

Estudo de Caso de Asfixia por Inalação de Monóxido de Carbono em Ambiente Confinado: Morte Acidental de Casal em São Gonçalo

Brasil Junior, J. C.^{a,*}, Teixeira, F. G.^{a,**}

^a Instituto de Criminalística Carlos Éboli, Secretaria de Estado de Polícia Civil, Rio de Janeiro (RJ), Brasil

* Endereço de e-mail para correspondência: profbrasil@terra.com.br.

** Endereço de e-mail para correspondência: peritofilipegteixeira@gmail.com.

Recebido em 18/07/2024; Revisado em 16/04/2026; Aceito em 20/06/2026

Resumo

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor, inodoro e insípido, resultante da combustão incompleta de compostos de carbono, cuja exposição é potencializada em ambientes fechados e mal ventilados. Sua alta afinidade pela hemoglobina leva à formação de carboxihemoglobina, comprometendo o transporte de oxigênio e podendo causar anóxia tecidual, com manifestações que variam de sintomas leves a morte. Este artigo analisa um caso de morte de um casal encontrado no interior de um veículo estacionado em garagem fechada, sem sinais de violência. A investigação pericial indicou compatibilidade com intoxicação acidental por CO, embora os exames toxicológicos tenham sido inconclusivos quanto à presença de carboxihemoglobina. A partir dos achados periciais e de modelagem físico-química simplificada, estimou-se a evolução da concentração de CO no ambiente, demonstrando que níveis letais poderiam ser atingidos em curto intervalo de tempo (aproximadamente 8 a 33 minutos), mesmo em condições normais de funcionamento do veículo. Os resultados evidenciam a importância da análise integrada do local, dos vestígios e da modelagem científica na interpretação de mortes por possível intoxicação por CO, especialmente diante de limitações dos exames toxicológicos. O estudo reforça a relevância da perícia de local na elucidação da dinâmica dos fatos e na determinação da natureza acidental do evento.

Palavras-Chave: Monóxido de Carbono; Intoxicação; Estudo de caso; Exame de Local; Morte Acidental.

Abstract

Carbon monoxide (CO) is a colorless, odorless, and tasteless gas resulting from the incomplete combustion of carbon-containing compounds, with exposure being intensified in enclosed and poorly ventilated environments. Its high affinity for hemoglobin leads to the formation of carboxyhemoglobin, impairing oxygen transport and potentially causing tissue anoxia, with manifestations ranging from mild symptoms to death. This article analyzes a case involving the deaths of a couple found inside a vehicle parked in a closed garage, with no signs of violence. The forensic investigation indicated findings consistent with accidental CO intoxication, although toxicological tests were inconclusive regarding the presence of carboxyhemoglobin. Based on forensic findings and simplified physicochemical modeling, the evolution of CO concentration in the environment was estimated, demonstrating that lethal levels could be reached within a short time interval (approximately 8 to 33 minutes), even under normal vehicle operating conditions. The results highlight the importance of an integrated analysis of the scene, physical evidence, and scientific modeling in the interpretation of deaths potentially caused by CO intoxication, especially in light of limitations in toxicological testing. The study reinforces the relevance of crime scene investigation in elucidating the dynamics of events and determining the accidental nature of the occurrence.

Keywords: Carbon Monoxide; Poisoning; Case Study; Scene Examination; Accidental Death.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor, inodoro e insípido, resultante da combustão incompleta de compostos de carbono, como matéria orgânica em geral. Suas fontes incluem incêndios, veículos automotores, sistemas de aquecimento, usinas termoeletricas, fumaça de

cigarro, queima de biomassa, plásticos e combustíveis fósseis. Dada uma mesma fonte, a exposição crônica ou aguda ao monóxido de carbono é maximizada em ambientes fechados e/ou mal ventilados [1 – 8].

O CO é conhecido por sua alta afinidade pela hemoglobina, formando carboxihemoglobina (COHb), o que impede o transporte de oxigênio e causa anóxia

tecidual. A toxicidade do CO se deve à sua capacidade de deslocar o oxigênio da hemoglobina com uma afinidade 200-300 vezes maior. Isso resulta em sintomas que variam, conforme a exposição, desde cansaço, dores de cabeça e tontura até estupor, coma e morte [1 – 8].

A fisiopatologia envolve não apenas a formação de COHb, mas também um possível impacto direto sobre enzimas celulares vitais, ampliando os efeitos além da anóxia induzida. A eliminação do CO ocorre principalmente através dos pulmões, com uma meia-vida de eliminação variando de horas a minutos, dependendo das condições de oxigenação ([1], [2], [5], [7]).

Conforme [5], a intoxicação por monóxido de carbono é a principal causa de mortes tanto intencionais quanto acidentais por envenenamento nos Estados Unidos. A exposição ao escapamento de automóveis é o mecanismo mais comum para envenenamento intencional por CO. A inalação de fumaça é a fonte mais comum de exposição acidental ao CO, sendo que aproximadamente 80% das mortes em incêndios resultam da inalação de fumaça.

Automóveis sem catalisadores podem chegar a concentrações de até 10% de CO ou 100.000 ppm [1]. Conforme [7], um suicida determinado pode sentar-se em seu carro e conectar um tubo do escapamento até suas narinas, ou permanecer perto do tubo de escape em sua garagem com as portas fechadas. Devido à fraqueza que logo se instala, ele não conseguirá se levantar e desligar o motor, mesmo que deseje fazê-lo. Ainda conforme [7], em alguns casos, motoristas e passageiros em um carro fechado são afetados pelos gases do escapamento que penetraram no interior do veículo.

Sob a perspectiva médico-legal e criminalística, tais situações evidenciam a dificuldade, frequentemente observada, de se delimitar com precisão entre suicídio deliberado e autoeliminação involuntária. Trata-se de um mecanismo asfíxico cuja evolução fisiopatológica é progressiva e insidiosa, podendo comprometer a capacidade volitiva da vítima em tempo hábil para reverter a conduta. Essa particularidade tem relevância na análise jurídica do elemento subjetivo, especialmente quanto à configuração de dolo eventual, eventual desistência voluntária ou mesmo à distinção entre morte autoprovocada e acidental.

O monóxido de carbono é um gás incolor, inodoro e insípido e a exposição inicial a baixas concentrações pode ser assintomática ou produzir apenas sintomas inespecíficos e leves, como cefaleia e tontura. Contudo, a

absorção cumulativa ao longo do tempo, com progressiva formação de carboxihemoglobina (COHb), leva à redução da capacidade de transporte de oxigênio, podendo atingir níveis críticos de toxicidade. Esse caráter gradual faz com que a intoxicação frequentemente passe despercebida até a instalação de comprometimento neurológico, perda de consciência e eventual evolução para o óbito.¹

2. PROBLEMÁTICA

D., homem adulto jovem, e V., mulher adulta jovem, moradores de São Gonçalo, Estado do Rio de Janeiro, desapareceram após saírem para fazer compras em um supermercado no centro de Niterói. O casal foi visto pela última vez saindo do supermercado em um Gol azul marinho por volta das 18h30 e, segundo vizinhos, retornaram para casa por volta das 22h30. A partir desse momento, não fizeram mais contato com familiares ou amigos, gerando grande preocupação e mobilização para encontrá-los [9–13].

As famílias, após buscas em hospitais e IMLs da região, registraram os desaparecimentos na Polícia Civil, que inicialmente trabalhou com a hipótese de que eles teriam sido abordados por assaltantes na entrada do prédio onde V. morava e sequestrados [9–13].

No entanto, após quase uma semana de buscas, os corpos de D. e V. foram encontrados em avançado estado de putrefação no interior de um carro estacionado na garagem da casa onde futuramente planejavam morar, ainda em São Gonçalo [9–13].

As investigações do caso foram transferidas da 73ª DP para a Divisão de Homicídios de Niterói e São Gonçalo (DHNSG) devido à grande repercussão nacional do caso. Todas as hipóteses foram consideradas pela investigação (homicídio, suicídio ou acidente) enquanto aguardavam os resultados dos exames de local, necropsia, toxicológico e complementar do veículo pela Engenharia. [9–13].

3. ANÁLISE TÉCNICO-CIENTÍFICA

3.1 - EXAME PERICIAL DO LOCAL

O Perito Criminal Brasil, coautor deste artigo e então lotado no Posto Regional de Polícia Técnico Científica de São Gonçalo, foi o responsável pelo exame do local, inicialmente requisitado como exame de local de morte violenta, em resposta à requisição da autoridade

¹ Dadas essas características, popularmente, a morte por intoxicação por monóxido de carbono é também conhecida

como “MORTE DOCE”, e o CO é apelidado de “ASSASSINO SILENCIOSO”.

policial da 73ª DP. O objetivo principal era entender o que de fato ocorreu no local, realizando a diagnose diferencial das mortes, pois a investigação suspeitava, inclusive, de um duplo homicídio, já que o casal estava desaparecido há uma semana, sendo considerada até a possibilidade de sequestro.

O local estava preservado, isolado e acautelado. Tratava-se de uma garagem fechada de uma residência em São Gonçalo. A garagem foi aberta somente com a chegada da perícia, e o Perito Criminal foi o primeiro a ingressar no local, ou seja, não havia qualquer informação prévia sobre a dinâmica do fato.



Figura 1 – Local.



Figura 2 – Local.

A garagem era completamente fechada, não apresentava janelas e estava com seus dois acessos fechados: 1) um portão de deslocamento vertical com fechamento junto ao piso para acesso à via pública; e 2) um acesso ao terreno, composto por uma porta de madeira seguida de um pequeno hall fechado (1 m² por 1,5 m²) e uma porta de ferro. Não havia frestas relevantes entre o

portão e as portas em relação às paredes, teto e piso do local. Para todos os efeitos de uma intoxicação rápida, o ambiente era completamente vedado e isolado do mundo exterior, com uma renovação de ar desprezível nessas condições.

Os corpos estavam dispostos nos bancos dianteiros do veículo (um automóvel Volkswagen Gol, cor azul, ano 1998/1999, a gasolina e GNV) sem qualquer lesão aparente, assim como no local não havia vestígios de movimentação violenta ou luta corporal. D. estava sentado no banco do motorista, com a cabeça inclinada para o lado direito, enquanto V. estava no banco do carona, com a cabeça virada para o lado esquerdo. Ambos os cadáveres estavam em avançado estado de putrefação, já na fase enfisematosa, com aspecto gigantesco e destacamento de amplos retalhos da epiderme.

O veículo estava desligado, porém com a chave na ignição e o ar-condicionado na posição de ligado. No painel e no banco traseiro foram encontradas embalagens de alimentos abertas, ainda com alimentos não consumidos, sugerindo que o casal os consumia no interior do veículo, além de compras de mercado no veículo (conforme a investigação, o casal foi visto com vida pela última vez após compras em um supermercado). Esses vestígios indicam que o casal chegou ao local logo após sair do mercado e optou por permanecer ali por algum tempo com o carro ligado dentro da garagem.

Portanto, no local havia uma fonte substancial de monóxido de carbono ao mesmo tempo em que sua configuração não permitia a renovação do ar ambiente, circunstâncias que propiciaram a acumulação gradual de monóxido de carbono até concentrações letais. Relatos de mortes acidentais devido a veículos em garagens fechadas são comuns em países de clima frio [1–8], embora raros no Brasil. O fato de terem ocorrido duas mortes simultâneas robustece a hipótese, uma vez que uma única morte poderia resultar de causas naturais mais comuns, como infarto ou AVC.

Após um exame e inspeção minuciosos, não foram encontrados vestígios de ação criminosa no local. A ausência de sinais de violência, luta ou presença de terceiros, aliada às demais constatações realizadas, permitiu ao Perito Criminal afastar a hipótese de homicídio e indicar a compatibilidade do quadro com um acidente, em que os ocupantes teriam sido expostos a monóxido de carbono proveniente do escapamento do veículo, acumulado em ambiente fechado sem ventilação. Cabe esclarecer, no entanto, que a conclusão sobre a causa médica da morte (ex: "intoxicação por monóxido de carbono") é de competência da Perícia Médico-Legal, baseada em exames necroscópicos e toxicológicos. O

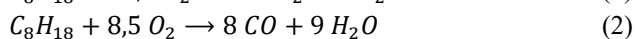
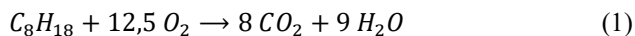
Perito Criminal, em sua esfera, limita-se à análise dos vestígios materiais e à reconstrução da dinâmica fática, não à diagnose da causa mortis.



Figura 3 – Local, área após o isolamento. Fonte: [14].

3.2 – ANÁLISE CIENTÍFICA DA DINÂMICA DA INTOXICAÇÃO RELATADA NO LAUDO DE LOCAL

A gasolina é composta por uma mistura de hidrocarbonetos, mas vamos considerá-la como octano (C_8H_{18}), seu principal componente, para descrever o fenômeno da combustão completa (Eq.1) e incompleta do combustível (Eq.2):



Assim que o veículo chegou à garagem, a atmosfera do local era composta basicamente por cerca de 21% de oxigênio (O_2), 78% de nitrogênio (N_2), 0,93% de argônio, 0,04% de dióxido de carbono (CO_2) e traços de outros gases. Uma vez fechado o local, cessando a troca de gases da garagem com o exterior, à medida que o motor do automóvel funcionava, ele consumiu gasolina e oxigênio (O_2), os reagentes das reações (Eq.1 e Eq.2), e liberou os gases dióxido de carbono (CO_2) e monóxido de carbono (CO) e vapor d'água como produtos. Importante ressaltar que a respiração dos ocupantes acelerou a redução do oxigênio disponível e a produção de dióxido de carbono.

Com o passar do tempo, a atmosfera da garagem tornou-se cada vez mais perigosa, pois tanto o excesso de CO e CO_2 quanto a falta de O_2 são letais. Devido à alta toxicidade do CO e ao fato de o escapamento do veículo automotor (a gasolina ou gás) produzir emissões com concentrações perigosas de CO que seria aspirado para o interior do veículo pelo ar condicionado, a primeira

condição a se tornar letal é a alta concentração de CO. Foi constatado que o veículo apresentava o controle para circulação interna de ar desativado, o que indica que o sistema de renovação com o ambiente externo encontrava-se atuante. Este é o cenário base deste caso, outro cenário possível seria o de o veículo também apresentar falha mecânica que ocasionasse que parte dos gases da combustão extravasasse diretamente para a cabine, o que, com vidros fechados e um menor volume de ar, provocaria uma deterioração do ar respirado pelos ocupantes muito mais rapidamente. Esse segundo cenário foi investigado no exame complementar do veículo pelo Serviço de Perícia de Engenharia do ICCE.

No interior do veículo, os ocupantes começaram a ser expostos ao monóxido de carbono. Inicialmente, é possível que não tenham apresentado sintomas ou tenham experimentado apenas manifestações leves, como tonturas e cefaleia. À medida que a concentração ambiental de CO aumentava e o tempo transcorria, a dose efetiva — resultante do produto entre concentração e tempo de exposição — elevava-se progressivamente, intensificando os efeitos tóxicos. Essa evolução levou a um estado de letargia e, posteriormente, à perda de consciência. A resposta fisiológica individual, influenciada por fatores como condições de saúde e ventilação pulmonar, pode ter modulado a velocidade desse processo, mas, uma vez instalado o estupor, os ocupantes permaneceram incapazes de interromper a exposição. Nessa condição, continuaram a absorver CO até atingir carga tóxica incompatível com a vida, dependendo exclusivamente de intervenção externa para interromper este processo, a qual não ocorreu.

Por fim, o automóvel continuou a funcionar até que o motor parou, o que pode ter ocorrido por falta de combustível ou devido à baixa concentração de oxigênio. O marcador do combustível indicava que o mesmo estava na reserva de combustível.

Outras informações relevantes que constam do laudo de local: 1) volume total de ar da garagem de cerca de 26.000 L; 2) volume de ar somente no interior do veículo de cerca de 6.000 L; 3) o veículo ligado e parado consome cerca de 1,5 L de gasolina por hora, 4) a emissão dos motores a explosão interna com gasolina pode conter concentração altas de até 3% a 7% de monóxido de carbono, 30.000 a 70.000 ppm; 5) gráfico com as doses letais de CO.

3.3 - NECROPSIA E EXAME TOXICOLÓGICO

Na necropsia, foi relatado que os cadáveres encontravam-se em avançado estado de putrefação, não

foram constatadas lesões e foi coletado sangue de ambos para exame toxicológico.

O exame toxicológico do sangue de D., realizado 8 meses após a necropsia, teve a análise prejudicada, pois o sangue já estava coagulado. Na necropsia complementar, com base na necropsia e no exame toxicológico, o Perito Legista concluiu que a causa da morte foi indeterminada.

No exame toxicológico do sangue de V., realizado um mês e meio após a necropsia, foi realizada uma pesquisa indeterminada de tóxicos, álcool e monóxido de carbono, utilizando os métodos CCD, CG e RC. Foi constatada a concentração de 6,0 dg/L de etanol no sangue, e a pesquisa indeterminada de tóxicos, realizada conforme a metodologia disponível no laboratório à época, não detectou a presença de qualquer substância potencialmente tóxica.

A pesquisa para a determinação de hemoglobina ligada a monóxido de carbono foi negativa, não sendo observada a presença deste complexo em quantidades significativas na amostra de sangue. Conforme o laudo, a pesquisa para este fim é realizada de forma qualitativa, não permitindo a detecção de pequenas concentrações do complexo Hb-CO.

Na necropsia complementar de V., com base na necropsia e no exame toxicológico, o Perito Legista concluiu que a causa da morte foi indeterminada devido ao avançado estado de putrefação.

Há uma contradição apenas aparente entre os achados do exame toxicológico e do exame do local. A concentração de etanol constatada é suficiente para baixar o alerta e prejudicar a coordenação [15], porém pode ser produzida por microorganismos durante o processo de putrefação [15]. Conforme [15], a produção de etanol é possível durante a putrefação em faixas de 0,07–0,22 g/dL ou 7-22 dg/L, especialmente no contexto de diabetes (até 0,5 g/dL ou 50 dg/L).

Já o exame negativo para carboxihemoglobina (COHb) não era esperado, pois a carboxihemoglobina é estável inclusive em cadáveres em avançado estado de putrefação [7], e espera-se alguma saturação por carboxihemoglobina em todos os indivíduos. O próprio laudo relata que o exame não é sensível a concentrações baixas de COHb, porém em mortes por intoxicação de CO espera-se saturações da ordem de 50% ou mais

Não há informações sobre a embalagem e como foi armazenada a amostra de sangue de V., mas a causa registrada na literatura mais provável para o exame negativo é a decomposição da carboxihemoglobina da amostra, uma vez que o CO é volátil e se desprende da amostra para a atmosfera. Conforme [5], em tradução livre:

Um dos fatores mais significativos que afetam a medição de %COHb e a subsequente interpretação da toxicidade por CO é a capacidade de medir com precisão o conteúdo de CO no sangue. Alterações post-mortem na concentração de %COHb foram documentadas em vários estudos. Em geral, a saturação de %COHb diminui à medida que o tempo de armazenamento aumenta.

Foi documentado que espécimes não preservados podem perder até 60% do seu conteúdo de CO quando armazenados em recipientes sem tampa à temperatura ambiente. A redução de %COHb dependia da área de superfície do espécime exposta ao ar (quanto maior a área de superfície, maior a perda de CO), da temperatura de armazenamento (temperaturas mais altas resultam em maior perda de CO) e da saturação inicial de %COHb (maior %COHb inicial resulta em maior e mais rápida perda de CO). Quando os recipientes são tampados, o volume de espaço livre sobre o espécime de sangue é um fator significativo na quantidade de CO perdida, pois parte do CO se equilibrará entre o sangue e o espaço livre. A perda de CO cessará uma vez atingido o ponto de equilíbrio; portanto, quanto maior o volume de espaço livre, maior a perda de CO para esse espaço. A temperatura de armazenamento e a %COHb inicial também afetam a taxa de perda. Embora a perda de CO ocorra em todos os espécimes armazenados, essa perda pode ser minimizada preservando-se os espécimes de sangue com EDTA ou fluoreto de sódio, minimizando o espaço livre acima do espécime e armazenando os espécimes a temperaturas reduzidas; o armazenamento em condições congeladas minimiza a perda de CO de forma mais eficaz do que a refrigeração.

3.4 – EXAME COMPLEMENTAR DO VEÍCULO PELA ENGENHARIA

O exame complementar do veículo realizado pelo Serviço de Perícias em Engenharia do ICCE trouxe novas informações importantes. Conforme o laudo, o veículo estava em pane seca, ou seja, não havia gasolina suficiente no tanque para dar partida, o que indica que o motor permaneceu ligado até que toda a gasolina, incluindo a reserva, fosse consumida.

Também foi constatado que o ar condicionado funcionava adequadamente e estava com a tecla de circulação interna desativada, o que indicava que o sistema renovava o ar da cabine com o ar do ambiente externo.

O cilindro de GNV estava abastecido, e não foi constatada nenhuma falha nesse sistema. Além disso, não foi relatada nenhuma falha mecânica que pudesse causar a infiltração dos gases do escapamento no interior da cabine, o que poderia provocar intoxicação por CO mesmo com o veículo em um ambiente aberto (caso estivesse com os vidros fechados).

Por fim, o Perito Criminal concluiu que, em condições normais, o veículo consome oxigênio e emite monóxido de carbono (CO) nos gases do escapamento, especialmente em marcha lenta. Em um ambiente confinado, isso pode levar rapidamente à morte por asfixia.

3.5 - ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO AO LONGO DO TEMPO

A investigação à época concluiu, com base nas circunstâncias constatadas no laudo de exame de local das mortes e corroboradas pelo exame do veículo, que as mortes foram acidentais e ocasionadas por intoxicação por monóxido de carbono, apesar dos resultados dos exames médico-legais, que concluíram a causa da morte como indeterminada.

Escrevemos este artigo anos após os fatos e a descoberta do resultado do exame toxicológico foi surpreendente. Discutimos na seção 3.3 anterior as possíveis causas desses resultados inesperados. No entanto, essa incoerência motivou esta seção do artigo, que busca estimar a variação da concentração de monóxido de carbono ao longo do tempo na garagem e suas implicações.

Faremos uma estimativa com base nos achados do local e algumas simplificações, almejando apenas simular matematicamente o fenômeno. A primeira suposição, bem razoável frente a descrição do local, é que a garagem é um sistema fechado sem troca de massa com o exterior, ou seja, não haverá renovação da atmosfera. Vamos supor comportamento ideal dos gases, $T = 25^\circ \text{C} = 298 \text{ K}$, $P = 1$

$\text{atm} = 101.325 \text{ Pa}$ e V do ar na garagem constante, igual aos $26.000 \text{ L} = 26 \text{ m}^3$ relatados no laudo. Utilizando a equação dos gases ideais (Eq.3) e a constante $R = 8,3144598 \text{ J/(K} \times \text{mol)}$, chegamos que o número de mol de gás na garagem é $n_{\text{gás}} = 1063,26 \text{ mol}$.

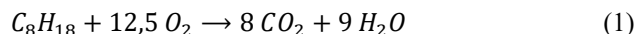
$$PV = nRT \quad (3)$$

Supondo uma atmosfera inicial com 21% de O_2 e 79% de N_2 , chegamos a $n_{\text{O}_2} = 223,28 \text{ mol}$ e $n_{\text{N}_2} = 839,98 \text{ mol}$. Faremos toda a estimativa calculando o número de mol, e quando for necessário calcular a fração molar de qualquer componente, a fórmula a ser utilizada é a Eq.4:

$$y_i = \frac{n_i}{n_{\text{gás}}} \quad (4)$$

Deve-se tomar cuidado com o octano, cujo número de mol não deve ser contabilizado no $n_{\text{gás}}$ pois é líquido nas condições ambientes. Esta suposição é uma simplificação, pois a pressão de vapor da gasolina é alta e haverá algum vapor na fase gasosa. Vamos supor um tanque com 50 L de gasolina, que consideraremos como 100% de octano, cuja densidade é de cerca de $0,7 \text{ g/ml}$ e $\text{MM} = 114,229 \text{ g/mol}$. A partir desses dados, chegamos a $n_{\text{octano}} = 306,40 \text{ mol}$. Também estamos considerando que a água gerada na combustão estará na forma de vapor.

Utilizando o conceito de avanço da reação ou extensão da reação ϵ , com as Eq.1 e Eq.2³ e seus respectivos ϵ_1 e ϵ_2 chegamos a:



² Em uma simulação preliminar, na qual não se considerou a troca térmica entre a garagem e o ambiente externo — hipótese deliberadamente conservadora, por superestimar o aquecimento decorrente do funcionamento do motor —, verificou-se que a dose letal de monóxido de carbono seria atingida com um incremento de temperatura ambiente da ordem de apenas 11°C . Esse resultado indica que a elevação térmica exerce influência secundária sobre a dinâmica de acúmulo de CO no cenário analisado.

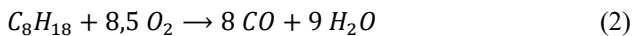
Diante disso, optou-se por adotar, no modelo final, a hipótese de temperatura constante, por se tratar de simplificação metodológica que não compromete a validade das conclusões quanto ao risco toxicológico. Ressalte-se que uma modelagem mais rigorosa, incorporando mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e irradiação, tenderia a reduzir ainda mais o incremento de temperatura estimado, sem impacto substancial sobre os tempos calculados para atingimento de concentrações perigosas ou letais de CO.

³ O consumo de oxigênio pelos ocupantes não foi explicitamente incorporado ao modelo, como

simplificação metodológica justificada pela diferença de ordem de grandeza em relação ao consumo pelo motor do veículo, este último significativamente superior e dominante na dinâmica do sistema.

As simulações indicaram, de forma consistente, que concentrações ambientalmente perigosas de monóxido de carbono são atingidas antes que a depleção de oxigênio alcance níveis críticos para hipóxia ambiental. No cenário com emissão de 5.000 ppm de CO no escapamento, por exemplo, observou-se o atingimento de aproximadamente 400 ppm de CO — patamar já associado a risco significativo à vida — enquanto a concentração de oxigênio ainda se mantinha em cerca de $19,3\%$, acima do limite inferior de segurança ocupacional.

Esse resultado reforça que, no contexto analisado, o mecanismo predominante de risco não é a hipóxia ambiental por redução de O_2 , mas a hipóxia funcional decorrente da formação de carboxihemoglobina, associada à exposição ao CO.



$$n_{N_2} = 839,98 \quad (5)$$

$$n_{octano} = 306,40 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (6)$$

$$n_{O_2} = 223,23 - 12,5\varepsilon_1 - 8,5\varepsilon_2 \quad (7)$$

$$n_{CO_2} = 8\varepsilon_1 \quad (8)$$

$$n_{CO} = 8\varepsilon_2 \quad (9)$$

$$n_{H_2O} = 9(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (10)$$

$$n_{gás} = n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{CO} + n_{H_2O} \quad (11)$$

Consideraremos o consumo constante de 1,5 L de octano por hora, que equivale a 9,1917 mol/h = 0,15320 mol/min, como a relação entre os graus de avanço e o tempo. Ou seja, a cada hora $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ avançam 9,1917 mol. Esse liame é necessário para chegarmos ao tempo, pois com as equações 4 a 11 calculamos como a concentração da atmosfera varia com o avanço das reações, mas sem qualquer informação de quanto tempo leva isso. A estimativa de 1,5 L/h à época do laudo de local demonstrou-se adequada, pois em consulta a [16] obtivemos a estimativa de consumo de 0,5 L a 3 L para um Kia Rio ano 2013, sendo este o veículo mais contemporâneo do estudo em relação ao veículo deste caso⁴.

$$\Delta t \text{ (min)} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{0,15320} \quad (12)$$

Para resolvermos o sistema, precisamos da relação entre ε_1 e ε_2 , ou seja, o quanto a combustão incompleta avança em relação à combustão completa. Sabemos que essa relação depende do tipo do motor e das condições ambientais; por exemplo, quanto menos oxigênio no ar, mais incompleta é a combustão. Essa

relação não é constante, portanto, é mais uma simplificação do modelo.

O laudo de local considerou que a concentração de CO no escapamento poderia ser tão alta quanto 3% a 7% de CO. No entanto, vamos considerar uma variação maior. Conforme [1], a exaustão de automóveis sem catalisadores pode chegar a concentrações de até 10% de CO ou 100.000 ppm. Já conforme o manual do Gol ano 1999, a emissão máxima de CO em marcha lenta é de 0,5% ou 5.000 ppm⁵. Simularemos os cenários de concentração de 0,5% a 10% de CO no escapamento do veículo, 5.000 a 100.000 ppm, respectivamente.

Resolvendo numericamente o sistema de equações para os gases de combustão na saída do escapamento, não estamos modelando a garagem neste caso, mas o gás no pistão do motor, e tendo como $y_{O_2} = 0$ e as concentrações de CO citadas, chegamos que para o veículo com escapamento com 0,5% de CO, $\varepsilon_2 = 0,041\varepsilon_1$, e para o veículo com escapamento com 10% de CO, $\varepsilon_2 = 2,05\varepsilon_1$. Com esses dados, podemos calcular como y_{CO} varia com o tempo, inclusive convertendo para ppm.

$$\varepsilon_2 = 0,0415\varepsilon_1 \text{ (melhor cenário)} \quad (13)$$

$$\varepsilon_2 = 2,065\varepsilon_1 \text{ (pior cenário)} \quad (14)$$

A literatura não é unânime quanto às concentrações letais de monóxido de carbono. Por exemplo, conforme [5], uma exposição a 400 ppm pode ser letal em menos de uma hora, e conforme [6], uma exposição a 1600 ppm pode ocasionar morte em menos de duas horas, enquanto uma exposição a 800 ppm pode ocasionar inconsciência em menos de duas horas. Optamos por utilizar a concentração de 400 ppm de CO como

⁴ O consumo de combustível do veículo foi estimado em 1,5 L/h à época da elaboração do laudo, não tendo sido objeto de medição direta. Revisão bibliográfica posterior indicou que tal valor se situa em faixa intermediária dentro dos intervalos reportados na literatura para veículos de características semelhantes, razão pela qual foi mantido como cenário base da modelagem.

Ressalte-se que o modelo desenvolvido admite a variação desse parâmetro, permitindo a simulação de diferentes taxas de consumo. Todavia, a análise de sensibilidade sugere que variações dessa ordem de grandeza (aproximadamente -67% a +100%) exercem impacto secundário sobre os resultados quando comparadas à variabilidade das concentrações de monóxido de carbono nos gases de escapamento. Com efeito, enquanto a taxa de consumo apresenta variação limitada, a concentração de CO pode variar de 5.000 ppm a 100.000 ppm, ou seja, em até uma ordem de grandeza superior (cerca de 20 vezes),

constituindo, portanto, o fator preponderante na dinâmica de acúmulo do gás no ambiente.

⁵ Considerando que não foram identificadas irregularidades no veículo, tanto no exame de local quanto no exame complementar realizado pelo Serviço de Engenharia, e inexistindo nos autos qualquer elemento indicativo de mau funcionamento, deve-se adotar como cenário base aquele especificado pelo fabricante, segundo o qual a emissão máxima de monóxido de carbono em marcha lenta é de 0,5% (5.000 ppm).

Ressalte-se, contudo, que não foi realizada medição direta da concentração de gases no escapamento do veículo, de modo que a análise de cenários alternativos, com emissões mais elevadas, mostra-se pertinente para avaliar a sensibilidade do modelo. Tal abordagem permite estimar o impacto de condições menos favoráveis — como falhas de regulação, desgaste ou ausência de sistemas de controle de emissões — sobre a dinâmica de acúmulo de CO no ambiente.

critério de decisão e consideraremos que concentração a partir de 400 ppm de CO constitui perigo de vida e uma dose de 400 ppm x hora já pode provocar a morte. Essa dose pode ser alcançada, por exemplo, com exposição a 800 ppm por meia hora ou 1600 ppm por 15 minutos.

Resolvendo o sistema de equações de 4 a 12, considerando o pior e melhor cenário (Eq. 13 e Eq.14), chegamos aos seguintes resultados, apresentados nos gráficos 1 e 2, que analisaremos frente ao critério de decisão escolhido para atmosfera perigosa à vida e dose letal de monóxido de carbono.

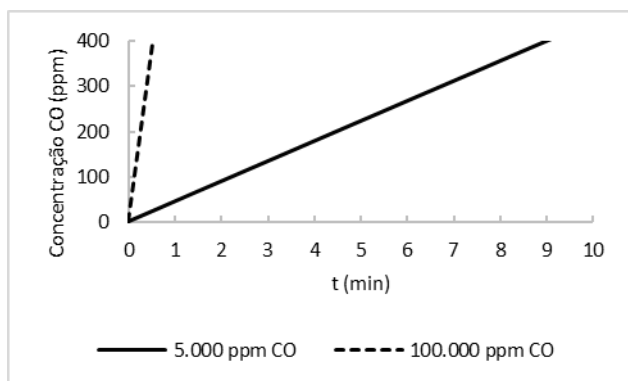


Gráfico 1 – Concentração de monóxido de carbono em ppm no local em relação ao tempo em minutos, cenários de veículo com emissão com 5.000 e 100.000 ppm de CO.

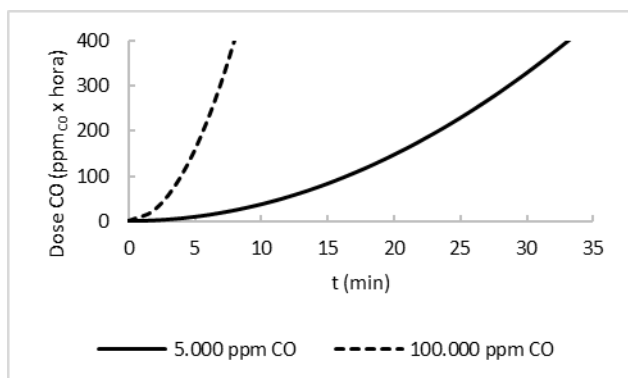


Gráfico 2 – Dose recebida pelos ocupantes do veículo em ppm x hora no local em relação ao tempo em minutos, cenários de veículo com emissão com 5.000 e 100.000 ppm de CO.

No melhor cenário, com o veículo emitindo 5.000 ppm de CO conforme o manual do veículo, em cerca de 9 minutos a concentração de monóxido de carbono exporia os ocupantes a risco de vida, e em cerca de 33 minutos os ocupantes teriam sido intoxicados com a dose letal de monóxido de carbono.

No pior cenário, com o veículo emitindo 100.000 ppm de CO, em menos de 1 minuto a concentração de monóxido de carbono exporia os ocupantes a risco de vida

e em cerca de 8 minutos os ocupantes teriam sido intoxicados com a dose letal de monóxido de carbono.

Ou seja, nas condições do local, um veículo automotor em estado regular poderia causar a morte acidental por intoxicação por CO em um curto intervalo de tempo. Dada as condições do local, em nossa estimativa simplificada, os ocupantes teriam falecido em cerca de 8 a 33 minutos, dependendo das características específicas do veículo.

4. CONCLUSÃO

A análise integrada dos exames periciais (local, necropsia, toxicologia e inspeção veicular) demonstrou que as mortes de D. e V. são compatíveis com intoxicação acidental por monóxido de carbono em ambiente confinado e sem ventilação adequada. A ausência de vestígios de violência, aliada à configuração do local e à disposição dos corpos, afasta a hipótese de ação criminosa.

A inconsistência entre os achados do local e os resultados toxicológicos, especialmente a ausência de detecção de carboxihemoglobina (COHb), pode ser explicada por limitações analíticas e por fatores relacionados à cadeia de custódia e ao armazenamento das amostras biológicas. Entre os principais fatores destacam-se: o intervalo prolongado entre a coleta e a análise; as condições de conservação (ausência de comprovação de refrigeração ou congelamento); o tipo de acondicionamento das amostras, com possível presença de headspace significativo; e a ausência de registro quanto ao uso de conservantes. Tais condições favorecem a difusão do monóxido de carbono da amostra para a fase gasosa, reduzindo a concentração detectável e podendo levar a resultados falso-negativos, mesmo em casos de intoxicação letal.

A modelagem físico-química simplificada indicou que, nas condições observadas, doses letais de monóxido de carbono poderiam ser atingidas em curto intervalo de tempo (aproximadamente 8 a 33 minutos), mesmo em condições normais de funcionamento do veículo, corroborando de forma independente a hipótese de morte acidental.

Os resultados evidenciam a relevância da perícia de local e da análise integrada de vestígios na elucidação de mortes por possível intoxicação por CO, especialmente em situações em que os exames médico-legais apresentam limitações.

Do ponto de vista preventivo, o caso reforça a necessidade de medidas simples e eficazes, tais como: evitar o funcionamento de veículos em garagens fechadas ou com ventilação insuficiente; garantir adequada

ventilação de ambientes confinados; realizar manutenção periódica dos sistemas de exaustão veicular; e, quando possível, utilizar detectores de monóxido de carbono em ambientes suscetíveis à acumulação do gás. A adoção dessas medidas pode reduzir significativamente o risco de eventos semelhantes.

Dessa forma, conclui-se que D. e V. sucumbiram aos efeitos do monóxido de carbono em um contexto acidental, cuja dinâmica foi adequadamente esclarecida pela convergência entre os vestígios periciais e a modelagem científica, apesar das limitações dos exames toxicológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Andrade Filho; D. Campolina; N.B. Dias. *Toxicologia na Prática Clínica*. 2. ed. Folium, Brasil (2013) 475 - 482.
- [2] D.J. Dorta; M. Yonamine; J.L. Costa; B.S. Martinis. *Toxicologia Forense*. 1. ed. Blucher, Brasil (2018) 329 - 350.
- [3] R.J. Flanagan; E. Cuypers; H.H. Maurer; R. Whelpton. *Fundamentals of Analytical Toxicology: Clinical and Forensic*. 2. ed. John Wiley & Sons, Estados Unidos (2020) 548-549.
- [4] N. R. Kalipatnapu. *Forensic Toxicology: Medico-Legal Case Studies*. CRC Press, Estados Unidos (2012) 145 -148
- [5] B.S. Levine; S. Kerrigan. *Principles of Forensic Toxicology*. 5. ed. Cham: Springer, Suíça (2020) 545 - 560.
- [6] D.K. Molina; V. Hargrove. *Handbook of Forensic Toxicology for Medical Examiners: Principles and Practice*. 2. ed. CRC Press, Estados Unidos (2018) p. 52.
- [7] C.K. Parikh. *Textbook of Medical Jurisprudence, Forensic Medicine and Toxicology for Classrooms and Courtrooms*. 8. ed. CBS Publishers & Distributors, Índia (2019) 679 - 681.
- [8] S. Oga; M.M.A. Camargo; J.A.O. Batistuzzo. *Fundamentos de Toxicologia*. 4. ed. São Paulo: Editora Atheneu, 2014 p. 159.
- [9] Globo. Casal encontrado morto em São Gonçalo será enterrado junto. Extra, 2013. Disponível em: <https://extra.globo.com/casos-de-policia/casal-encontrado-morto-em-sao-goncalo-sera-enterrado-junto-7107794.html>. Acesso em: 03 jul. 2024.
- [10] Globo. Casal encontrado morto em São Gonçalo não percebeu inalação de gás dentro de carro, diz perícia. Extra, 2013. Disponível em: <https://extra.globo.com/casos-de-policia/casal-encontrado-morto-em-sao-goncalo-nao-percebeu-inalacao-de-gas-dentro-de-carro-diz-pericia-7231113.html>. Acesso em: 03 jul. 2024.
- [11] G1. Casal encontrado em carro em São Gonçalo morreu asfixiado, diz IML. G1, 2013. Disponível em: <https://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2013/01/casal-encontrado-em-carro-em-sao-goncalo-morreu-asfixiado-diz-iml.html>. Acesso em: 03 jul. 2024.
- [12] Folha de S.Paulo. Casal encontrado em carro em São Gonçalo (RJ) morreu asfixiado, diz polícia. Folha de S.Paulo, 2013. Disponível em: <https://m.folha.uol.com.br/cotidiano/2013/01/1212320-casal-encontrado-em-carro-em-sao-goncalo-rj-morreu-asfixiado-diz-policia.shtml>. Acesso em: 03 jul. 2024.
- [13] UOL. Casal encontrado dentro de carro em São Gonçalo (RJ) morreu asfixiado. UOL Notícias, 2013. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2013/01/09/casal-encontrado-dentro-de-carro-em-sao-goncalo-rj-morreu-asfixiado.htm>. Acesso em: 03 jul. 2024.
- [14] O São Gonçalo, São Gonçalo, 20 de dezembro de 2021. Capa.
- [15] D.K. Molina; V. Hargrove. *Handbook of Forensic Toxicology for Medical Examiners: Principles and Practice*. 2. ed. CRC Press, Estados Unidos (2018) p. 90.
- [16] E. Moradi; L. Miranda-moreno. Vehicular fuel consumption estimation using real-world measures through cascaded machine learning modeling. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 88: p. 102576 (2020).