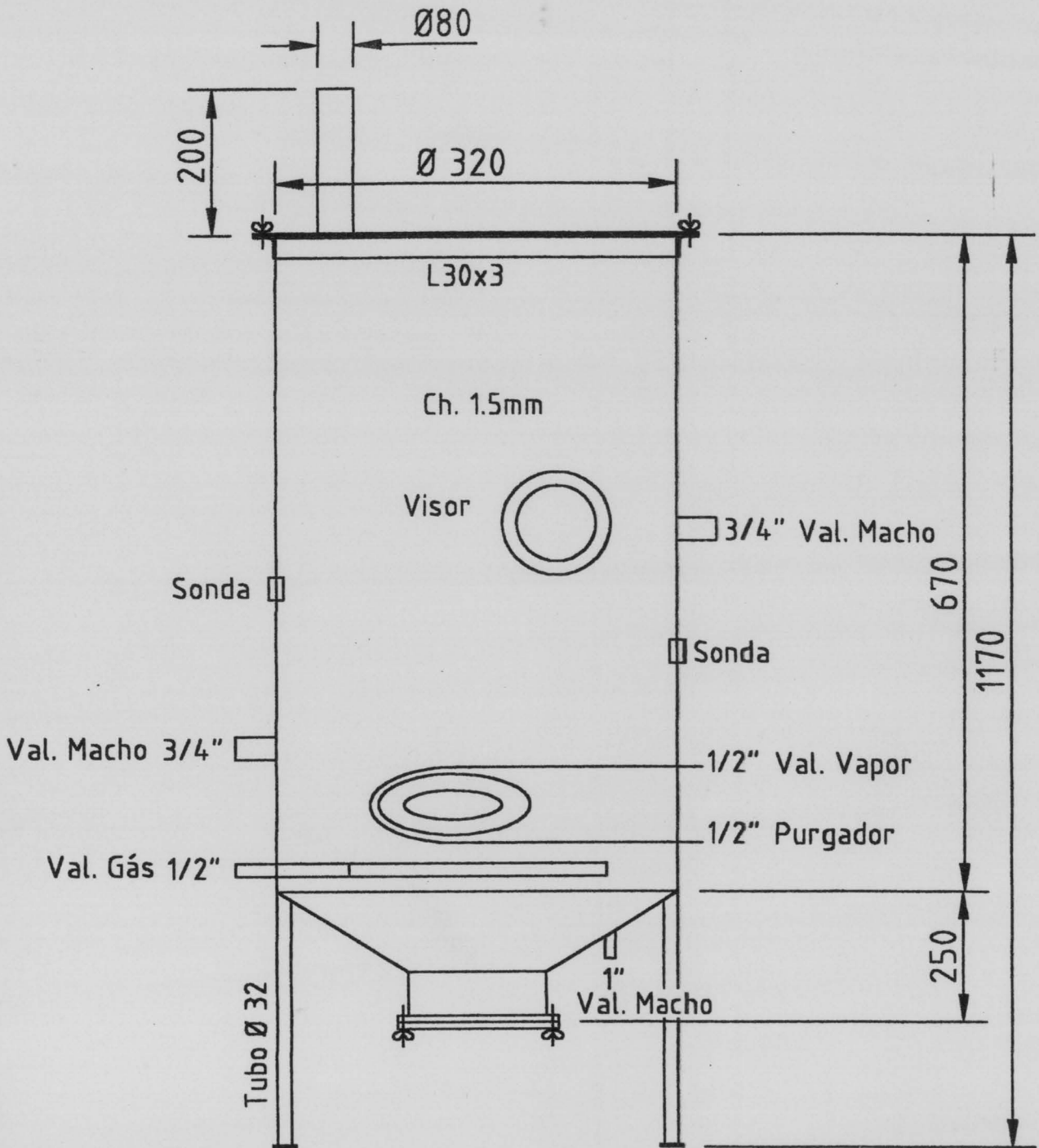


ANEXO IV

Planta inicial do vaso de carbonatação

		<p>Santos & Duarte, Lda.</p>	
<p>PROJETO :</p>	<p>REVISÃO :</p>	<p>CLIENTE :</p>	<p>RAR – REFINARIAS DE AÇÚCAR REUNIDAS, S.A.</p>
<p>DATA :</p>	<p>08/08/10</p>	<p>OBJETO :</p>	<p>DEPOSITO DE CARBONATAÇÃO</p>
<p>ESCALA :</p>	<p>1:1</p>		





Fabril Metalúrgica Codul <i>Costas & Duarte, Lda.</i>			
DESENHOU :	JBarrote	CLIENTE:	RAR - REFINARIAS DE AÇUCAR REUNIDAS,SA
PROJECTOU :			
VERIFICOU :			
DATA :	98/09/10	DESIGNAÇÃO:	DEPOSITO DE CARBONATAÇÃO
ESCALAS :	OBS:		
		CAD FILE NAME	
		DES. N°	
		SUBSTITUI O N°	
		SUBSTITUIDO PELO N°	



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



000088324