



---

## **PROPOSTA DE MELHORIA NA AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA DE MATERIAL PARTICULADO, DA CHAMINÉ DE UM INCINERADOR DE RESÍDUOS PERIGOSOS**

DIOGO H. C. MANZAN<sup>1,2</sup>, EUCLIDES A. P. LIMA<sup>1</sup>, PABLO G. SILVA<sup>1,2</sup>  
(um espaço)

<sup>1</sup>Uniube (Universidade de Uberaba), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Mestrado Profissional em Engenharia Química

<sup>2</sup> Neotech Soluções Ambientais LTDA

**RESUMO** – A destinação correta de resíduos vem sendo exigência mundial para um controle ambiental melhor e redução da poluição. O tratamento térmico de resíduos perigosos atua neste cenário com um dos processos mais seguros para a destruição de substâncias perigosas que poderiam causar diversos danos ao meio ambiente e a sociedade. Embora o tratamento térmico possua uma alta eficiência na destruição de moléculas perigosas, uma operação ineficaz deste processo pode resultar em emissões atmosféricas dos produtos da combustão, além de outras substâncias ainda mais tóxicas. Uma das principais medidas aplicada para controlar estas emissões é a instalação e operação de sistemas de tratamento dos gases gerados nos equipamentos de tratamento térmico. Visando o controle ainda mais efetivo os órgãos ambientais solicitam o monitoramento contínuo e periódico destas emissões, sendo necessário a medição da emissão gasosa e da sua composição e concentração. Porém, até mesmo a medição deve seguir rigorosamente normativas técnicas específicas, de forma a garantir a fidedignidade das amostras coletadas e os resultados obtidos. Desta forma este trabalho apresenta uma avaliação de uma chaminé instalada em um processo de tratamento térmico de resíduos perigosos da agroindústria, e apresenta uma proposta de melhoria na chaminé para adequação da amostragem isocinética.

### **INTRODUÇÃO**

A incineração de resíduos perigosos, é uma estratégia ambiental, para a redução de massa e volume de substâncias nocivas. Este processo industrial complexo, envolve várias etapas de manipulação dos resíduos industriais perigosos, a queima controlada e posterior tratamento dos gases gerados no processo.

Embora este tratamento de resíduos perigosos, seja uma estratégia ambiental, quando operada de forma inadequada e com falhas no controle do processo, pode ocasionar poluição ambiental e geração de substâncias ainda mais tóxicas.

Para o controle das operações industriais de tratamento térmico de resíduos perigosos, é fundamental e obrigatório o monitoramento dos gases emitidos na chaminé.

Este monitoramento será determinado pelo órgão ambiental licenciador, respeitando os parâmetros e limites estabelecidos na resolução do CONAMA 316 de 29 de outubro de 2002. Incluindo a amostragem e análise de material particulado (MP).

Desta forma para um efetivo controle das emissões atmosféricas e do MP, é necessário verificar se as condições da amostragem são fidedignas, e estão em acordo com as normas técnicas para a correta determinação dos parâmetros definidos. Tais como fluxo não ciclônico dos gases e o posicionamento correto do ponto de amostragem isocinética.

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **Resíduos Perigosos**

De acordo com Barros (2012) os resíduos sólidos são resultantes de atividades industriais, urbanas, domésticas, hospitalares e agrícolas, que possam ser descartadas, portanto, ainda podem sofrer processamento para recuperação de produtos, energia ou outros.

A normativa ABNT NBR 10.004 (2004), define os resíduos como perigosos e não perigosos. Os resíduos perigosos são aqueles possuem como características ser, inflamável, tóxico, corrosivo, reativo e patogênico, e os demais são considerados não perigosos.

Barros (2012) cita ainda que os resíduos perigosos podem possuir funções físicas, químicas e ou biológicas, que apresentam riscos ao meio ambiente e a saúde pública.

### **Incineração de Resíduos**

De acordo com Oliveira et al (2020), a incineração de resíduos é uma reação termoquímica, no qual ocorre um processo de oxidação controlada. Esta reação promove a decomposição térmica dos resíduos perigosos em substâncias menos nocivas, reduzindo a massa e o volume.

Porém, a incineração de resíduos pode gerar gases que após passar por resfriamento no tratamento dos gases pode sintetizar substâncias que possuem alta toxicidade tais como dioxinas e furanos, desta forma Barros (2012) cita que é necessário a instalação e operação de equipamentos de controle de poluição.

Baird e Cann (2011) complementa que as dioxinas e os furanos não são comercialmente produzidos. Elas surgem como subprodutos na produção de certos herbicidas, ou na destruição térmica deles, ou outros processos. Sendo as dioxinas e furanos congêneres, os quais nem todos apresentam alta toxicidade. Porém, algumas apresentam alto índice de toxidez, além de propriedade como bioacumulação.

### **Geração de gases e material particulado na incineração de resíduos perigosos**

Para que a incineração ocorra de forma adequada o sistema deve ser monitorado seguindo as diretrizes da Resolução do CONAMA 316, de 29 de outubro de 2002. Assim para atender a esta demanda deve ser monitorado periodicamente, a vazão dos gases

gerados no processo, assim como sua composição, comparada com limites estabelecidos na referida legislação.

As substâncias inorgânicas a serem monitoradas de acordo com a Resolução do CONAMA 316, de 29 de outubro de 2002 são: classe I (Cd, Hg e Tl), classe II (As, Co, Ni, Te, Se) e classe III (Sb, Pb, Cr, CN, Cu, Sn, F, Mn, Pt, Pd, Rh e V), deve ser monitorado ainda o material particulado MP, e os gases SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, HCl, HF, dioxinas e furanos.

### **Amostragem isocinética de partículas**

Costa (1994) cita que em emissões gasosas, as partículas como o material particulado (poeiras), irão comportar-se de acordo com as linhas de correntes gasosas (fluxo). Para coletar estas poeiras, para a realização de análise laboratorial, visando a determinação das concentrações são utilizadas sondas de amostragem acopladas com boquilhas.

A amostragem dos gases gerados no processo de incineração de resíduos, deve ocorrer de forma isocinética conforme citado por Esmanhoto (2010). Ou seja, estabelecer uma condição de igualdade entre a aspiração impressa pelo equipamento de medição com a velocidade que os gases são emitidos.

Se a velocidade dos gases no bocal de amostragem é a mesma da velocidade na chaminé, a amostragem é representativa, portanto, isocinética (Costa, 1994).

De forma distinta, se a velocidade no bocal de amostragem for acima da velocidade dos gases na chaminé, as partículas de menor diâmetro serão arrastadas para dentro da boquilha, porém as partículas grandes e com maior inércia, não terão sua trajetória afetada pelo fluxo do bocal, como mostrado na Figura 1. Portanto a medição apresentará resultado maior de partícula pequenas do que o real medido de forma isocinética, enquanto as partículas maiores não serão afetadas (Costa, 1994).

Esmanhoto (2010) cita que quando a condição de amostragem apresentar velocidade de sucção menor que a velocidade do fluxo dos gases na chaminé, as partículas maiores e com maior inercia não desviarão sua direção e serão captadas, fazendo com que o fluxo dos gases pela boquilha seja

temporariamente desviado, como se a boquilha estivesse tampada. As partículas menores por possuir menor inércia irá acompanhar estes desvios de direção dos gases e não serão amostradas, esta amostragem é denominada como sub-isocinética, e está apresentada na Figura 2.

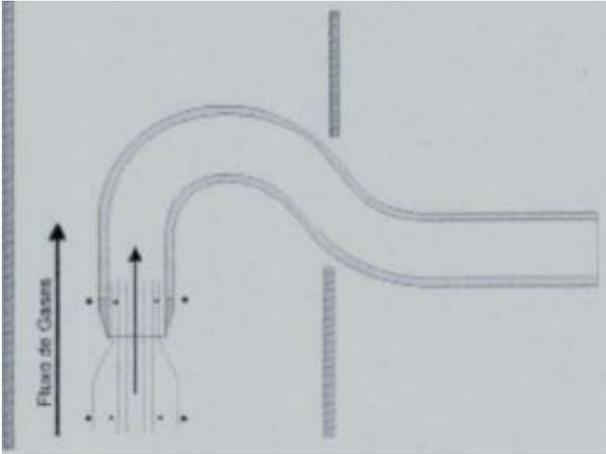


Figura 1: Amostragem com velocidade superior a isocinética (Costa, 1994).

Esta coleta sub-isocinética terá maior quantitativo em massa, devido ao peso das partículas maiores, porém contará com menor quantidade de partículas menores quando comparado com o amostrado isocineticamente.

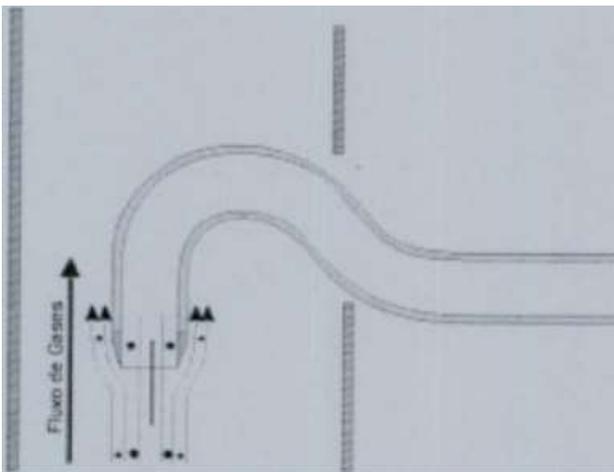


Figura 2: Amostragem sub-isocinética (Costa, 1994).

### Metodologia de coleta isocinética em vários pontos

Alguns problemas na amostragem gasosa, pode ocorrer devido a velocidade dos gases, como a alteração da composição e

concentração, em decorrência de fluxos preferenciais dentro dos dutos das chaminés. Desta forma se torna muito difícil acompanhar a velocidade dos gases e determinar a velocidade de aspiração da sonda, conforme citado por Esmanhoto (2010).

Oliveira et al (2020) cita que o processo de incineração de resíduos, é um processo no qual a matéria prima, não ocorre de forma constante, pois as misturas de resíduos, chamados de mix, podem sofrer diversas variações, o que pode implicar em diversas velocidades e composições distintas de gases para serem amostrados. Sendo assim necessário aplicar uma metodologia de coleta que faz a varredura da seção do duto, evitando assim erros de amostragem.

A norma técnica da CETESB L9221 de julho de 1990, determina que se a seção amostrada for circular, e o ponto de coleta estiver a no mínimo 8 vezes o diâmetro interno do duto a jusante e 2 vezes o diâmetro interno do duto a montante de qualquer distúrbio de fluxo, pode ser considerado um número mínimo de 9 pontos para diâmetros internos de 0,30 até 0,6m, e 12 pontos para diâmetros internos maiores que 0,6m. A Figura 3, apresenta a metodologia de amostragem para 12 pontos divididos em áreas iguais.

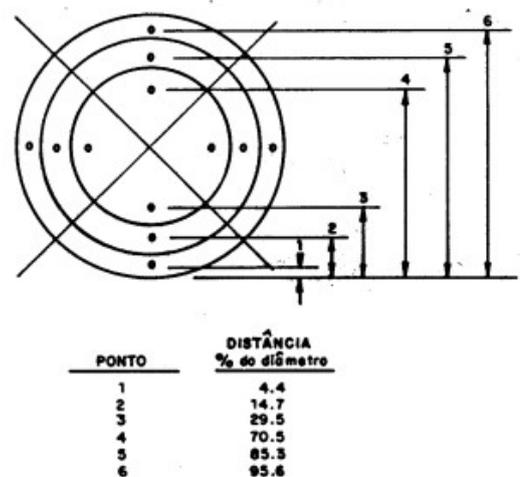


Figura 3: Metodologia de amostragem para 12 pontos em seção circular (CETESB, 1990).

Quando a localização do ponto de amostragem estiver fora da faixa estabelecida de 8 e 2 diâmetros, o número mínimo de pontos deve ser obtido utilizando a Figura 4.

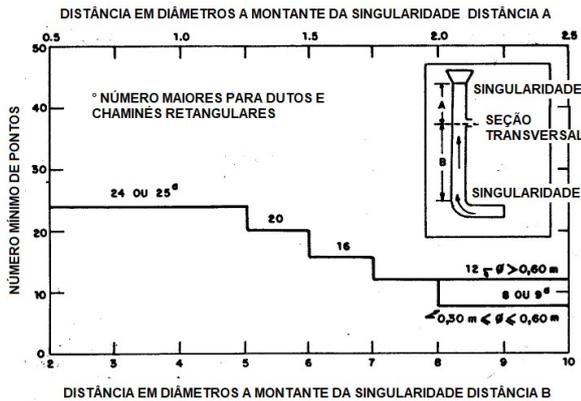


Figura 4: Determinação do número de pontos de amostragem (CETESB, 1990).

### Interferência fluidodinâmica na amostragem isocinética segundo a Norma Técnica da CETESB L9221:90

A amostragem isocinética, pode sofrer alterações nos resultados, quando influenciados pelo fluxo ciclônico dos gases. O fluxo ciclônico ocorre quando as linhas de fluxo não são paralelas ao eixo longitudinal do duto ou da chaminé de acordo com o estabelecido na norma técnica da CETESB L9221 de julho de 1990.

A referida normativa estabelece ainda que para determinar a ocorrência do fluxo ciclônico, deve-se usar um tubo de Pitot como mostrado na Figura 5, acoplado a um manômetro nivelado e zerado. O tubo de Pitot, vai ser posicionado em cada ponto da seção transversal, sendo considerado o ângulo de  $0^\circ$ .

Quando a leitura for diferente de  $0^\circ$ , deve girar o tubo de Pitot, até encontrar a leitura  $0^\circ$ . Após a coleta em todos os pontos, deve-se realizar a média das leituras. Se a leitura for indicada maior que  $10^\circ$  o fluxo é considerado ciclônico, portanto, a metodologia de amostragem não poderá ser empregada.

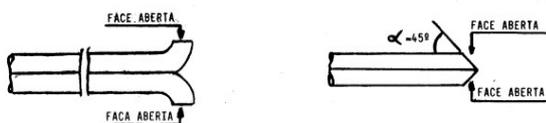


Figura 5: Tubo de Pitot do tipo S e do tipo cobra (CETESB, 1990).

Outro impacto da fluidodinâmica da chaminé na amostragem isocinética, está

relacionada com os distúrbios de fluxos (singularidades), tais como curvas, expansão, contração, chama visível, entradas ou desvios, de acordo com a norma técnica da CETESB L9221 de julho de 1990.

### Determinação de material particulado em chaminés estacionárias

O material particulado deve ser coletado isocineticamente, ponto a ponto e a massa é determinada gravimetricamente. A amostragem é realizada com equipamento denominado trem de amostragem

## METODOLOGIA

A metodologia aplicada para a melhoria da amostragem isocinética de gases no sistema de incineração consiste em recalculer os diâmetros da chaminé, determinando a cota A e B com relação a última singularidade.

Deve se determinar a presença ou ausência de fluxo ciclônico. Para isso deve-se usar um tubo de pitot do tipo S calibrado, um manômetro de coluna e um transferidor com régua EDA.

Primeiramente insere o tubo de pitot no duto de amostragem, e realiza a varredura de toda a seção transversal, qualquer valor indicado no manômetro de coluna que seja diferente de zero, deve-se girar o tubo de pitot até encontrar a pressão zero, o giro do pitot deve ser medido pelo transferidor em graus. O somatório de todos os graus medidos nas correções não pode ultrapassar  $10^\circ$ . Caso isso aconteça o fluxo é determinado como ciclônico.

Por fim deve-se recalculer a quantidade de pontos a serem amostrados na varredura da seção transversal.

## DESENVOLVIMENTO

### Caracterização do equipamento incinerador

O processo de tratamento térmico de resíduos perigosos analisado neste estudo, é composto por 7 etapas. Sendo o recebimento de resíduos, a triagem e identificação, o armazenamento dos resíduos para processamento, o preparo do resíduo para tratamento térmico, o tratamento térmico, o

tratamento dos gases gerados no processo e a destinação de cinzas corretamente, conforme mostra a Figura 6.



Figura 6: Processo de tratamento térmico de resíduos perigosos (Autor).

O equipamento incinerador é composto por duas câmaras, a câmara de combustão e a câmara de pós queima. A temperatura na câmara de combustão é mantida entre 800°C a 1100°C, enquanto a câmara de pós queima opera com temperatura entre 1000°C e 1250°C. Da câmara de combustão são removidas as cinzas e da câmara de pós queima são removidos os gases de combustão, conforme Figura 7.

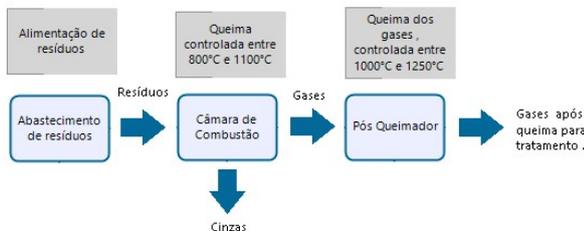


Figura 7: Processo de combustão de resíduos perigosos (Autor).

### Caracterização da chaminé e do ponto de amostragem

Os gases de combustão são removidos da câmara de pós queima, e são destinados para o lavador de gases, que contém equipamentos para a remoção de contaminantes atmosféricos, antes da efetiva liberação para a atmosfera, incluindo trocador de calor e resfriamento flash, de forma a impedir a formação de dioxinas e furanos.

A amostragem dos gases para atendimento a requisitos legais estabelecidos na Resolução do CONAMA 316, de 29 de

outubro de 2020, é realizada em duto de 410 mm, localizado a 1500 mm do último distúrbio de fluxo. Possuindo ainda 5600 mm de chaminé até a saída dos gases para a atmosfera.

A saída dos gases, após o sistema de tratamento, é contemplada por um vaso cilíndrico com topo afunilado. Do duto de saída dos gases até o término do afunilamento são 2250 mm de acordo com a Figura 8. O diâmetro da chaminé é de 410 mm.

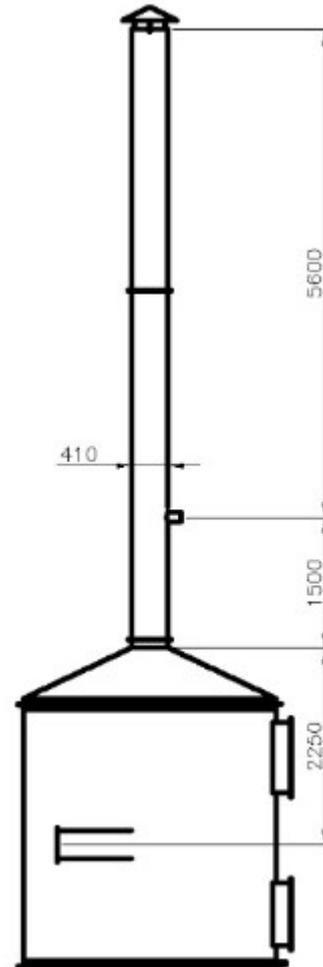


Figura 8: Chaminé de saída dos gases e o ponto de amostragem (Autor).

Realizando o cálculo para a conferência da amostragem isocinética, fica determinado o seguinte:

$$B = 8 \times \text{Din} = 8 \times 410 \text{ mm} = \mathbf{3280 \text{ mm.}}$$

$$A = 2 \times \text{Din} = 2 \times 410 \text{ mm} = \mathbf{820 \text{ mm.}}$$

B: Distância do ponto de coleta a montante da singularidade.

A: Distância do ponto de coleta a jusante da singularidade.

Din: Diâmetro interno do duto da chaminé.

Os cálculos demonstram que seriam necessários 3280 mm da singularidade até o ponto de coleta, e na Figura 9, é demonstrado que a distância está com 1500 mm.

### Determinação da quantidade de pontos amostrados

Devido a distância mínima da cota B de 8 diâmetros internos não ter sido atendido, deve se determinar a quantidade de pontos para coleta, utilizando a Figura 4 da norma técnica da CETESB L9221 de julho de 1990.

Desta forma utilizando a cota B de 1500 mm, dividindo por 410 mm, encontra o valor de 3,65 diâmetros. De forma similar utilizando a cota A de 5600 mm, encontra o valor de 13,65 diâmetros. Assim fica determinado o quantitativo de 24 pontos de amostragem conforme Figura 9.

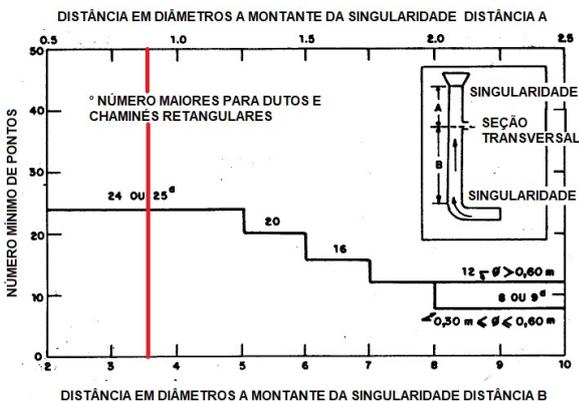


Figura 9: Determinação da quantidade de pontos amostrados (Adaptado de CETESB, 1990).

### Determinação de fluxo ciclônico

Foi utilizado um tubo de Pitot do tipo S, nas duas aberturas laterais da chaminé conforme mostrado na Figura 10. O manômetro de coluna foi acoplado em ambas as saídas do tubo de pitot, afim determinar a ausência ou presença do fluxo ciclônico. Foi utilizado um transferidor com régua EDA, para medição dos ângulos de giro.



Figura 10: Pontos de amostragem na chaminé (Autor).

Foi realizado a medição do fluxo com o auxílio do tubo de Pitot acoplado no manômetro de coluna, e foi determinado a leitura de  $0^\circ$  em toda a extensão da chaminé, conforme Figura 11.



Figura 11: Medição do fluxo na chaminé, para determinação de fluxo ciclônico (Autor).

Desta forma pode ser determinado que o escoamento dos gases na chaminé está regular, e não está ocorrendo fluxo ciclônico.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Projeto de melhoria e adequação da fluidodinâmica da chaminé

Conforme demonstrado nos cálculos, o ponto de coleta embora apresente fluxo regular e ausente de fluxo ciclônico, está em desacordo com o estabelecido na normativa ambiental.

Esta divergência do ponto de amostragem pode gerar coletas e resultados analíticos imprecisos e que não representam a realidade. Desta forma se faz necessário adequar a fluidodinâmica da chaminé.

Como proposta para adequar a fluidodinâmica da chaminé, foi elaborado projeto de modificação da geometria da chaminé, removendo o casco cilíndrico, e utilizando duto para condução dos gases, conforme demonstrado na Figura 12.

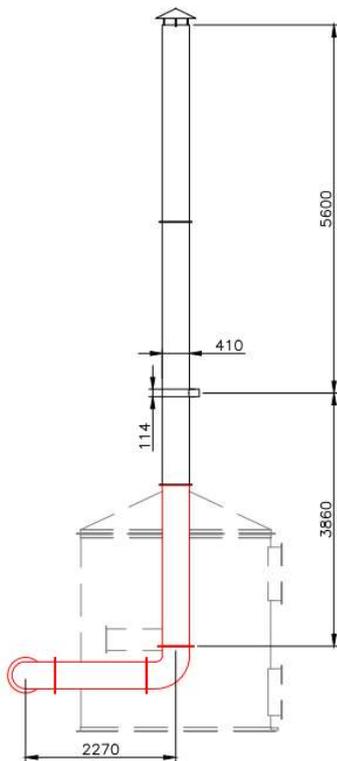


Figura 12: Projeto de correção da chaminé (Autor).

O projeto apresentado possui distância entre a última singularidade e o ponto de coleta de 3860 mm, superior aos 3280 mm mínimos exigidos na legislação ambiental.

### Redução da quantidade de pontos amostrados

Com a execução do projeto de melhoria da chaminé, uma nova configuração de amostragem deve ser elaborada. Determinando assim a nova quantidade de pontos de amostragem.

Realizando a divisão dos 3860 mm, pelo diâmetro da chaminé de 410 mm, encontra-se a cota B de 9,41 diâmetros. Substituindo este valor na Figura 13, determina a nova quantidade de coletas de 8 ou 9 pontos.

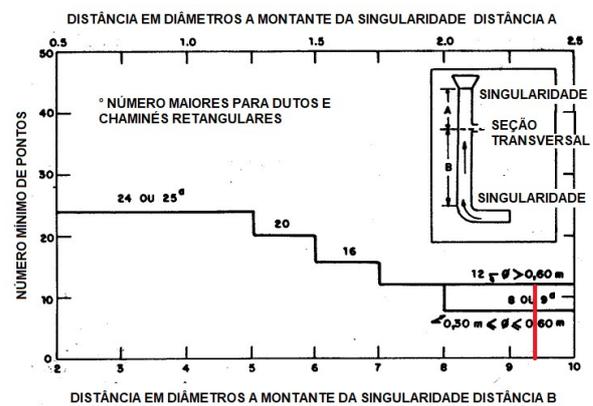


Figura 13: Determinação da quantidade de pontos amostrados na nova configuração (Adaptado de CETESB, 1990).

Com a nova determinação de 8 ou 9 pontos devido ao diâmetro ser inferior a 0,60m ou 600 mm, fica evidente a economia com custos analíticos diminuindo a quantidade de pontos coletados anteriormente em 24, assim como fica regular com a legislação ambiental vigente.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 10004/04. Resíduos Sólidos – Classificação. 2ed. 31/05/2004.
- BARROS, R. M. Tratado Sobre Resíduos Sólidos: Gestão, Uso e Sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciência, 2012.
- BAIRD, C; CANN, M. Química Ambiental. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- COSTA, M. A. M. (1994), Amostragem de Partículas Dispersas em Correntes Gasosas Confinadas. PPGEQ/UEM – Maringá – PR, 166p. (dissertação de mestrado).

- ESMANHOTO, E. (2010), Desenvolvimento de Sistema de Amostragem Isocinética com Análise Quantitativa de Material Particulado em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias. PIPE/UFPR – Curitiba – PR, 89 p. (dissertação de mestrado).
- OLIVEIRA, L. C. P; SILVA, P. G; BIAZI, J. M. C; LIMA, E. A. P. (2020), Estudo da Operação e Controles de Processos na Incineração de Resíduos de Serviço de Saúde e Industriais Visando o Atendimento aos Limites Máximos de Emissões Atmosféricas Pela Resolução CONAMA 316/02. Anais do 23º COBEQ 18º ENBEQ 2020 – Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Encontro Brasileiro Sobre Ensino de Engenharia Química, Gramado – RS.
- Resolução CONAMA 316/2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. 29/10/2002
- Norma Técnica CETESB L9221. Dutos e chaminés de fontes estacionárias – determinação dos pontos de amostragem: procedimento. Jul/1990.